

Anwendungsorientierte und modellgestützte Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
M.Sc. Andreas Martini
geb. am 21.12.1984 in Herborn

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2017

gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier

Betreuer und erster Gutachter
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache
Universität Siegen

Zweiter Gutachter
Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
Technische Universität Dresden

Tag der mündlichen Prüfung
12. Dezember 2017

Anwendungsorientierte und modellgestützte Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen

Die Optimierung von bestehenden Routenzugsystemen verspricht vor dem Hintergrund oftmals suboptimal geplanter bzw. umgesetzter Systeme erhebliches Potential. Für die Hebung dieser Potentiale steht bisher keine methodische Unterstützung aus Anwendersicht zur Verfügung. Die vorliegende Dissertation begegnet diesem Problem mit der Entwicklung einer Methode, die die Identifizierung zweckmäßiger Optimierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung gestalterischer Aspekte unterstützt.

Der für die Zielerreichung zugrunde gelegte anwendungsorientierte Lösungsansatz umfasst die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen mithilfe von drei, zum Teil softwaretechnisch in Microsoft Excel umgesetzten, Modellen. Das Bewertungsmodell befähigt den Anwender eine Vielzahl der in der Praxis relevanten Routenzugsysteme abzubilden und anhand multidimensionaler Kennzahlen zu bewerten. Dies ermöglicht die systematische Analyse eines Routenzugsystems mit dem Ziel der Identifizierung, Quantifizierung und Darstellung von Wirkungen, um die für die Optimierung relevanten Stellgrößen unter Berücksichtigung individueller Zielvorstellungen zu bestimmen. Die anschließende Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen erfolgt unter Zuhilfenahme einer umfangreichen Wissensbasis der Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen. Abschließend dient die multiattributive Nutzentheorie in Kombination mit einem Entscheidungsbaumverfahren der Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade.

Die Anwendung der Methode und des Excel-Tools wird mittels eines Fallbeispiels demonstriert. Es wird dadurch deutlich, dass ineffizient geplante bzw. betriebene Routenzugsysteme durch methodische und softwaretechnische Unterstützung anwendungsorientiert optimiert werden können. Das Ziel weiterer Forschung muss es sein, einen ganzheitlichen und interdisziplinären Planungsansatz zu realisieren, der bereits im Zuge der Systemfindung Optimierungsverfahren und -erkenntnisse mit einbezieht.

Application-oriented and Model-based Evaluation, Analysis and Optimization of Internal Milkrun Systems

Against the background of often suboptimally planned resp. implemented internal milkrun systems, the optimization of existing systems promises considerable potential. There has not been any methodical support from the user's point of view yet to realize these potentials. The present dissertation counters this problem by developing a method which supports the identification of expedient optimization measures considering design aspects.

The application-oriented approach taken as a basis for achieving the target includes the evaluation, analysis and optimization of internal milkrun systems by means of three, partly in Microsoft Excel implemented, models. The evaluation model enables the user to depict several milkrun systems relevant in practice and evaluates them by means of multi-dimensional performance indicators. This allows the systematic system analysis with the objective to identify, quantify and depict effects to determine the parameters relevant for the optimization considering individual targets. The subsequent identification of potential optimization measures is made with the aid of a comprehensive knowledge base of design options of internal milkrun systems. Finally, the multi-attribute utility theory combined with a decision tree process serves for the determination of expedient optimization paths.

The application of the method and the Excel-tool is shown by means of a case study. Thereby it becomes apparent that a target-oriented optimization of inefficiently planned resp. operated internal milkrun systems is possible by methodical and software implemented support. The aim of further research shall be to realize an integrated and interdisciplinary planning approach which incorporates optimization procedures and findings already during the process of system design.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Logistik für Produktionsunternehmen im Department Maschinenbau der Universität Siegen. Den zahlreichen Personen, die in diesen fünf Jahren zum Gelingen meines Promotionsvorhabens beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle aufrichtig danken.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache, für seine hervorragende fachliche Unterstützung und sein persönliches Engagement bei der Betreuung meiner Arbeit. Durch seine jederzeitige Diskussionsbereitschaft und seine wertvollen Ratschläge hat er entscheidend dazu beigetragen, dass ich den roten Faden nicht verloren habe und mich immer wieder aufs Neue motivieren konnte. Darüber hinaus hat er mir spannende Erfahrungen abseits meiner Promotion ermöglicht, bei denen ich viel von ihm lernen durfte.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt für den konstruktiven Austausch bei der Richtlinienarbeit und die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens. Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt und Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel danke ich vielmals für ihre Unterstützung während meiner gesamten Zeit an der Universität Siegen sowie die freundliche Übernahme des Vorsitzes bzw. die Mitgliedschaft in der Promotionskommission.

Ein besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen Florian Trenker, Tobias Mauksch und Kai-Christian Zimmermann für den intensiven und konstruktiven Gedankenaustausch sowie die vielen hilfreichen Ideen, die Einzug in meine Arbeit gefunden haben. Die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die unterhaltsamen Gespräche werde ich in schöner Erinnerung behalten.

Frau Mailin Klaas und Frau Nadine Seidel danke ich für die sorgfältige Korrektur und Übersetzung unserer Veröffentlichungen sowie die umfangreiche Hilfestellung bei allen administrativen Tätigkeiten.

Auch den studentischen Hilfskräften Andreas Rohe und Tobias Schmallenbach möchte ich an dieser Stelle herzlich für die Mitwirkung bei der Entwicklung des Excel-Tools und die stets zuverlässige Literaturrecherche und -beschaffung danken.

Meinen Freunden danke ich vielmals für die notwendige Ablenkung und den privaten Ausgleich während meiner Promotionszeit. Des Weiteren haben sie durch gewissenhaftes Korrekturlesen und zahlreiche nützliche Anregungen zur besseren Lesbarkeit meiner Arbeit beigetragen.

Mein größter Dank gilt letztlich meiner Familie, die mit ihrer umfassenden Unterstützung und ihrem Rückhalt maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Insbesondere danke ich meinen Eltern Ute und Fritz Martini, dass sie mir diese Ausbildung ermöglicht und mir stets den richtigen Freiraum für meine persönliche und berufliche Entwicklung gelassen haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
1.3 Thematische Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	4
2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen.....	7
2.1 Begriffe und Definitionen	7
2.2 Aufgaben und Ziele	10
2.3 Vor- und Nachteile	12
2.4 Potentiale.....	15
2.5 Anwendungsvoraussetzungen und Eignungen.....	17
3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen	21
3.1 Klassifizierungsmerkmale	21
3.1.1 Hauptfunktion	21
3.1.2 Einbeziehung von Transportbedarfen	22
3.1.3 Verfahren	23
3.2 Beschreibung existierender Ansätze	24
3.2.1 Literatur im Bereich der Produktionstechnik.....	24
3.2.2 Literatur im Bereich des Operations Research	27
3.2.3 Routenzugspezifische Software	32
3.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit	34
4 Anforderungen und Lösungsansatz	37
4.1 Anforderungen an die Funktionalität der Methode	37
4.2 Lösungsansatz	37
4.3 Anforderungen an die Modelle.....	39
5 Gestaltungsmöglichkeiten	41
5.1 Technik.....	41
5.1.1 Ladungsträger.....	41
5.1.2 Transportmittel.....	43
5.1.3 Be- und Entladetechnik.....	56
5.1.4 Bereitstelltechnik	61
5.1.5 Informationstechnik	63
5.2 Organisation	65
5.2.1 Primäre Transportaufgabe.....	65
5.2.2 Materialflusssteuerungsprinzip	66
5.2.3 Auslösung des Transportauftrags.....	68

5.2.4	Route	69
5.2.5	Steuerung Tourenstart	74
5.2.6	Integration von Be- und Entladung	77
5.2.7	Anzahl Ladungsträgergrößen je Route	82
5.2.8	Anzahl Anhängertypen je Routenzug	84
5.2.9	Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess	85
5.2.10	Vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug	86
5.3	Morphologien	88
6	Bewertungsmodell.....	91
6.1	Modellbildung und -struktur	91
6.2	Zielbildung	92
6.3	Entwicklung eines Kennzahlensystems	94
6.3.1	Grundlagen.....	94
6.3.2	Herleitung von Kennzahlen	98
6.4	Bestimmung der Berechnungsweise von Kennzahlen	113
6.4.1	Routenbezogene Kennzahlenberechnung	113
6.4.2	Systembezogene Kennzahlenberechnung	118
6.5	Identifizierung des Informationsbedarfs	121
6.6	Umsetzung des Bewertungsmodells in MS Excel.....	123
6.6.1	Beschreibung des Anwendungsbeispiels	124
6.6.2	Aufbau und Funktionsweise.....	124
6.7	Beispielhafte Anwendung des Bewertungsmodells	142
6.8	Verifikation und Validierung	145
7	Analysemodell	151
7.1	Modellbildung und -struktur	151
7.2	Identifizierung von Wirkungen	151
7.2.1	Grundlagen.....	151
7.2.2	Sensitivitätsanalyse	156
7.3	Quantifizierung von Wirkungen.....	161
7.3.1	Grundlagen.....	161
7.3.2	Berechnung von Wirkintensitäten.....	162
7.4	Darstellung von Wirkungen	163
7.4.1	Parameteranalyse	163
7.4.2	Wirkungsanalyse.....	165
7.5	Umsetzung des Analysemodells in MS Excel.....	172
7.5.1	Tabellenblatt „R_X Analyse“	173
7.5.2	Tabellenblatt „System-Analyse“	183
7.6	Beispielhafte Anwendung des Analysemodells	184
7.7	Verifikation und Validierung	188
8	Optimierungsmodell	195
8.1	Modellbildung und -struktur	195
8.2	Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen	195

8.2.1	Vorgehensweise	196
8.2.2	Optimierungsmaßnahmen für das Anwendungsbeispiel.....	197
8.3	Überprüfung der Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen.....	201
8.3.1	Definition von Soll-Zuständen.....	202
8.3.2	Kennzahlenwerte.....	205
8.4	Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade.....	206
8.4.1	Grundlagen.....	206
8.4.2	Multiattributive Nutzentheorie.....	210
8.4.3	Entscheidungsfindung	213
8.5	Beispielhafte Anwendung des Optimierungsmodells	215
8.6	Verifikation und Validierung	220
9	Schlussbetrachtung.....	223
9.1	Beurteilung der Ergebnisse	223
9.2	Fazit.....	225
9.3	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick.....	228
	Literaturverzeichnis.....	231
	Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen	255
A.1	Definitionsblätter Strukturkennzahlen	255
A.2	Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen.....	258
A.3	Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen.....	281
A.4	Definitionsblätter Qualitätskennzahlen	302
	Anhang B: Dokumentation Excel-Tool	309
B.1	Systemanforderungen.....	309
B.2	Bedienungsanleitung	310
B.3	Einstufungshilfe Multiple-Lasten-Tool.....	319
	Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel	323
C.1	Eingangsgrößen Ist-Zustand.....	323
C.2	Bewertungsergebnis Ist-Zustand	328
C.3	Analyseergebnis Ist-Zustand: Kennzahlen.....	332
C.4	Analyseergebnis Ist-Zustand: Eingabeparameter (Tourenstartabstand)	344
C.5	Analyseergebnis Ist-Zustand: Kennzahlenaggregation.....	348
C.6	Bewertungsergebnisse Soll-Zustände.....	350
C.7	Optimierungsergebnis: 1. Stufe.....	358
C.8	Analyseergebnis Soll-Zustand 3 (Selbstbeladung): Kennzahlenaggregation	363
C.9	Analyseergebnis Soll-Zustand 4 (Routenzugtausch): Kennzahlenaggregation	365
C.10	Bewertungsergebnis Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet)	367
C.11	Optimierungsergebnis: 2. Stufe.....	369
C.12	Analyseergebnis Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet): Kennzahlenaggregation	371
	Datenanhang.....	373

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	5
Abb. 2:	Beispiel eines Routenzugsystems mit Unterscheidung von Systemelementen und -prozessen	10
Abb. 3:	Lösungsansatz für die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen.....	39
Abb. 4:	Minomi-Konzept zur ladungsträgerfreien Materialbereitstellung (oben links), Standard-KLT in modularen Größen (oben Mitte), Set-Behälter zum Transport mehrerer Produkte ohne trennende Zwischenlage (oben rechts), EURO-Gitterboxpalette (unten links) und Spezial-Transportgestell für Fahrzeugsitze (unten rechts) [CEC; AUER Packaging; Fromm Fördertechnik; EPAL; Elkas]	43
Abb. 5:	Plattformwagen (links) und Schlepper mit Anhänger (rechts) [Linde; Jungheinrich]	44
Abb. 6:	Darstellung der maximalen Anhängelasten und Wenderadien von zwei Plattformwagen, 30 Dreirad- und vier Vierrad-Schleppern [BIEGALE 2014, S. 25].	46
Abb. 7:	Leistungsdiagramm STILL CX-T mit Einsatzbeispiel [STILL]	47
Abb. 8:	Horizontal-Kommissionierer zur Aufnahme von zwei mit KLT beladenen Gestellen [Mercedes-Benz]	49
Abb. 9:	Kommissionierwagen mit zwei Ebenen (links), Kommissionierwagen mit Plattform (Mitte) und Handgabelhubwagen (rechts) [Fetra; Richter].....	50
Abb. 10:	Fahrerloser Schlepper zum Ziehen mehrerer Anhänger (links) und Unterfahrschlepper zum Transport von KLT in Regalen (rechts) [E&K Automation; ANT-System].....	51
Abb. 11:	Plattformwagen (links), Regalwagen (Mitte) und Rollenverschiebesystem (rechts) [LKE; FEIL]	52
Abb. 12:	Taxiwagen für KLT-Transport mit geöffneten Rampen zur Be- und Entladung (links) und mit geschlossenen Rampen (rechts) [LKE]	53
Abb. 13:	Anhänger mit C- und E-Rahmen zur einseitigen Be- und Entladung (oben) sowie U- und H-Rahmen zur beidseitigen Be- und Entladung (unten) [STILL; Jungheinrich; BeeWaTec]	54
Abb. 14:	Routenzug-Anhänger als automatisches Durchlaufregal für KLT (links) und Drive-Thru-Konzept zur automatischen Beladung von Schleppzügen (rechts) [BeeWaTec; fml TUM]	58
Abb. 15:	Vollautomatisches System zur Beladung von Schleppzügen (links) und teilautomatisiertes System zur Beladung von E-Rahmen mit GLT auf Trolleys (rechts) [M.W.B.; LR Intralogistik].....	60
Abb. 16:	Umsetzstation zur automatischen Beladung von Trolleys mit GLT [M.W.B.]	61
Abb. 17:	Prinzipdarstellung der Steuerung von Tourenstarts in Routenzugsystemen	77
Abb. 18:	Vergleich von Zyklus- und Wiederbeschaffungszeiten bei der Integration oder Entkopplung der Beladung mit unterschiedlichen Verbrauchssignalen	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 19: Technische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen.....	89
Abb. 20: Organisatorische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen.....	89
Abb. 21: Schematische Untergliederung eines Routenzugsystems in mehrere Routen mit Strukturelementen und deren Beziehungen zu Routenzugprozessen.....	92
Abb. 22: Zielsystem von Routenzugsystemen in Anlehnung an FEIL [FEIL 2016, S. 52].....	93
Abb. 23: Zieldimensionen zur Bewertung von Routenzugsystemen	94
Abb. 24: Unterscheidung von Kennzahlen in Anlehnung an HORVÁTH [HORVÁTH 2009, S. 505].....	95
Abb. 25: Kategorisierung von Bewertungskriterien und Kennzahlen im Kontext der Arbeit	100
Abb. 26: Übersicht logistikleistungsbezogener Bewertungskriterien für Routenzugsysteme	102
Abb. 27: Übersicht wirtschaftlicher Bewertungskriterien für Routenzugsysteme.....	103
Abb. 28: Übersicht qualitätsbezogener Bewertungskriterien für Routenzugsysteme.....	106
Abb. 29: Schematische Darstellung der Berechnungsweise eines Mehrroustensystems ohne Fahrzeug-Poolung	119
Abb. 30: Schematische Darstellung der Berechnungsweise eines Mehrroustensystems mit Fahrzeug-Poolung	121
Abb. 31: Darstellung der Beziehungen zwischen Eingangsgrößen, Berechnungsgrößen und Kennzahlen.....	123
Abb. 32: Schematische Darstellung des Anwendungsbeispiels in Anlehnung an die VDI- Richtlinie 5586 [VDI 2016b; VDI 2016c].....	125
Abb. 33: Morphologische Darstellung des Anwendungsbeispiels (Technik)	126
Abb. 34: Morphologische Darstellung des Anwendungsbeispiels (Organisation)	127
Abb. 35: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Eingabe“	129
Abb. 36: Beispielhafte Auswahl von Gestaltungsmöglichkeiten.....	130
Abb. 37: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung der Systemgestaltung	131
Abb. 38: Beispielhafte Eingabe von Parameterwerten zu den Systemelementen „Transportgut“ und „Route“.....	132
Abb. 39: Beispielhafte Eingabe und Berechnung von Prozessparameterwerten	134
Abb. 40: Beispielhafte Eingabe des Tourenstartabstands	135
Abb. 41: Beispielhafte Eingabe und Berechnung der Parameterwerte zur Bewertung der Qualität	136
Abb. 42: Beispielhafte Eingabe/Auswahl der Parameterwerte/-ausprägungen zur Bewertung der Ergonomie	136
Abb. 43: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Berechnung“.....	137
Abb. 44: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Kennzahlen“	138
Abb. 45: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung von Kennzahlen	139
Abb. 46: Differenzierung der Kennzahl <i>Anzahl Transportmittel</i>	139

Abb. 47: Bereiche des Tabellenblatts „System-Kennzahlen ohne Poolung“	140
Abb. 48: Bereich des Tabellenblatts „Berechnung mit Poolung“	141
Abb. 49: Darstellung routenbezogener Kennzahlenwerte im Tabellenblatt „System-Kennzahlen mit Poolung“	141
Abb. 50: Bereiche des Tabellenblatts „Beispiele“	142
Abb. 51: Grafische Darstellung von <i>Tourenstartabstand</i> , <i>Zyklus- und Wartezeit</i> sowie <i>Nutzungsgraden</i>	144
Abb. 52: Grafische Darstellung der <i>Zykluszeitanteile</i>	144
Abb. 53: Grafische Darstellung der <i>Betriebskosten</i> und <i>Anzahl erforderlicher Mitarbeiter</i>	145
Abb. 54: Grafische Darstellung der Bewertung der physischen Belastung des Routenzugfahrers	145
Abb. 55: Struktur und Zusammenhang der Teilmodelle des Analysemodells	152
Abb. 56: Beispielhafte Darstellung von Wechselwirkungen in Routenzugsystemen in Anlehnung an GÜNTNER und KEUNTJE [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 15].....	152
Abb. 57: Beispielhaftes Kausalmodell für Routenzugsysteme (Ausschnitt)	154
Abb. 58: Beispielhafte Darstellung von Wirkungen im Rahmen der Parameteranalyse (<i>Fahrgeschwindigkeit</i> → <i>Betriebskosten</i>)	164
Abb. 59: Diagramm der Wirkintensitäten der Kennzahl <i>Betriebskosten</i> (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) in Anlehnung an SCHWARZER [SCHWARZER 2010, S. 114]167	
Abb. 60: Diagramm der Wirkintensitäten der Kennzahl <i>Betriebskosten</i> (sortiert nach Wirkintensität).....	169
Abb. 61: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Eingabeparameter)	174
Abb. 62: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Systemkonfigurationen).....	175
Abb. 63: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlen).	176
Abb. 64: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung der Kennzahlenwerte im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.....	176
Abb. 65: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Wirkintensitäten)	177
Abb. 66: Bereich „Parameteranalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“	178
Abb. 67: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahl).....	179
Abb. 68: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Eingabeparameter)	180
Abb. 69: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlenaggregation)	181
Abb. 70: Ausschnitt des Wirkungsanalyseergebnisses zur Kennzahlenaggregation für das Anwendungsbeispiel	182
Abb. 71: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlenaggregation)	183

Abbildungsverzeichnis

Abb. 72: Eingrenzung der Anzahl der relevanten Eingabeparameter für das Anwendungsbeispiel	186
Abb. 73: Numerisches Wirkungsanalyseergebnis (Kennzahlenaggregation) für das Anwendungsbeispiel	186
Abb. 74: Struktur und Zusammenhang der Teilmodelle des Optimierungsmodells	195
Abb. 75: Beispielhafte Kennzahlengewichtung mithilfe des differenzierten Paarvergleichs	211
Abb. 76: Gebräuchliche lineare Wertfunktionen nach FELDHUSEN ET AL. [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 384]	212
Abb. 77: Beispielhafte Darstellung der Entscheidungsfindung mittels Entscheidungsbaum	214
Abb. 78: Kennzahlengewichtung für das Anwendungsbeispiel.....	216
Abb. 79: Wertfunktionen der Kennzahlen für das Anwendungsbeispiel	217
Abb. 80: Beispielhafte Teilnutzwertbestimmung für die Kennzahl <i>Zykluszeit</i> (Ist- und Soll-Zustand 1).....	218
Abb. 81: Entscheidungsbaum für das Anwendungsbeispiel	220

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bezeichnungen im Zusammenhang mit Routenzugsystemen (Auszug).....	8
Tab. 2:	Eingrenzungen bei der Definition von Routenzugsystemen (Auszug).....	9
Tab. 3:	Ziele eines Routenzugsystemeinsatzes.....	11
Tab. 4:	Vorteile von Routenzugsystemen (Teil 1).....	12
Tab. 5:	Vorteile von Routenzugsystemen (Teil 2).....	13
Tab. 6:	Nachteile von Routenzugsystemen.....	14
Tab. 7:	Beispiele für realisierte Optimierungspotentiale.....	16
Tab. 8:	Eignungen von Routenzugsystemen.....	19
Tab. 9:	Vergleich existierender Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen.....	36
Tab. 10:	Anforderungen an die Modelle bei der Modellbildung.....	40
Tab. 11:	Klassifizierung von Ladungsträgern in Routenzugsystemen in Anlehnung an SCHEDLBAUER, BOPPERT und KLUG [SCHEDLBAUER 2008, S. 126; BOPPERT 2008, S. 72; KLUG 2010, S. 150].....	42
Tab. 12:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Transportmitteln in Routenzugsystemen.....	44
Tab. 13:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Schleppern.....	45
Tab. 14:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Anhängern in Routenzugsystemen....	52
Tab. 15:	Gegenüberstellung gebräuchlicher Lenksysteme für Routenzuganhänger.....	55
Tab. 16:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Be- und Entladetechnik in Routenzugsystemen.....	57
Tab. 17:	Klassifizierung der Bereitstelltechnik an Quellen und Senken in Anlehnung an JÜNEMANN ET AL. [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 147].....	62
Tab. 18:	Klassifizierung technischer Informationsträger bei der Übermittlung von Bedarfsinformationen.....	64
Tab. 19:	Klassifizierung der primären Transportaufgabe in Routenzugsystemen.....	65
Tab. 20:	Klassifizierung der Materialflusssteuerungsprinzipien und des Zentralisierungsgrades der Steuerung.....	66
Tab. 21:	Klassifizierung der Möglichkeiten zur Auslösung des Transportauftrags.....	68
Tab. 22:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Route in einem Routenzugsystem.....	69
Tab. 23:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Steuerung von Tourenstarts in Routenzugsystemen.....	74
Tab. 24:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Integration von Be- und Entladeprozessen in Routenzugsystemen.....	77
Tab. 25:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Anzahl der Ladungsträgergrößen je Route.....	83
Tab. 26:	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Anzahl der Anhängerarten je Routenzug.....	84

Tabellenverzeichnis

Tab. 27: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess.....	85
Tab. 28: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Ordnung der Ladung auf dem Routenzug.....	86
Tab. 29: Anforderungen an ein Kennzahlensystem.....	97
Tab. 30: Aufbau der Definitionsblätter in Anlehnung an SYSKA und die VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 [SYSKA 1990, S. 46 ff.; VDI 2004]	106
Tab. 31: Übersicht der Strukturkennzahlen.....	108
Tab. 32: Definitionsblatt zur Kennzahl <i>Anzahl der Routen</i>	108
Tab. 33: Übersicht der Logistikleistungskennzahlen	110
Tab. 34: Übersicht der Wirtschaftlichkeitskennzahlen.....	112
Tab. 35: Übersicht der Qualitätskennzahlen.....	113
Tab. 36: Darstellung der unter dem Begriff „Poolung“ zusammengefassten Merkmalsausprägungen (graue Markierung).....	119
Tab. 37: Eingangsgrößen des Anwendungsbeispiels gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 10]	125
Tab. 38: Farbschema, Funktionen und Kurzbeschreibungen der Tabellenblätter des Bewertungsmodells	128
Tab. 39: Makros und Funktionsumfänge im Tabellenblatt „R_X Eingabe“	129
Tab. 40: Unberücksichtigte Merkmalsausprägungen im Excel-Tool (gelbe Markierung)...	131
Tab. 41: Makros und Funktionsumfänge im Tabellenblatt „Beispiele“	142
Tab. 42: Numerische Darstellung ausgewählter Kennzahlenwerte für das Anwendungsbeispiel	143
Tab. 43: Vergleich von Kennzahlenwerten (Bewertungsmodell und VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 9 ff.].....	147
Tab. 44: Verifikation des Bewertungsmodells durch beispielhaften Grenzwertest (<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>).....	149
Tab. 45: Anforderungen an ein Wirkmodell.....	153
Tab. 46: Betrachtete Eingabeparameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse	159
Tab. 47: Variation der Fahrgeschwindigkeit für das Anwendungsbeispiel (Spannweite: 50 %)	161
Tab. 48: Wirkintensitäten der Kennzahl <i>Betriebskosten</i> bei Variation der <i>Fahrgeschwindigkeit</i> für das Anwendungsbeispiel (Spannweite: 50 %)	163
Tab. 49: Tabellarische Darstellung der Wirkintensitäten der <i>Betriebskosten</i> für das Anwendungsbeispiel	166
Tab. 50: Tabellarische Darstellung der Wirkintensitäten des Eingabeparameters <i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i> des Anwendungsbeispiels (Ausschnitt)	168
Tab. 51: Farbschema, Funktionen und Kurzbeschreibungen der Tabellenblätter des Analysemodells	173

Tab. 52: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B2:D2 des Tabellenblatts „R_X Analyse“	174
Tab. 53: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B631:E636 des Tabellenblatts „R_X Analyse“	178
Tab. 54: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B734:E739 des Tabellenblatts „R_X Analyse“	180
Tab. 55: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B902:E909 des Tabellenblatts „R_X Analyse“	181
Tab. 56: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B7:C10 des Tabellenblatts „System-Analyse“	183
Tab. 57: Optimierungsrichtungen und Gewichtungsfaktoren ausgewählter Kennzahlen	185
Tab. 58: Überprüfung der Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf Basis der Analyse	187
Tab. 59: Beurteilung von Veränderungen der Eingabeparameterwerte hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit	188
Tab. 60: Beispielhafte V&V des Analysemodells durch Erklärung von Wirkungen für das Anwendungsbeispiel (<i>Betriebskosten</i>)	191
Tab. 61: Rangfolgen der Eingabeparameter je Kennzahl für das Anwendungsbeispiel (sortiert nach aggregierter Wirkintensität)	192
Tab. 62: Mittlere Laufzeiten ausgewählter Makros des Analysemodells.....	193
Tab. 63: Übersicht potentieller Optimierungsmaßnahmen für das Anwendungsbeispiel ...	201
Tab. 64: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 1 gegenüber dem Ist-Zustand	203
Tab. 65: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 2 gegenüber dem Ist-Zustand	203
Tab. 66: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 3 gegenüber dem Ist-Zustand	204
Tab. 67: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 4 gegenüber dem Ist-Zustand	204
Tab. 68: Übersicht entscheidungsrelevanter Kennzahlenwerte der Soll-Zustände des Anwendungsbeispiels.....	205
Tab. 69: Anforderungen an ein Entscheidungsmodell	207
Tab. 70: Beispielhafte Gesamtnutzwertberechnung für den Ist- und Soll-Zustand 1	219
Tab. 71: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 5 gegenüber dem Soll-Zustand 3.	219
Tab. 72: Beispielhafter Grenzwertest der Kennzahlenwerte des Ist-Zustands für das Anwendungsbeispiel	222
Tab. 73: Vergleich der vorliegenden Arbeit mit ausgewählter Literatur und Software aus dem Bereich Produktionstechnik	227

Abkürzungsverzeichnis

AAWS	Automotive Assembly Worksheet
AHP	Analytic Hierarchy Process
AKL	Automatisches Kleinteilelager
B	Betriebskosten
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BDS	Belastungs-Dokumentations-Systems
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer-Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Design of Experiments
E	Ergonomie
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
F	Flexibilität
FIFO	First-in-First-out
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GAMS	General Algebraic Modeling System
GLT	Großladungsträger
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GNW	Gesamtnutzwert
HHT	Heben, Halten, Tragen
I	Investitionskosten
i. e. S.	im engeren Sinn
i. w. S.	im weiteren Sinn
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
JITCVRP	Just-in-Time Capacitated Vehicle Routing Problem
JITVRP	Just-in-Time Vehicle Routing Problem
KLT	Kleinladungsträger
KPI	Key Performance Indicator
KZW	Kennzahlwert
L	Logistikleistungskennzahl/Lieferservice
LIFO	Last-in-First-out

Abkürzungsverzeichnis

LKS	Logistik-Kennzahlen-System
LKW	Lastkraftwagen
LMM	Leitmerkmalmethode
LO	Logistiker
M	Materialfluss
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MLT	Multiple-Lasten-Tool
MODM	Multi-Objective Decision Making
Mrd.	Milliarde
MRP	Material Requirement Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
MS	Microsoft
MTM	Methods-Time Measurement
NLT	Normladungsträger
Nr.	Nummer
PLP	Pallet Loading Problem
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
Q	Qualitätskennzahl
R	Ressource
RCA	Feasible Route Construction Algorithm
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (früher: Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung)
RF	Routenzugfahrer
RFID	Radio Frequency Identification
ROI	Return on Investment
S	Strukturkennzahl/Sicherheit
SBO	Simulationsbasierte Optimierung
T	Tausend
TNW	Teilnutzwert
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TU	Technische Universität
UHT	Umsetzen/Halten/Tragen
VBA	Visual Basic for Applications
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
V&V	Verifikation und Validierung

W	Wirtschaftlichkeitskennzahl
WBZ	Wiederbeschaffungszeit
WI	Wirkintensität
Z	Zeit
ZS	Ziehen/Schieben

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Vor dem Hintergrund zunehmender Variantenvielfalt in vielen Branchen ist eine hochfrequente Produktionsver- und/oder -entsorgung erforderlich, um Materialien in kleinen Losgrößen auf einer begrenzten Fläche in der Produktion bereitstellen zu können [KLUG 2010, S. 275]. Für solche Transportaufgaben finden Routenzugsysteme wegen ihrer Fähigkeit zur Bündelung von Transporteinheiten zu einem Sammeltransport zunehmende Verbreitung [VDI 2016b, S. 2]. Darüber hinaus entsprechen sie dem oftmals geforderten Konzept der staplerfreien bzw. staplerarmen Fabrik mit dem Ziel, die Anzahl und Schwere von Unfällen zu reduzieren.

Ein effizienter Routenzugeinsatz ist charakterisiert durch eine hohe Logistikleistung bei möglichst geringen Kosten und gleichzeitiger Erfüllung der Qualitätsanforderungen. Dies setzt die anforderungsgerechte Planung des Routenzugsystems voraus, da bereits im Zuge der Systemfindung¹ die Bedingungen für den Betrieb determiniert werden. Die Planung von Routenzugsystemen kann in die Gestaltung (Entwicklung von Struktur und Abläufen, z. B. Auswahl der Art des Transportmittels oder des Nachschubsteuerungsverfahrens), in die Dimensionierung (Berechnung benötigter Ressourcen, z. B. Anzahl benötigter Transportmittel oder Anzahl benötigter Mitarbeiter) sowie die Disposition (Steuerung im Betrieb, z. B. Zuordnung von Transportaufträgen zu Transportmitteln) untergliedert werden (vgl. Abschnitt 3.1.1).² Der Systemgestaltung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, weil die zu entwickelnden Strukturen und Abläufe den Ressourcenbedarf und das Systemverhalten maßgeblich beeinflussen. Die Gestaltung von Routenzugsystemen erweist sich aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Gestaltungsalternativen, deren bedingter Kombinierbarkeit sowie zahlreicher Wechselwirkungen zwischen diesen Alternativen als komplexe Aufgabe [WANNER ET AL. 2012, S. 48; DROSTE, DEUSE 2011, S. 607; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 10; MARTINI 2015, S. 4; VDI 2016b, S. 3 ff.]. Zudem sind zahlreiche unternehmens- und anwendungsspezifische Einflussfaktoren und ihre Interdependenzen zu berücksichtigen.

Als Folge der zunehmenden praktischen Relevanz von Routenzugsystemen und der Notwendigkeit zur Planungsunterstützung ist die Planung solcher Systeme als Forschungsaufgabe in den Fokus zahlreicher Betrachtungen gerückt (vgl. Kapitel 1). Des Weiteren kommen unternehmensintern individuelle Verfahrensweisen zum Einsatz. Aufgrund uneinheitlicher Reihenfolgen und Schwerpunkte hinsichtlich der Bearbeitung von Planungsaufgaben sowie unterschied-

¹ Ein System ist allgemein zu verstehen als Gesamtheit von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 1].

² Die Disposition ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da der dem Bewertungsmodell zugrunde gelegte Dimensionierungsansatz statische und deterministische Eingangsdaten voraussetzt und demzufolge keine Disposition erforderlich ist (vgl. Abschnitt 6.1).

1 Einleitung

licher angewandter Verfahren unterscheiden sich die Planungsansätze jedoch nicht nur bezüglich ihrer Eignungen und Anwendungsvoraussetzungen, sondern bei gleicher Ausgangssituation unter Umständen auch hinsichtlich des Planungsergebnisses [MARTINI ET AL. 2014a, S. 54; RICHTER 2014, S. 58]. Diesbezüglich ist anzunehmen, dass die Lösungen in Anbetracht individueller Anforderungen und Zielsetzungen in der Regel nicht gleichwertig sind, was wiederum bedeutet, dass je nach Planungsansatz ein suboptimales Routenzugsystem resultiert.

Aus produktionstechnischer Sicht stellt die VDI-Richtlinie 5586 „Routenzugsysteme“ den Stand der Technik hinsichtlich der Gestaltung und Dimensionierung von Routenzugsystemen dar [VDI 2016b; VDI 2016c]. Die Richtlinie beschreibt zwar die wesentlichen Gestaltungsmöglichkeiten sowie zum Teil deren Eignungen und Anwendungsvoraussetzungen, stellt allerdings keine eindeutigen Entscheidungsregeln für die Auswahl im Zuge der Planung zur Verfügung. Überdies sind die Auswirkungen einer Gestaltungsalternativenauswahl bzw. -kombination auf das Planungsergebnis im Voraus nicht ersichtlich, weshalb in der Praxis oft mehrere Planungsvarianten entwickelt und anschließend hinsichtlich entscheidungsrelevanter Kriterien miteinander verglichen werden [SCHULTE 2009, S. 167 f.; GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 158 ff.]. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Auswahl der im relativen Vergleich besten Planungsvariante, vernachlässigt hingegen die nicht untersuchten – womöglich besseren – Lösungen.

Die Güte des Planungsergebnisses ist zudem vom Erfahrungswissen des Planers abhängig [RAPOSO ET AL. 2009, S. 147]. Je weniger Know-how diesem zur Verfügung steht, desto eher wird er einfachen Gestaltungsempfehlungen folgen [FACCIO ET AL. 2013b, S. 3014]. Problematisch ist in diesem Zuge insbesondere, dass Fachliteratur zu Planungsmethoden oftmals nicht öffentlich zugänglich ist [Günthner et al. 2012c, S. 5]. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass die Teilnehmer der Routenzugstudie von GÜNTNER ET AL. den Wunsch nach einer Richtlinie, nach Softwareunterstützung und nach Expertenaustausch geäußert haben [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 35]. Des Weiteren zeigt sich in der Studie, dass Routenzugsysteme in der Praxis oftmals bewusst überdimensioniert werden, um ausreichend zeitliche und kapazitive Reserven zu schaffen [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 35]. Der Fokus liegt demnach auf der Entwicklung funktionierender Lösungen mit hoher Transparenz für alle Beteiligten (z. B. getaktete Tourenstarts oder feste Zuordnung von Fahrzeugen und Fahrern zu Routen).

Die aufgezeigten Schwachstellen bei der Planung von Routenzugsystemen lassen vermuten, dass Routenzugsysteme oftmals suboptimal geplant und bestehende Systeme somit ineffizient betrieben werden [DREHER ET AL. 2009, S. 131 f.]. Ursächlich dafür sind sowohl methodische Unterschiede der Verfahren als auch individuelle Vorgehensweisen und Entscheidungen der Planer, weshalb anzunehmen ist, dass die Optimierung geplanter bzw. bestehender Routenzugsysteme zum Teil erhebliches Potential birgt.³

³ Optimierung wird in dieser Arbeit als Vorgang der Verbesserung verstanden (vgl. Abschnitt 3.1.1).

In der Praxis wird diesem Sachverhalt wenig Aufmerksamkeit geschenkt, was insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass der Fokus nach der Umsetzung eines geplanten Systems in der Regel auf der Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebs und der Definition von Standards liegt [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 34 f.]. Zudem stellen weder die wissenschaftliche Literatur noch die verfügbaren softwarebasierten Planungswerkzeuge aus dem produktionstechnischen Bereich systematische Verfahrensweisen zur anwendungsorientierten Optimierung von Routenzugsystemen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.2). Demgegenüber fokussieren die dem Operations Research zugehörigen Ansätze und Softwareprodukte die Methodenentwicklung mit dem Ziel der Optimierung eines bereits gestalteten Routenzugsystems. Die Übertragung der anwendungs- und verfahrensspezifischen Modelle auf individuelle Problemstellungen ist allerdings nur selten möglich und meist mit sehr großem Aufwand verbunden (vgl. Abschnitt 3.2).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Optimierung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen, trotz substanzieller Potentiale, aus anwendungsbezogener Sicht bisher kaum Beachtung findet und keine methodische Unterstützung für diese Aufgabe zur Verfügung steht.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur anwendungsorientierten Optimierung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen. Der Anwender soll demzufolge bei der Identifizierung zweckmäßiger Optimierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung gestalterischer Aspekte unterstützt werden.

Die Optimierung eines geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystems bietet dabei den Vorteil, ausgehend von einer definierten Systemkonfiguration (Ist-Zustand) nach einer besseren Systemkonfiguration (Soll-Zustand) suchen zu können. Gegenüber der Systemfindung bei der Planung ist somit nicht der gesamte Lösungsraum zu betrachten, sondern zunächst nur eine vorhandene Lösung und deren Umfeld.⁴ Infolgedessen ermöglicht die systematische Untersuchung des Ist-Zustands hinsichtlich der Auswirkungen von Veränderungen auf das Systemverhalten die Identifizierung derjenigen Stellgrößen, die zu einer Verbesserung im Sinne des Anwenders führen. Dies setzt wiederum voraus, dass dessen individuelle Zielvorstellung bei der Beurteilung des Zielerreichungsgrades hinreichend Berücksichtigung finden.

Die systematische Suche nach zweckmäßigen Optimierungspfaden erfordert demnach die Bewertung von Systemzuständen hinsichtlich unterschiedlicher Zielgrößen sowie die zielorientierte Analyse eines geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystems. Der dieser Arbeit zugrunde gelegte Lösungsansatz behandelt daher die Bewertung, Analyse und Optimierung eines Rou-

⁴ Als Lösungsraum wird in dieser Arbeit die Menge aller möglichen Lösungen zur Erfüllung der gestellten Anforderungen bezeichnet.

1 Einleitung

tenzugsystems in drei Modellen (vgl. Abschnitt 4.2). Diese dienen der Komplexitätsreduzierung durch die vereinfachte Abbildung des jeweiligen Betrachtungsgegenstands (vgl. Abschnitt 4.3). Die separate Beschreibung und Umsetzung der Modelle ist zweckmäßig, weil diese einerseits aufeinander aufbauen bzw. miteinander in Beziehung stehen und andererseits stark unterschiedliche Aufgabenumfänge aufweisen (vgl. Abschnitte 6.1, 7.1 und 8.1). Zudem besteht die Möglichkeit, die Modelle unabhängig von der entwickelten Methode im Rahmen der Planung (z. B. Bewertung oder Entscheidungsfindung) verwenden zu können.

Die detaillierte Beschreibung des Lösungsansatzes sowie die Benennung der in den Bewertungs-, Analyse- und Optimierungsmodellen verwendeten Verfahren erfolgt in Kapitel 0. Die Basis dafür bilden die existierenden Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen, die in Kapitel 1 beschrieben und zwecks Identifizierung der Forschungslücke miteinander verglichen werden. Die Berücksichtigung gestalterischer Aspekte und deren Wirkungen in den Modellen setzen voraus, dass sowohl die Gestaltungsmöglichkeiten für Routenzugsysteme bekannt sind als auch deren jeweilige Vor- und Nachteile, Anwendungsfelder und Eignungen berücksichtigt werden. In Kapitel 5 werden daher die Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche in einer Wissensbasis zusammengetragen und detailliert beschrieben. Die Kapitel 6 bis 8 beinhalten die Ausarbeitungen der drei Modelle. Da diese zum Teil softwaretechnisch im Microsoft (MS) Excel umzusetzen sind (vgl. Abschnitt 4.2), wird sowohl die Beschreibung der jeweils relevanten Software-Module wie auch die beispielhafte Anwendung der Modelle in die entsprechenden Kapitel integriert. In Kapitel 9 wird der entwickelte Lösungsansatz schließlich beurteilt sowie die Bedeutung der Arbeit für die Wissenschaft und Praxis herausgestellt.

1.3 Thematische Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Produktionslogistik, die als Teilbereich der Unternehmenslogistik u. a. den Aufgabenbereich der Materialver- und/oder -entsorgung von Produktionsstellen abdeckt [SCHULTE 2009, S. 447 f.]. Sie ist somit der innerbetrieblichen Logistik (auch Intralogistik genannt) zuzuordnen, die nach MARTIN die operativen Materialflussfunktionen Lagern, Kommissionieren, Umschlagen, Transportieren und Verpacken umfasst [MARTIN 2016, S. 9]. Problematisch ist die weitere räumliche Eingrenzung anhand der Unternehmensbereiche und -abteilungen, da Routenzugsysteme sowohl über Gebäude- als auch über Bereichs- oder Abteilungsgrenzen hinweg eingesetzt werden können.

Routenzugsysteme sind Logistiksysteme, deren Kernfunktion der innerbetriebliche Transport von Gütern⁵ ist [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 96], wobei dieser nach GLEIBNER und FEMERLING auch den Umschlag einbezieht [GLEIBNER, FEMERLING 2011, S. 8 f.]. Gemäß der DIN 30781

⁵ Gut: Eine Sache, die transportiert werden kann [DIN 1989, S. 2]. Im Folgenden wird durchgängig der Begriff „Transportgut“ verwendet. Darunter sind neben Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, Teilen und Komponenten auch Halb- und Fertigerzeugnisse sowie Leergut zu verstehen [KLAUS 2012, S. 428].

1.3 Thematische Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Teil 1 umfasst der Umschlag die Be- und Entladung von Routenzügen und ist demzufolge als wesentliche Funktion zu berücksichtigen [DIN 1994]. Zudem kann ein Routenzugsystem, je nach Gestaltung, weitere Funktionen erfüllen (z. B. Kommissionierung [DROSTE, DEUSE 2011, S. 607] oder Pufferung [BATTINI ET AL. 2013, S. 211]).

Funktionen, die über den Transport und Umschlag hinausgehen, werden in dieser Arbeit als Zusatzfunktionen betrachtet und deshalb nur insoweit behandelt, wie sie das Routenzugsystem beeinflussen. Die Kommissionierung der zu transportierenden Materialien kann beispielsweise Aufgabe des Routenzugfahrers sein und muss daher zumindest in Bezug auf den Zeitbedarf berücksichtigt werden. Die Kommissioniertechnik oder -strategien werden demgegenüber nicht behandelt. Ein weiteres Beispiel ist die Lagerung bzw. Bereitstellung von Materialien am Bereitstellort, z. B. an einer Montagelinie. Die Anforderungen an die Bereitstellung bzw. die daraus resultierende Bereitstelltechnik werden nur insofern berücksichtigt, wie sie die Be- und Entladeprozesse beeinflussen (vgl. Abschnitt 5.1.4).

Zwei weitere Eingrenzungen des Untersuchungsbereichs ergeben sich aus der Routenzugsystem-Definition (vgl. Abschnitt 2.1). Diese setzt einen Routenverkehr⁶ als Transportkonzept sowie einen flurgebundenen Unstetigförderer als Transportmittel voraus. Folglich werden der Direktverkehr sowie flurungebundene Unstetigförderer und Stetigförderer von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Abb. 1 verdeutlicht den Untersuchungsbereich durch Markierung der relevanten Themenfelder.

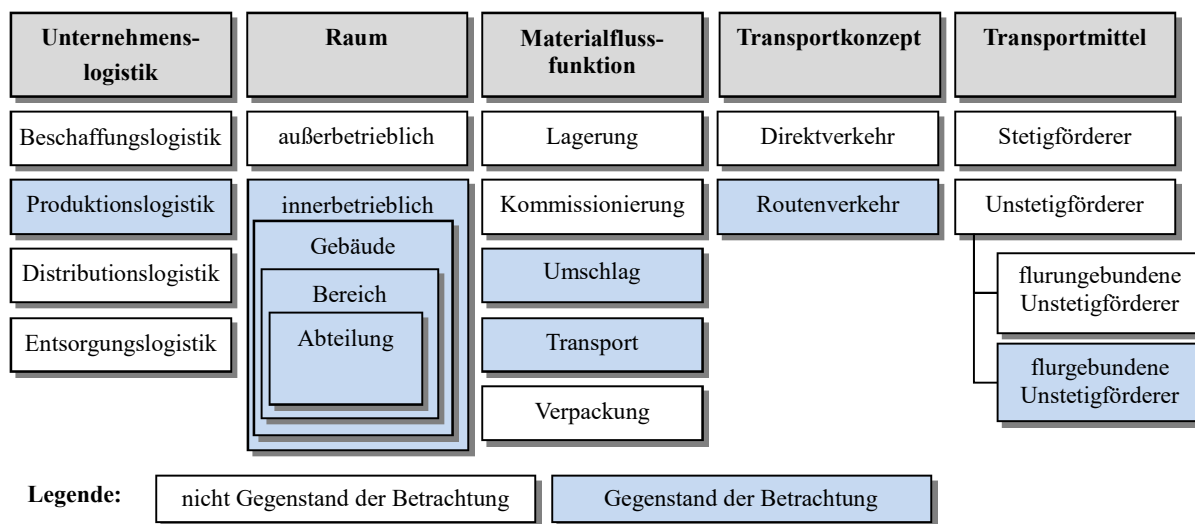


Abb. 1: Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

⁶ Grundsätzlich kann zwischen den beiden Transportarten Direktverkehr (Einzeltransport) und Routenverkehr (Bündelung mehrerer Einzeltransporte) unterschieden werden [SCHEDLBAUER 2008, S. 132].

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

2.1 Begriffe und Definitionen

Im Zusammenhang mit Routenzugsystemen existieren in der Literatur keine einheitlichen Begriffe [BRUNGS 2012, S. 18] oder Definitionen [MARTINI ET AL. 2014a, S. 50]. Die Tab. 1 zeigt Beispiele verschiedener in der Literatur verwendeter Bezeichnungen mit Angabe der jeweiligen Quellen. Im Folgenden wird die Bezeichnung Routenzugsystem verwendet, da sich diese etabliert hat [VDI 2016b, S. 2]. Davon abzugrenzen sind die Begriffe Milkrun⁷, Mizusumashi⁸ und Schleppzugsystem⁹, da es sich nach Auffassung des Autors um Unterarten von Routenzugsystemen handelt.

In der englischsprachigen Literatur ist der Begriff Milkrun weit verbreitet, wobei das innerbetriebliche Transportkonzept zum Teil als „internal“ oder „in-plant“ [CIEMNOCZOLOWSKI, BOZER 2013, S. 568; KILIC ET AL. 2012, S. 1135] Milkrun bezeichnet wird, um es vom außerbetrieblichen Milkrun unterscheiden zu können. Die Begriffe tugger/tow train (system) weisen einen engen Bezug zum Transportmittel auf und werden analog zum deutschen Begriff Schleppzugsystem verwendet.

Bei der Gegenüberstellung gängiger Definitionen fällt auf, dass die Mehrzahl der Autoren Eigenschaften nennt, die bestimmte Gestaltungsalternativen – und damit Systemkonfigurationen – ausschließen [MARTINI ET AL. 2014a, S. 50]. Des Weiteren wird ersichtlich, dass u. a. die in der Tab. 1 genannten Begriffe synonym verwendet werden [KLUG 2010, S. 185 f.; MEINHARDT, SCHMIDT 2012, S. 58; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 96]. Die Tab. 2 (S. 9) zeigt beispielhaft die in der Literatur vorgenommenen Eingrenzungen bei der Definition von Routenzugsystemen.

⁷ Der Begriff Milkrun bzw. Milkrun-System bezeichnet im deutschsprachigen Raum üblicherweise ein Konzept der Beschaffungspolitik, bei dem mehrere Lieferanten in Sammelrundtouren angefahren werden, mit dem Ziel, die Frachtauslastung auch im Teilladungsbereich zu optimieren [KLUG 2010, S. 280]. Der Name des Konzepts ist angelehnt an die Distribution von Milchflaschen in den USA. Auf einer Rundtour werden die Haushalte nacheinander angefahren, die vollen Flaschen verteilt und gleichzeitig die leeren Flaschen eingesammelt [WERNER 2013, S. 262]. Die Grundidee ist dabei, dass immer nur so viele volle Flaschen verteilt werden, wie leere Flaschen herausgestellt werden. Es handelt sich demnach um eine verbrauchsorientierte Versorgung, weshalb der Milkrun in dieser Arbeit als verbrauchsgesteuertes Routenzugsystem verstanden wird.

⁸ Unter der Bezeichnung Mizusumashi (japanisch für „Taufelkäfer“) versteht TAKEDA ein „zirkulierendes Transportsystem mit gemischter Beladung“, wobei die Tätigkeiten des Mizusumashi über die eines Transporteurs hinausgehen und beispielsweise die Übermittlung von Informationen und die Unterstützung von Werkern umfassen [TAKEDA 2008, S. 190 f.]. Sowohl TAKEDA als auch COIMBRA beziehen sich in ihren Beschreibungen auf die Funktionen des Logistikers und bezeichnen diesen als Mizusumashi [TAKEDA 2008, S. 190; COIMBRA 2013, S. 127]. Der Mizusumashi wird dabei als Routenzugsystem mit manuell zu bedienendem Transportmittel aufgefasst. ICHIKAWA setzt zudem eine verbrauchsorientierte Nachschubsteuerung mittels Kanban voraus (vgl. Abschnitte 5.1.5 und 5.2.2) [ICHIKAWA 2009, S. 2273].

⁹ Der Begriff Schleppzugsystem impliziert die Verwendung eines Schleppzugs als Transportmittel. Darunter ist die Einheit aus Schlepper und Anhänger(n) zu verstehen (vgl. auch Abschnitt 5.1.2.1) [DIN 1994, S. 2; GROTE, FELDHUSEN 2014, S. U53]. Da allerdings auch andere flurgebundene Unstetigförderer (z. B. Kommissionierstapler oder Handwagen) als Transportmittel in Routenzugsystemen denkbar sind, wird unter dem Begriff Schleppzugsystem im Folgenden ein Routenzugsystem mit Schlepper(n) und Anhänger(n) verstanden.

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

Tab. 1: Bezeichnungen im Zusammenhang mit Routenzugsystemen (Auszug)

	<i>Bezeichnung</i>	<i>Quelle</i>
Transportkonzept	Internal shuttle system	[GOLZ ET AL. 2012, S. 119]
	Milkrun(system) ¹⁰ (deutsch)	u. a. [BRUNGS 2012, S. 18; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 96; DROSTE 2013, S. 1]
	Milkrun(system) ¹¹ (englisch)	u. a. [CIEMNOCZOŁOWSKI 2007, S. 4; KILIC ET AL. 2012, S. 1135; DROSTE, DEUSE 2011, S. 606]
	Mizusumashi	u. a. [NOMURA, TAKAKUWA 2006, S. 155; MARCHWINSKI ET AL. 2008, S. 59; TAKEDA 2008, S. 191]
	Routenverkehr	u. a. [SPATH 2003, S. 60; BOPPERT 2008, S. 79; SCHEDLBAUER 2008, S. 132]
	Routenzugsystem	u. a. [MEINHARDT, SCHMIDT 2012, S. 58; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 8; VDI 2016b, S. 2]
	Schleppzug-Transport/Konzept/System	u. a. [ELSNER 1991, S. 2; KLUG 2010, S. 224; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 16]
	Tugger delivery	[PIATKOWSKI 2013, S. 1]
	Waterspider conveyance	[MARCHWINSKI ET AL. 2008, S. 60]
Transportmittel	Logistic train	[COSTA ET AL. 2008, S. 439]
	Logistikzug/-bus	[OLSCHEWSKI 2005, S. 57; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 96]
	Routenzug	u. a. [MEINHARDT ET AL. 2011, S. 512; GOLZ 2014, S. 7]
	Schleppzug	u. a. [VDI 2005, S. 1; KOETHER 2007, S. 42; SCHULTE 2009, S. 162]
	Tow train	u. a. [EMDE 2011, S. 2; BATTINI ET AL. 2013, S. 209; FACCIO ET AL. 2013b, S. 2997]
	Tugger train/truck	u. a. [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 1; HANSON, FINNSGÅRD 2012, S. 49; LIMÈRE ET AL. 2012, S. 4048]

Getaktete Routenzugsysteme mit festen Routen und mit Kanban gesteuerter Nachschubversorgung sind in der Praxis weit verbreitet, da sie den Grundprinzipien der „Schlanken Logistik“¹² wie beispielsweise Taktung, Standardisierung und Stabilisierung [KLUG 2010, S. 256] folgen und die damit verbundenen Vorteile (z. B. Transparenz und geringer Steuerungsaufwand) aufweisen. Um allerdings den Lösungsraum bei der Routenzugsystemplanung und -optimierung nicht frühzeitig einzuschränken (vgl. Kapitel 0 und 1), empfiehlt sich die Definition des Begriffs Routenzugsystem auf einem hohen Abstraktionsniveau anhand der folgenden Merkmale:

- Verwendung eines flurgebundenen Unstetigförderers
- sich wiederholende Ver- und/oder Entsorgung
- in Summe mindestens drei räumlich getrennte Quellen und Senken
- Abfahren einer Route

¹⁰ Unterschiedliche Schreibweisen möglich.

¹¹ Unterschiedliche Schreibweisen möglich.

¹² „Schlanke Logistik“ (engl.: „Lean Logistics“) bezeichnet eine verschwendungsarme Logistik mit geringen Lager- und Pufferbeständen nach dem Vorbild der „Lean Production“ im Toyota Produktionssystem [KRAFCIK 1988, S. 45].

Tab. 2: Eingrenzungen bei der Definition von Routenzugsystemen (Auszug)

<i>Kategorie</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Quelle</i>
Route	- feste Route/n (keine kurzfristigen Routenanpassungen und keine dynamische Routenplanung)	u. a. [EMDE 2011, S. 19; SCHMIDT, MEINHARDT 2012, S. 30; GYULAI ET AL. 2013, S. 117; COIMBRA 2013, S. 127; CIEMNOCZOLOWSKI, BOZER 2013, S. 568]
Steuerung Routenzugabfahrt	- vorgegebene Abfahrtszeiten für Routenzug/-züge	u. a. [NYHUIS ET AL. 2006, S. 347; SCHNEIDER 2016, S. 192; SCHMIDT, MEINHARDT 2012, S. 30]
	- Taktung der Abfahrtszeiten	u. a. [BAUDIN 2004, S. 68; SLY 2006, S. 1]
Transportmittel	- Schlepper und Anhänger	u. a. [LIMÈRE ET AL. 2012, S. 4048; BATTINI ET AL. 2013, S. 211; GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 13]
	- manuell bediente Transportmittel	u. a. [EMDE 2011, S. 19; DEWITZ, GALKA 2012, S. 5; BOZER, CIEMNOCZOLOWSKI 2013, S. 556]
Nachschub-auslösung	- verbrauchsbasierte Nachschubauslösung	u. a. [ICHIKAWA 2009, S. 2273; BRUNGS 2012, S. 46; CIEMNOCZOLOWSKI, BOZER 2013, S. 568]
Aufgaben	- Materialversorgung	u. a. [DEWITZ, GALKA 2012, S. 5; KLENK ET AL. 2015, S. 1882; GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 28; CIEMNOCZOLOWSKI, BOZER 2013, S. 568]
	- Integration Leergutprozess	u. a. [DROSTE ET AL. 2012, S. 26; EMDE, BOYSEN 2012a, S. 393]

Ein Routenzugsystem ist in dieser Arbeit definiert als „ein innerbetriebliches Transportsystem, in welchem Transporteinheiten gebündelt bewegt werden. Es besteht aus einem oder mehreren [...] [flurgebundenen Unstetigförderern] sowie einem Konzept zur sich wiederholenden Ver- und/oder Entsorgung von Quellen und Senken an in Summe mindestens drei räumlich getrennten Haltepunkten entlang einer oder mehrerer definierter Routen.“ [VDI 2016b, S. 2]

Die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 definiert den Routenzug als „Verbund aus Schlepper und Anhänger(n)“ [VDI 2016b, S. 3], weil in der Regel Schleppzüge als Transportmittel verwendet werden [Günthner et al. 2012d, S. 15]. Problematisch ist dabei allerdings, dass bestimmte gängige Fahrzeugarten, z. B. manuelle Wagen oder Horizontal-Kommissionierer, a priori ausgeschlossen werden. Deshalb ist der Routenzug in dieser Arbeit definiert als Fahrzeug, das als Transportmittel in einem Routenzugsystem dient. Darüber hinaus gelten die Begriffe und Definitionen der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 [VDI 2016b, S. 2 f.].

Ein Routenzugsystem lässt sich generell anhand von Systemelementen und -prozessen vollständig beschreiben. Ein Element ist dabei ein physischer Bestandteil des Routenzugsystems, wie z. B. das Transportmittel oder die Bereitstelltechnik. Ein Prozess ist ein Vorgang innerhalb des Routenzugsystems, wie z. B. die Beladung oder die Fahrt. Die Abb. 2 zeigt ein beispielhaftes Routenzugsystem mit einer Quelle (z. B. Supermarkt¹³), mehreren Senken (z. B. Montagestationen) und einem manuell bedienten Schleppzug als Transportmittel. Die Unterscheidung in

¹³ Unter einem Supermarkt versteht man nach KLUG [KLUG 2010, S. 277] und MEIßNER ET AL. [MEIßNER ET AL. 2012, S. 16] eine verbauortnahe Fläche mit u. a. fester Stellplatzzuordnung und begrenztem Bestand für den Umschlag von Material, um dieses auftragsbezogen und produktionssynchron am Verbauort bereitzustellen.

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

Systemelemente und -prozesse unterstützt einerseits die systematische Erarbeitung von Gestaltungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 0) und andererseits die Modellbildung im Rahmen der Bewertung, Analyse und Optimierung (vgl. Abschnitte 6.1, 7.1 und 8.1).

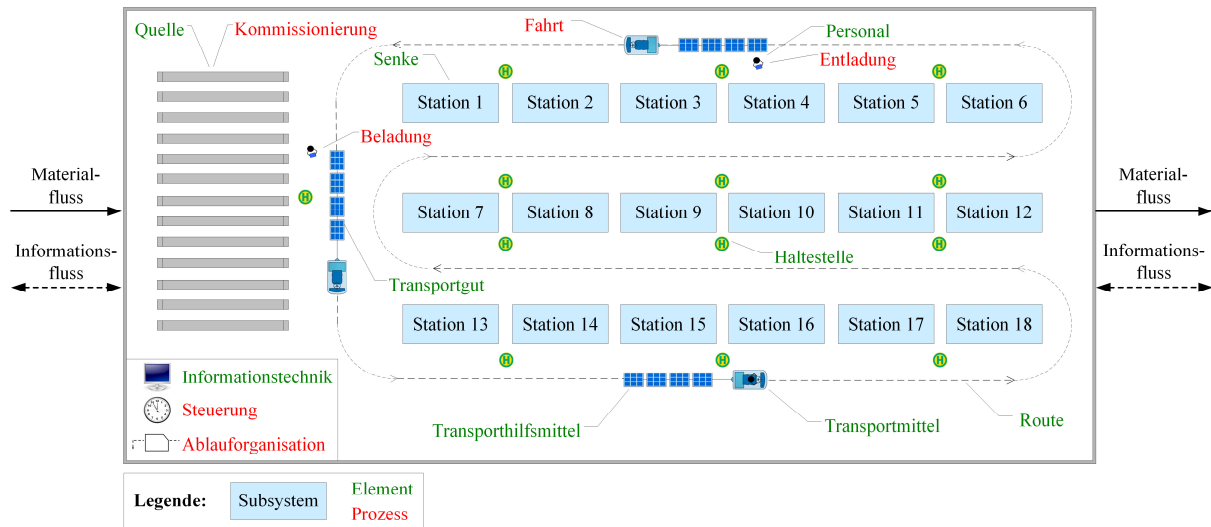


Abb. 2: Beispiel eines Routenzugsystems mit Unterscheidung von Systemelementen und -prozessen

2.2 Aufgaben und Ziele

Die zu erfüllende Aufgabe des Routenzugs bzw. des Fahrers bei fahrergeführten Routenzügen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) ist definitionsgemäß die Ver- und/oder Entsorgung von in Summe mindestens drei räumlich getrennten Quellen und Senken mit und/oder von Materialien (vgl. Abschnitt 2.1). Über die Systemgrenzen hinweg können für den Fahrer weitere Aufgaben hinzukommen, insofern, als zusätzliche Tätigkeiten auszuführen sind, die nicht dem Routenzugssystem zuzuschreiben sind. Das können beispielsweise Umpack- oder Handhabungsvorgänge, aber auch nichtlogistische Tätigkeiten wie Reinigung oder Wartung sein. Solche Aufgaben dienen in der Regel der Optimierung der Mitarbeiterauslastung bei auftretenden Wartezeiten im Betrieb.

Das übergeordnete Ziel des Routenzugsystemeinsatzes kann als Sicherstellung der Verfügbarkeit des richtigen Gutes, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden, zu den richtigen Kosten verstanden werden. Diese sogenannten „7 R der Logistik“ [PLOWMAN 1964] formulieren das Ziel auf einer abstrakten, allgemeingültigen Ebene. Die Definition von Zielen auf einer konkreteren Ebene erfordert hingegen die individuelle Zielbildung und Ordnung der Vorziehungswürdigkeit zwecks Bewertung von Entscheidungsalternativen (vgl. Abschnitt 6.2) [ADAM 1996, S. 99].

Die Tab. 3 zeigt zunächst Ziele, die mit dem Einsatz von Routenzugsystemen in logistischer, wirtschaftlicher und qualitativer Hinsicht verfolgt werden können. Da in den vorliegenden Quellen mit der Einführung von Routenzugsystemen meist die Optimierung bestehender Transportsysteme verfolgt wird, sind die Ziele bezogen auf einen Ist-Zustand formuliert. Die Angabe des Beurteilungskriteriums (z. B. Bestandskosten) erfordert entsprechend nur die Ergänzung

um die Optimierungsrichtung ausgehend vom Ist-Zustand (z. B. Reduzierung). Bei einer Neuplanung liegt hingegen kein Ist-Zustand vor, weshalb das Beurteilungskriterium in diesem Fall um die Angabe des Zielniveaus (z. B. Minimum bzw. Minimierung) ergänzt werden muss.

Tab. 3: Ziele eines Routenzugsystemeinsatzes

<i>Kategorie</i>	<i>Ziel</i>	<i>Quelle</i>
Logistische Ziele	Bündelung von Transporten	u. a. [BOPPERT 2008, S. 79; SCHNEIDER 2016, S. 191]
	Erhöhung der Versorgungsfrequenz	u. a. [DROSTE 2013, S. 65; SCHNEIDER 2016, S. 191]
	Verkleinerung der Transporteinheiten	u. a. [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 2; DEWITZ ET AL. 2012, S. 237]
	Verstetigung des Materialflusses	u. a. [KLUG 2010, S. 185; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 97]
	Reduzierung von Beständen	u. a. [DOMINGO ET AL. 2007, S. 141; DROSTE 2013, S. 65; SCHNEIDER 2016, S. 191]
	Reduzierung des Flächenbedarfs	u. a. [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26; DANIEL 2013, S. 218]
	Reduzierung der Anzahl der Transporte	u. a. [BRUNGS 2012, S. 19; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26 f.]
	Reduzierung der Anzahl benötigter Transportmittel	u. a. [BRUNGS 2012, S. 19; SCHNEIDER 2016, S. 215]
	Reduzierung der Transportstrecke	u. a. [KNOEFLER 1972, S. 662; GOLZ ET AL. 2012, S. 135]
	Reduzierung der Transportzeiten	u. a. [VAIDYANATHAN ET AL. 1999, S. 1086; RAPOSO ET AL. 2009, S. 145]
	Reduzierung des Verkehrsaufkommens	u. a. [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26 f.; CHRISTIAN 2013, S. 20]
	Erhöhung der Auslastung (Transportmittel und Mitarbeiter)	u. a. [DROSTE 2013, S. 64; DANIEL 2013, S. 218]
	Reduzierung der Wiederbeschaffungszeit	u. a. [LAZERICK 2010, S. 44; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26 f.]
Reduzierung von Transportschäden	u. a. [SCHWARZ 2007, S. 2; BAUM 2012, S. 52]	
Wirtschaftliche Ziele	Reduzierung von Bestandskosten	u. a. [DOMINGO ET AL. 2007, S. 141; DROSTE 2013, S. 65]
	Reduzierung von Betriebskosten	u. a. [KIEWITT 2011, S. 38; SATOGLU, SAHIN 2013, S. 323]
	Reduzierung von Personalkosten	u. a. [MEINHARDT, SCHMIDT 2012, S. 72; GOLZ 2014, S. 102]
	Reduzierung von Energiekosten	u. a. [TYLER 2011, S. 39; BAERWOLFF 2011, S. 167]
	Verbesserung der Produktivität	u. a. [ZIERHUT 2012, S. 20; KILIC ET AL. 2012, S. 1135]
Qualitative Ziele	Erhöhung/Gewährleistung der Versorgungssicherheit	u. a. [CIEMNOCZOLOWSKI 2007, S. 7; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26 f.]
	Erhöhung der Sicherheit / Verbesserung der Arbeitsbedingungen	u. a. [KLUG 2010, S. 275; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 27]
	Erhöhung der Reaktionsfähigkeit	[GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 26]
	Erhöhung der Transparenz	u. a. [LAUCHT ET AL. 1994, S. 43; DROSTE 2013, S. 25]
	Erhöhung des Standardisierungsgrades	u. a. [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 27; KLENK, GALKA 2013, S. 386]
	Reduzierung von Unfallrisiken	u. a. [HAUSMANN 2007b, S. 25; KLUG 2010, S. 275]

2.3 Vor- und Nachteile

Die Analyse der Literatur zum Thema Routenzugsysteme zeigt, dass einhergehend mit dem sich unterscheidenden Begriffsverständnis (vgl. Abschnitt 2.1) auch die Vor- und Nachteile divergieren. Das ist zum einen auf die Tatsache zurückzuführen, dass den Literaturquellen zumeist unterschiedlich gestaltete Routenzugsysteme zugrunde liegen. Zum anderen erfordert das Aufzeigen von Vor- und Nachteilen stets ein Vergleichssystem bzw. einen Vergleichszustand [OELTJENBRUNS 2000, S. 1]. Eine Aussage über die Vor- und Nachteile von Routenzugsystemen ist somit nur möglich, wenn sie relativ in Bezug auf das Vergleichssystem betrachtet werden. Eine differenzierte Betrachtung der Vor- und Nachteile von Routenzugsystemen unter Berücksichtigung dieses Sachverhalts ist bisher nicht veröffentlicht worden. Die Tab. 4 bis Tab. 6 zeigen die am häufigsten genannten Vor- bzw. Nachteile von Routenzugsystemen auf. Diese sind zum Zweck der Übersichtlichkeit kategorisiert und um beispielhafte Randbedingungen aus der Literatur ergänzt.

Tab. 4: Vorteile von Routenzugsystemen (Teil 1)

<i>Kategorie</i>	<i>Vorteil</i>	<i>Quelle</i>
Kombination von Randbedingungen		
Kombination mehrerer Randbedingungen (z. B. Routenverkehr mit Schlepplzug und Kleinladungsträgern (KLT) statt Direktverkehr mit Gabelstapler und Großladungsträgern (GLT))	Regelmäßige, kurzzyklische Belieferung	u. a. [KLUG 2010, S. 275; HANSON 2011, S. 98]
	Standardisierung	u. a. [KLUG 2010, S. 275; DROSTE ET AL. 2012, S. 26]
	Reduzierung von Beständen ¹⁴	u. a. [ALVAREZ ET AL. 2009, S. 957; FACCIO ET AL. 2013b, S. 2997]
	Reduzierung von Bereitstellflächen	u. a. [EMDE 2011, S. 22; KIEWITT 2011, S. 39]
	Reduzierung von Durchlaufzeiten in der Produktion (bei reduzierten Beständen)	[BRUNGS 2012, S. 3]
Ladungsträger		
Ladungsträgervergleich (z. B. Verwendung von KLT statt GLT)	Verkleinerung von Gebinden und Bereitstellungsmengen	u. a. [EMDE 2011, S. 40; GALKA ET AL. 2013b, S. 55]
	Verbesserung der Materialbereitstellung am Bereitstellort	u. a. [KLUG 2010, S. 271; HANSON, FINNSGÅRD 2012, S. 52]
	Erhöhung der Ergonomie	u. a. [EMDE 2011, S. 22; BOZER, CIEMNO CZOŁOWSKI 2013, S. 556]
	Vereinfachtes Handling bei der Be- und Entladung	u. a. [MARTIN 2016, S. 266; KÖBER 2012, S. 33]
	Keine Materialanbrüche	[BAUDIN 2004, S. 61]

¹⁴ Oftmals ist eine Bestandsreduzierung innerhalb der Systemgrenzen nicht realisierbar, da Bestände lediglich „verlagert“ werden. Beispiel: Bei der Versorgung einer Montagelinie mittels Routenverkehr aus einem dezentralen Supermarkt (KLT) im Vergleich zu einer Direktversorgung aus einem Zentrallager (GLT) können in der Regel die Bestände an den Bereitstellorten reduziert werden. Der Bestand innerhalb des Gesamtsystems bleibt aufgrund des zu installierenden Supermarktes hingegen unverändert. Gleiches gilt für den Gesamtflächenbedarf im System.

Tab. 5: Vorteile von Routenzugsystemen (Teil 2)

Kategorie	Vorteil	Quelle
Nachschubsteuerung		
Vergleich von Nachschubsteuerungsverfahren (z. B. verbrauchsgesteuert statt bedarfsgesteuert)	Verbesserung des Informationsflusses	u. a. [GORECKI, PAUTSCH 2001, S. 19; WIEGEL ET AL. 2013, S. 52]
	Reduzierung des organisatorischen Aufwands	u. a. [LAUCHT ET AL. 1994, S. 45; RICHTER 2012, S. 36]
	Integration des Leerguttransports (bei Behälter-Kanban)	u. a. [KLUG 2010, S. 225; DROSTE ET AL. 2012, S. 26]
	Reduzierung der technischen Unterstützung (bei Kanban)	[LAPPE ET AL. 2014, S. 112]
Steuerung Abfahrtzeit		
Vergleich von Steuerungsverfahren zur Auslösung von Fahrten (z. B. fester Fahrplan bzw. Taktung statt auslastungsorientiert)	Geringer Steuerungsaufwand	u. a. [KILIC ET AL. 2012, S. 1136; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]
	Transparenz	u. a. [BOPPERT 2008, S. A6; KLUG 2010, S. 275]
	Beruhigung und Verstetigung des Materialflusses	u. a. [GÜNTNER ET AL. 2012c, S. 38; DANIEL 2013, S. 217 f.]
	Vorhersagbarkeit	u. a. [BAUDIN 2004, S. 134; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 9]
	Erhöhung der Versorgungssicherheit	u. a. [DOBERMANN 2011, S. 58; STAAB ET AL. 2013, S. 167]
	Glättung von Abrufspitzen	u. a. [KLUG 2010, S. 275; WIEGEL ET AL. 2013, S. 54]
Transportart		
Transportartvergleich (z. B. Routenverkehr und Direktverkehr)	Bündelung von Transporten	u. a. [SCHMIDT, MEINHARDT 2012, S. 30; GALKA ET AL. 2013b, S. 55]
	Erhöhung der Lieferfrequenz	u. a. [DOBERMANN 2011, S. 58; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 8]
	Einsparung von Wegen	u. a. [BATTINI ET AL. 2013, S. 211; ZIERHUT 2012, S. 20]
	Vermeidung von Einzel- und Leerfahrten	u. a. [REUTER 2009, S. 64; MEINHARDT ET AL. 2011, S. 512]
	Reduzierung des Verkehrsaufkommens/Kreuzungsverkehrs	u. a. [DEWITZ, GALKA 2012, S. 5; LIEBETRUTH 2016, S. 109]
	Reduzierung des Energiebedarfs	u. a. [ANONYM 2011, S. 45; KLENK ET AL. 2013, S. 57]
	Gleichmäßige Auslastung der Produktionsversorgung	u. a. [KLUG 2010, S. 275; WIEGEL ET AL. 2013, S. 54]
Transportmittel		
Transportmittelvergleich (z. B. Schleppzug und Gabelstapler)	Hohe Transportkapazität	u. a. [ABELE, BRUNGS 2009, S. 61; KRAUSE, STRAUCH 2013, S. 314]
	Flexibilität hinsichtlich transportierbarer Ladungsträgertypen	u. a. [DOBERMANN 2011, S. 65; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 12]
	Reduzierung des innerbetrieblichen Staplerverkehrs	u. a. [ZIERHUT 2012, S. 21; KÖBER 2012, S. 35]
	Hohe Sicherheit / Senkung des Unfallrisikos	u. a. [SCHNEIDER 2016, S. 191; LIEBETRUTH 2016, S. 109]
	Reduzierung von Materialbeschädigungen durch den Transport	u. a. [HAUSMANN 2007a, S. 32; KÖBER 2012, S. 32]
	Reduzierung der Gangbreiten möglich	[KLUG 2010, S. 186]
	Verkürzung der Handhabungszeit pro Ladungsträger	[SCHNEIDER 2016, S. 191]

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

Tab. 6: Nachteile von Routenzugsystemen

Kategorie	Nachteil	Quelle
Ladungsträger		
Ladungsträgervergleich (z. B. Verwendung von KLT statt GLT)	Erhöhter Handhabungsaufwand	u. a. [SCHWARZ 2007, S. 3; SCHEDLBAUER 2008, S. 136]
	Möglicherweise Umpackvorgänge notwendig	u. a. [HANSON 2011, S. 103; HANSON, FINNSGÅRD 2012, S. 48 ff.]
	Verringerte Ergonomie durch manuelle Handhabung	u. a. [TEN HOMPEL, SCHMIDT 2007, S. 112; FISCHER 2016, S. 20]
	Womöglich Anpassung der Bereitstellung am Verbauort notwendig	[HAUSMANN 2007b, S. 27]
	Erhöhung der Lieferfrequenz erforderlich	[HANSON 2011, S. 98]
Nachschubsteuerung		
Vergleich von Nachschubsteuerungsverfahren (z. B. verbrauchsgesteuert statt bedarfsgesteuert)	Hohe Sicherheitsbestände bzw. höhere Anzahl Fahrten notwendig	u. a. [GOLZ ET AL. 2012, S. 122]
	Nicht bedarfssynchron	[RICHTER 2012, S. 26]
	Lediglich geringe Anzahl von Varianten handhabbar	[RICHTER 2012, S. 26]
	Schlechte Reaktionsfähigkeit bei Produktwechsel	[RICHTER 2012, S. 26]
Steuerung Abfahrtzeit		
Vergleich von Steuerungsverfahren zur Auslösung von Fahrten (z. B. fester Fahrplan bzw. Taktung statt auslastungsorientiert)	Geringe Auslastung	u.a. [BRUNGS 2012, S. 112 f.; GOLZ ET AL. 2012, S. 122]
	Wartezeiten	u. a. [BRUNGS 2012, S. 112 f.]
Transportart		
Transportartvergleich (z. B. Routenverkehr und Direktverkehr)	Geringere Flexibilität hinsichtlich der Fahrstrecke	[STAAB ET AL. 2013, S. 169; KRAUSE, STRAUCH 2013, S. 314]
	Hoher Planungsaufwand	u. a. [GALKA ET AL. 2013b, S. 56; WUSTMANN ET AL. 2016, S. 192]
	Abhängigkeit mehrerer Empfänger von einem Transport	[GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 183]
	Erhöhte Fehleranfälligkeit	u. a. [GÜNTNER ET AL. 2012b, S. 22; GÜNTNER ET AL. 2013b, S. 56]
	Behinderungen auf Fahrwegen möglich	u. a. [KLENK ET AL. 2013, S. 56; STAAB ET AL. 2013, S. 169]
Transportmittel		
Transportmittelvergleich (z. B. Schleppzug und Gabelstapler)	Keine Vertikalbewegung möglich	u. a. [KOETHER 2007, S. 43; BATTINI ET AL. 2013, S. 211]
	Geringe Wendigkeit	u. a. [TEN HOMPEL ET AL. 2007, S. 157; BATTINI ET AL. 2013, S. 3]
	Keine Rückwärtsfahrt möglich	u. a. [HUCKE ET AL. 2011, S. 229; EMDE 2011, S. 44]
	Überwinden von Steigungen nur bedingt möglich	[TEN HOMPEL ET AL. 2007, S. 227]
	Hohe körperliche Belastung (manuelle Ladungsträgerhandhabung)	[SCHNEIDER 2016, S. 224]

Bei der Kombination von mehreren Kategorien bzw. unterschiedlichen Gestaltungsalternativen können sich weitere Vor- und Nachteile ergeben. Beispielhaft zeigt das die Kombination eines Routenverkehrs mit Schleppzug und Kleinladungsträgern (KLT) im Vergleich zu einem Direktverkehr mit Gabelstapler und Großladungsträgern (GLT).¹⁵ In diesem Fall begünstigen sich die jeweiligen Vorteile der Gestaltungsalternativen, was positive Auswirkungen vor allem auf die Bestände und den Flächenbedarf am Bereitstellort hat. Demgegenüber steht womöglich ein erhöhter Handhabungsbedarf, wenn Materialien, die in GLT beschafft und gelagert werden, für den Transport mittels Routenzugsystem in KLT umgepackt werden müssen.

In der Literatur wird oftmals sowohl die Einsparung von Personalkosten im Speziellen [KLUG 2010, S. 186; BAERWOLFF 2011, S. 161; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 183] als auch die Reduzierung von Transportkosten im Allgemeinen [DOBERMANN 2011, S. 58; BRUNGS 2012, S. 121; SCHMIDT, MEINHARDT 2012, S. 30] als Vorteil von Routenzugsystemen postuliert. Dabei handelt es sich im Gegensatz zu den zuvor genannten Vor- und Nachteilen um monetäre Aspekte, die nach Auffassung des Autors erst nach der Gestaltung und Dimensionierung eines Routenzugsystems sowie dem wirtschaftlichen Vergleich mit (einem) alternativen Transportkonzept(en) beurteilt werden können. Da bei der Dimensionierung zusätzlich zu den Ausprägungen der qualitativen Gestaltungsmerkmale (vgl. Kapitel 0) auch die quantitativen Einflussgrößen, wie beispielsweise Durchsatzanforderungen oder Handhabungszeiten berücksichtigt werden müssen (vgl. Abschnitt 6.4), sind die Zusammenhänge komplex und die Wirkungen schwer vorhersehbar. Aus diesem Grund werden monetäre Aspekte im Folgenden als Zielgrößen bzw. Bewertungskriterien (vgl. Abschnitte 6.3.2, 7.4.2.1.3 und 8.4.2) betrachtet.

2.4 Potentiale

Im Fall der Optimierung bestehender Transportsysteme ist das Ausmaß der Verbesserung, das im Folgenden als Optimierungspotential bezeichnet wird, maßgeblich für die Beurteilung des Routenzugsystems. Während die Formulierung von Zielen aufgrund der Möglichkeit zur eindeutigen Benennung der Optimierungsrichtungen verhältnismäßig einfach ist (vgl. Abschnitt 2.2), ist die Nennung typischer Optimierungspotentiale nicht möglich, da diese vom Ausgangszustand, von den Zielgrößen und von den individuellen Randbedingungen abhängen. Aus diesem Grund zeigt die Tab. 7 lediglich Beispiele für Optimierungspotentiale, die im Rahmen der Einführung von Routenzugsystemen in der Praxis realisiert wurden.

¹⁵ Kleinladungsträger sind nicht unterfahrbare Ladungsträger, die ohne zusätzliches Transportmittel gehandhabt werden können. Großladungsträger sind unterfahrbare Ladungsträger, für deren Handhabung ein zusätzliches Transportmittel (z. B. Gabelstapler oder Handhubwagen) notwendig ist (vgl. Abschnitt 5.1.1).

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

Tab. 7: Beispiele für realisierte Optimierungspotentiale

<i>Quelle</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Kriterium und Optimierungsrichtung</i>	<i>Potential</i>
[DOMINGO ET AL. 2007]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung der Einspritzventil-Montage bei Bosch <u>Vorher:</u> 1. Optimierungsstufe nach Wertstromanalyse <u>Nachher:</u> 2. Optimierungsstufe mit zusätzlichem Routenzugsystem	Lagerbestand Bestandsreichweite im Zentrallager Durchlaufzeit Lean-Rate	↓ 7,4 % ↓ 46,5 % ↓ 25 % ↑ 33,3 %
[COIMBRA 2009]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung einer Endmontagelinie <u>Vorher:</u> Direktverkehr mit Handwagen <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit fahrergeführtem Schleppzug	Produktivität Produktion Produktivität Logistik Anzahl Produktionsausfälle 5S-Level ¹⁶	↑ 25 % ↑ 32,4 % ↓ 100 % ↑ 80 %
[MARCHWINSKI 2003]	<u>Aufgabe:</u> Materialver- und -entsorgung von Fertigungszellen bei Delphi Delco Electronics <u>Vorher:</u> Direktver- und -entsorgung mit Gabelstaplern <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit Schleppzug zur getrennten Ver- und Entsorgung	Produktivität Bestand an den Fertigungszellen Bestand Wareneingang Ausschuss-/Nacharbeitsquote	↑ 20 % ↓ 20 % ↓ 18 % ↓ 35 %
[REUTER 2009]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung der Produktion bei fischer Befestigungssysteme <u>Vorher:</u> Direktverkehr mit vier fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit einem fahrergeführten Schleppzug	Mitarbeiterwege Wiederbeschaffungszeit Anzahl Mitarbeiter Anzahl Transportmittel	↓ 80 % ↓ 66 % ↓ 40 % ↓ 75 %
[ANONYM 2011]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung der Getriebemontage mit 35 Montageplätzen beim Traktorenhersteller Fendt <u>Vorher:</u> Direktverkehr mit Frontstapler und bedarfsgesteuerter Nachschubversorgung <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit fahrergeführtem Schleppzug und Kanban-Steuerung	Zeitaufwand für Materialbereitstellung Energieverbrauch Kosten der Materialbereitstellung	↓ 65,5 % ↓ 92 % ↓ 58,5 %
[BAUM 2012]	<u>Aufgabe:</u> Materialentsorgung und Leergutbereitstellung an 50 Spritzgießmaschinen <u>Vorher:</u> Direktverkehr mit Handhubwagen <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit fahrergeführtem Schleppzug	Personalbedarf Gesamtkosten Logistik	↓ 30 % ↓ 28 %
[WIEGEL ET AL. 2013]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung von acht Produktionslinien bei der Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH <u>Vorher:</u> Direktversorgung mit Gabelstapler aus Zentrallager <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit fahrergeführtem Schleppzug aus Supermarkt	Transportmittelkapazität Versorgungsfrequenz Anzahl Fahrten Bestand an den Linien Arbeitsbelastung Logistik	↑ 100 % ↑ 87,5 % ↓ 45 % ↓ 30 % ↓ ---
[MÜLLER 2014]	<u>Aufgabe:</u> Materialversorgung einer Automobil-Endmontagelinie <u>Vorher:</u> Direktversorgung mit Gabelstapler <u>Nachher:</u> Routenverkehr mit fahrergeführtem Schleppzug	Energieverbrauch	↓ 70 %

¹⁶ Das 5S-Level beschreibt nach COIMBRA den Grad der Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Ordnung und Sauberkeit anhand einer internen Checkliste [COIMBRA 2009, S. 129].

2.5 Anwendungsvoraussetzungen und Eignungen

Anwendungsvoraussetzungen sind zu erfüllende Bedingungen, damit der Einsatz eines Routenzugsystems überhaupt möglich ist, wohingegen Eignungen den sinnvollen Einsatz eines Routenzugsystems beschreiben. Grundsätzlich gibt es nur eine geringe Anzahl von Anwendungsvoraussetzungen, die zudem überwiegend auf die Verwendung von Schleppzügen als Transportmittel begrenzt sind. Dazu zählen beispielsweise die Einschränkung auf Horizontaltransporte [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 229; MARTIN 2016, S. 243], die Vermeidung von Sackgassen [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 99], da bei Schleppzügen mit Anhängern keine Rückwärtsfahrt möglich ist, sowie die Einhaltung notwendiger Wegbreiten, Kurvenradien, Trag- und Anhängelasten [BRUNGS 2012, S. 62, 117; VDI 1990] je nach Transportgut und Transportmittel. Ein in der Literatur häufig genanntes Kriterium für die Anwendbarkeit von Routenzugsystemen ist die Akzeptanz und Unterstützung des operativen Personals [GÜNTNER ET AL. 2013b, S. 55 ff.; DANIEL 2013, S. 220] sowie deren Disziplin im Betrieb [SCHOENFELD 1972, S. 82; WEISBECK 1976, S. 334; NIEMANN 1977, S. 25]. Weitere in der Literatur als Anwendungsvoraussetzungen bezeichnete Merkmale (z. B. konstanter Verbrauch je Material) werden im Folgenden allerdings den Eignungen zugerechnet, da durch organisatorische Maßnahmen häufig die Anwendbarkeit realisiert werden kann.

Aus den Eignungen lassen sich die zweckmäßigen Anwendungsfelder für Routenzugsysteme ableiten, wobei zu beachten ist, dass die in der Literatur genannten Eignungen überwiegend qualitative Merkmalsbeschreibungen beinhalten. Eine Quantifizierung erfolgt lediglich hinsichtlich der Fahrstrecke, ab der ein Routenzug Einsatz als sinnvoll bezeichnet wird. Diese variiert von 61 m [SULE 2009, S. 315] bis 300 m [KOETHER 2007, S. 43; SCHWARZ 2007, S. 2]. Da die Zweckmäßigkeit eines Routenzugsystems allerdings von vielen Faktoren, wie z. B. der Anzahl und Lage der Bereitstellorte, der Transportkapazität usw., abhängig ist, wird hier auf die Angabe einer Untergrenze verzichtet. Der Vorteil des Routenverkehrs im Vergleich zum Direktverkehr liegt u. a. in der Einsparung von Wegen (vgl. Abschnitt 2.3) durch eine Transportbündelung, sodass tendenziell der Einsatz bei vielen Bereitstellorten und großen Entfernungen zwischen diesen als sinnvoll bezeichnet werden kann [SCHEDLBAUER 2008, S. 136; REUTER 2009, S. 63; KLUG 2010, S. 184].

Hinsichtlich der zeitlichen Struktur der anfallenden Transporte, begünstigt eine gleichbleibende Transportfrequenz sowie eine konstante Transportmenge pro Zeiteinheit¹⁷ den Einsatz eines Routenzugsystems [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 229; EMDE 2011, S. 4; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 12]. Dies trifft insbesondere auf getaktete Routenzugsysteme zu, weil hierbei die Routenzüge in regelmäßigen Abständen die Routen abfahren, sodass eine hohe kapazitive Auslastung erreicht werden kann. In Bezug auf die Transportbedarfe der einzelnen Quelle/n und Senke/n ist

¹⁷ In der Literatur wird oftmals von Verbrauchsfrequenz und konstanter Verbrauchsmenge gesprochen [BAUDIN 2004, S. 68; BRUNGS 2012, S. 111]. Da die Transportbedarfe allerdings nicht immer durch den Verbrauch von Materialien ausgelöst werden (z. B. Fertigwaretransporte), sind diese Bezeichnungen irreführend.

2 Theoretische Grundlagen zu Routenzugsystemen

es sinnvoll diejenigen mit ähnlicher Reichweite zusammenzufassen [BOPPERT 2008, S. 84; BRUNGS 2012, S. 111; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 183]. Generell sind kleine bis mittlere Transportmengen je Bereitstellort sinnvoll [BAUDIN 2004, S. 136; KLUG 2010, S. 275; STAAB ET AL. 2013, S. 167]. Bei großen Transportmengen und geringer Reichweite am Bereitstellort sollten alternative Transportsysteme verwendet werden, z. B. Direktverkehr mittels Gabelstapler [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 180].

Routenzugsysteme eignen sich insbesondere für den Transport von KLT [MARKL-GRAETZ ET AL. 2011, S. 194; BRUNGS 2012, S. 94], aber auch für den Transport von GLT und anderen Bereitstellhilfsmitteln, sofern eine manuelle Handhabung der Ladungsträger möglich ist [SCHEDLBAUER 2008, S. 132; BRUNGS 2012, S. 111; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 183]. Dies ist z. B. durch Trolleys¹⁸ realisierbar. Bei GLT-Transporten sind die Bündelungseffekte aufgrund der geringen maximalen Transportkapazität (gemessen in der Anzahl an Ladungsträgern) in der Regel geringer und die Handhabung der Ladungsträger zudem aufwendiger. Daher sind Routenzüge in diesem Fall nur bedingt geeignet [BOPPERT 2008, S. 79].


Aufgrund der Eignung für kleine Transportmengen und -einheiten ist der Einsatz für Teile mit geringen Abmessungen sinnvoller als für große, sperrige Teile [EMDE 2011, S. 12; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 180]. Die manuelle Handhabung wird des Weiteren begünstigt durch geringe Transportgewichte und damit geringe Teilegewichte. BRUNGS hebt im Speziellen die Eignung von standardisierten Schüttgutteilen (z. B. Schrauben) sowie standardisierten Kanban-Teilen (z. B. Kugellager) für einen Routenverkehr hervor. Für variantenspezifische, große Bauteile empfiehlt er hingegen eine Direktbelieferung [BRUNGS 2012, S. 81].

Die Tab. 8 stellt die in der Literatur aufgeführten tendenziellen Eignungen von Routenzugsystemen hinsichtlich der oben genannten Merkmale übersichtlich dar. Die sinnvollen Merkmalsausprägungen kommen in ihrer Kombination vor allem in der Serien- und Sortenfertigung nach dem Fließprinzip¹⁹ vor. Die Serien- und Sortenfertigung zeichnet sich durch eine hohe zu fertigende Stückzahl je Variante und eine geringe bis mittlere Variantenanzahl aus [WIENDAHL 2008, S. 39]. Typische Beispiele sind Montage- und Fertigungslinien wie sie im Automobilbau und der Elektronikindustrie vorkommen [WIENDAHL 2008, S. 40]. Damit lässt sich auch die hohe Verbreitung von Routenzugsystemen in diesen Branchen sowie die Konzentration wissenschaftlicher Arbeiten auf diese Anwendungsgebiete erklären [EMDE 2011; GÜNTNER ET AL. 2012a; DROSTE 2013].

¹⁸ Als Trolley (auch Dolly, Bodenroller, Handschiebewagen genannt) wird im Zusammenhang mit Routenzugsystemen ein fahrbarer Rahmen verstanden, auf dem Ladungsträger abgestellt werden, um auch schwere und/oder sperrige Ladungsträger manuell handhaben zu können (vgl. Abschnitt 5.1.2.2).

¹⁹ Beim Fließprinzip orientiert sich die Anordnung der Betriebsmittel an der technisch erforderlichen Arbeitsgangfolge [KLAUS 2012, S. 182].

Tab. 8: Eignungen von Routenzugsystemen

	zunehmende Eignung von Routenzugsystemen 	
Anzahl Bereitstellorte	gering	hoch
Entfernung zwischen Bereitstellorten	klein	groß
Schwankung der erforderlichen Transportfrequenzen je Route	hoch	gering
Schwankung des Transportbedarfs je Route	hoch	gering
Transportmenge je Bereitstellort	groß	klein
Ladungsträgergröße	groß	klein
Teileabmessungen	groß	klein
Teile- bzw. Ladungsträgergewichte	hoch	gering

Hinsichtlich der Art der Auslösung von Transportbedarfen (verbrauchsorientiert oder bedarfsorientiert) wird in dieser Arbeit bewusst keine Einschränkung vorgenommen. Die oben genannten Merkmalsausprägungen begünstigen zwar den Einsatz einer Verbrauchssteuerung (z. B. Kanban-Steuerung), die den Prinzipien der „Schlanken Logistik“ (vgl. Abschnitt 2.1) entsprechen, eine Aussage über die Sinnhaftigkeit bei der Bedarfssteuerung ist damit allerdings noch nicht möglich. GOLZ zeigt beispielsweise in ihrer Dissertation, dass die Bedarfssteuerung im Vergleich zur Verbrauchssteuerung, bei der Versorgung von Montagelinien im Automobilbau, eine deutlich niedrigere Anzahl Touren und Fahrer erfordert [GOLZ 2014, S. 151]. Da die zukünftigen Bedarfe je Station bei einem definierten Produktionsprogramm feststehen, kann die Planung der Transporte mit gewissem Vorlauf stattfinden, wodurch Bedarfsschwankungen ausgeglichen werden können [EMDE 2011, S. 21]. Die Bedarfssteuerung begünstigt somit nicht nur die mittelfristige, sondern auch die kurzfristige Planung eines Routenzugsystems.

3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen

Das Ziel dieses Kapitels ist es, einen systematischen Überblick über die bereits existierenden Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen zu geben, um die Forschungslücke für die vorliegende Arbeit aufzuzeigen. Die Systematisierung basiert auf Klassifizierungsmerkmalen und deren Ausprägungen, um die Zugehörigkeit der Quellen zu einem wissenschaftlichen Fachgebiet, die zentralen Inhalte und die Verfahren einander gegenüber zu stellen. Dies dient der Strukturierung des Themenfeldes und erlaubt die Identifikation von klassenspezifischen Defiziten existierender Ansätze. Außerdem ist im Folgenden die Formulierung von Anforderungen an den Lösungsansatz und die Modellierung möglich.

3.1 Klassifizierungsmerkmale

3.1.1 Hauptfunktion

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der im Folgenden beschriebenen Ansätze ist deren inhaltliche Fokussierung auf eine oder mehrere der Funktionen Planung, Bewertung und Optimierung.

Nach ADAM sind unter **Planung** „alle Maßnahmen und Überlegungen zu verstehen, durch die es möglich wird, aus einer Anzahl von Alternativen zur Lösung eines Problems [...] die im Hinblick auf ein Ziel günstigste Alternative herauszufinden“ [ADAM 1996, S. 3]. Dieses Begriffsverständnis ist insofern relevant für diese Arbeit, als Routenzugsysteme in verschiedene Elemente und Prozesse unterteilbar sind (vgl. Abschnitt 2.1), die wiederum viele unterschiedliche technische und organisatorische Gestaltungsmöglichkeiten zulassen (vgl. Kapitel 0) [MARTINI ET AL. 2014a, S. 50]. Die Auswahl von Gestaltungsalternativen definiert im ersten Schritt der Planung (**Gestaltung**) die grundlegende Struktur (z. B. Fahrzeugtechnik oder Ladungsträgerart) und die Abläufe (z. B. Art der Bedarfsmeldung oder Fahrpläne) eines Routenzugsystems. Gegenstand der anschließenden **Dimensionierung** ist es, die zur Erfüllung der Transportaufgabe notwendigen Ressourcen (z. B. Anzahl der erforderlichen Routenzüge oder Mitarbeiter) auf Basis der Eingangsgrößen, die sich aus den Randbedingungen und der Gestaltung ergeben, rechnerisch zu bestimmen [VDI 2016c, S. 6]. Inhalt der **Disposition**, als dem dritten Planungsschritt, ist die Zuordnung von Transportaufträgen aus einem Auftragspool zu den Routenzügen sowie wiederum der Routenzüge zu den einzelnen Routen innerhalb eines Wegenetzes. Die Disposition lässt sich weiterhin klassifizieren in die statische und die dynamische Disposition. In der Reinform des erstgenannten Falles ist die Zuordnung von Routenzügen zu Routen fix und es gibt verbindlich festgelegte Routen mit zugehörigen Bereitstellorten sowie vorgegebene, unveränderliche Abfahrtszeitpunkte. Im zweiten Fall, der dynamischen Disposition, gibt es terminierte Transportbedarfe mit definierten Zielorten und eine vorgegebene

Menge von Routenzügen. Sowohl die Zuordnung von Aufträgen zu Routenzügen wie auch die Zuordnung von Routenzügen zu Routen sind variabel und werden rollierend festgelegt.

Die **Bewertung** dient der Bestimmung des Wertes von Alternativen und trifft damit eine Aussage darüber, in welchem Umfang eine Alternative die festgelegten Ziele erfüllt [REFA 1990, S. 344]. Dabei sind Ziele „Maßstäbe, an denen zukünftiges Handeln (Ergänzung des Autors: auch ein zukünftiger Zustand) gemessen werden kann“ [MAG 1999, S. 16]. Sie sind erforderlich, um Gestaltungsalternativen bewerten und vergleichen sowie anschließend begründete Entscheidungen treffen zu können [ADAM 1996, S. 99; ARNDT 2010, S. 115]. Die Bewertung steht somit in direktem Zusammenhang mit der Planung [KLEIN, SCHOLL 2004; ADAM 1996]. Sie findet dabei auf unterschiedlichen Ebenen Anwendung. So erfolgt beispielsweise bei der Planung von Routenzugsystemen sowohl die Bewertung einzelner Gestaltungsalternativen als auch die Bewertung des Gesamtsystems als Bündel aus mehreren Gestaltungsalternativen.

Der Begriff **Optimierung** im mathematischen Sinne beschreibt die Bestimmung derjenigen Lösung, die die spezifizierte Zielsetzung unter Berücksichtigung der Restriktionen am ehesten erfüllt [PAPAGEÖRGIU ET AL. 2015, S. 1]. Diese Sichtweise zielt auf das Finden der besten Lösung ab [HILLIER, LIEBERMAN 2001, S. 14]. Dieses globale Optimum ist allerdings in realen Systemen aufgrund der hohen Komplexität oftmals nur theoretisch erreichbar [MERTENS 1999, S. 14-11]. Ursächlich für die außerordentliche Komplexität von Routenzugsystemen ist die große Zahl der Gestaltungsalternativen, deren bedingte Kombinierbarkeit sowie die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen diesen Alternativen (vgl. Abschnitt 1.1). Aufgrund dieser Problematik wird Optimierung im Folgenden als Vorgang der Verbesserung verstanden (angelehnt an den lateinischen Begriff „optimae“ (besser)) [DITTES 2015, S. 1]. Dieser Vorgang beschreibt die Veränderung eines Zustands hin zu einem verbesserten Zustand. Daher kann die Optimierung nach diesem Begriffsverständnis schrittweise erfolgen und beendet werden, wenn ein Zustand mit befriedigender Zielerreichung vorliegt [HILLIER, LIEBERMAN 2001, S. 14]. Die Vorgehensweise bei der Optimierung ist abhängig vom jeweiligen Verfahren (vgl. Abschnitt 3.1.3) und daher nicht allgemeingültig formulierbar.

3.1.2 Einbeziehung von Transportbedarfen

Die Ansätze lassen sich des Weiteren anhand der Annahme über die zeitliche Verteilung der Transportbedarfe unterscheiden [Wiegel et al. 2013, S. 52]. Eine Verfahrensklasse geht bei der Berechnung der erforderlichen Ressourcen von konstanten, aus aggregierten Transportbedarfen je Zeiteinheit berechneten, gleichverteilten Durchschnittswerten aus. Der durchschnittliche Transportbedarf wird in diesen Fällen beispielsweise aus den durchschnittlichen Verbräuchen je Artikel und Zeiteinheit (z. B. Schicht, Stunde oder Minute) sowie den Ladungsträgerfüllmengen berechnet [BRUNGS 2012, S. 132; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 119; DROSTE 2013, S. 115]. Wann genau die Transportbedarfe im Zeitverlauf tatsächlich anfallen, ist im Voraus nicht bekannt bzw. wird nicht berücksichtigt. Die zweite Verfahrensklasse berücksichtigt demgegenüber die zeitliche (und mengenmäßige) Verteilung der Transportbedarfe.

3.1.3 Verfahren

Die in den untersuchten Ansätzen angewandten Verfahren umfassen gestalterische Verfahren, Berechnungsvorschriften, mathematische Optimierungsverfahren, Simulationen und Bewertungsverfahren. Dabei können jeweils mehrere Verfahren zum Einsatz kommen (z. B. gestalterische Verfahren und Berechnungsvorschrift).

Die **gestalterischen Verfahren** sind regelbasiert und unterstützen die Auswahl von Alternativen im Zuge des Planungsschrittes Gestaltung. Die einfachste Form einer Gestaltungsregel ist die **Empfehlung**, die dem Planer unter definierten Umständen ein bestimmtes Verhalten nahelegt. Die **Wissensbasis** formalisiert explizites Wissen in Form von beispielsweise Empfehlungen, Ideen oder Problemlösungen in einer Wissensdatenbank, die im Sinne eines Expertensystems problemspezifisches Wissen enthält [WEBER 2017].

Berechnungsvorschriften bestehen aus mathematischen Formeln, die zueinander in Beziehung stehen und mithilfe von mathematischen Operatoren schrittweise berechnet werden.

Im Gegensatz dazu basieren **mathematische Optimierungsverfahren** auf der Formulierung eines mathematischen Modells, aus dem die Lösung durch geeignete **Algorithmen** oder **Heuristiken** abgeleitet wird. Exakte Verfahren garantieren dabei das Auffinden des globalen Optimums, wohingegen heuristische Verfahren Näherungs- und Prioritätsregeln verwenden, um möglichst gute Lösungen bei geringem Rechen- und Zeitaufwand zu finden.²⁰ **Graphentheoretische Verfahren** basieren auf der Modellierung mithilfe von Graphen, bestehend aus einer Menge von Knoten und Kanten, die zueinander in Beziehung stehen [HÄSSIG 1979, S. 9]. **Natural analoge Optimierungsverfahren** adaptieren die Vorgehensweise von biologischen Vorbildern, um in kurzer Zeit akzeptable Lösungen zu finden [KLÜVER ET AL. 2012, S. 69]. Diese Verfahren gehören zu den metaheuristischen Optimierungsverfahren, d. h. deren Anwendung ist im Gegensatz zu den problemspezifischen Heuristiken bei beliebigen Problemen möglich [LÜBBECKE 2017].

Die **Simulation** ist ein „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI 2014, S. 16]. Sie dient damit der Untersuchung des zeitlichen Ablaufverhaltens komplexer Systeme. In der Produktion und Logistik finden häufig diskrete Simulationen (ereignisgesteuert) Anwendung, die davon ausgehen, dass sich der Modellzustand durch Ereignisse zu diskreten Zeitpunkten ändert [MATTERN, MEHL 1989, S. 201].

Bewertungsverfahren umfassen Werkzeuge, um den Wert einer Alternative bestimmen zu können. Der **Kriterienkatalog** ist eine Sammlung mit Fragen (Check-Liste) bezogen auf eine Thematik, die es dem versierten Anwender erlaubt eine diese Thematik betreffende Alternative

²⁰ Weiterführende Informationen zum Thema mathematische Optimierung finden sich u. a. in [ZIMMERMANN, STACHE 2001; HILLIER, LIEBERMAN 2001; ELLINGER ET AL. 2001].

qualitativ beurteilen oder mit anderen Alternativen vergleichen zu können. **Kennzahlen** fassen quantitative Informationen reproduzierbar zusammen und ermöglichen den Vergleich von Alternativen und Aussagen über deren Güte. Die systematische Verknüpfung von einzelnen Kennzahlen mit dem Ziel, mehrere Kennzahlen zu einer Spitzenkennzahl zu aggregieren, wird als Kennzahlensystem bezeichnet [WEBER 2016]. **Sensitivitätsanalysen** dienen in diesem Zusammenhang der Überprüfung von Kennzahlenwerten hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Veränderungen von Eingangsparameterwerten [MÜLLER-STEWENS 2017]. Die **multikriteriellen Bewertungsverfahren** bilden in der Regel Gesamtnutzwerte für Alternativen, wenn nicht alle quantitativen Zielgrößen in der gleichen Einheit vorliegen (z. B. technische und wirtschaftliche Kriterien) [REFA 1990, S. 100 f.]. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt in der Regel durch die gängigen Verfahren der **Investitionsrechnung**, deren Aufgabe es ist, „die finanziellen Wirkungen einer geplanten Investition zu prognostizieren und die dabei gewonnenen monetären Daten so zu verdichten, dass eine zielkonforme Investitionsentscheidung getroffen werden kann“ [WÖHE, DÖRING 2013, S. 479].²¹

3.2 Beschreibung existierender Ansätze

Die in der Literatur zu findenden Ansätze lassen sich in der Regel den Bereichen der Produktionstechnik oder des Operations Research zuordnen. Die kommerziellen, routenzugspezifischen Softwareprodukte werden separat beschrieben.²² Die Beschreibung der Quellen erfolgt chronologisch gemäß ihrem Veröffentlichungsjahr, wobei zusammengehörige Quellen (z. B. Zeitschriftenaufsatz und Dissertation) in einem Absatz behandelt werden.

3.2.1 Literatur im Bereich der Produktionstechnik

HARRIS ET AL. geben in ihrem Leitfaden Empfehlungen zur Gestaltung und Dimensionierung eines getakteten Routenzugsystems zur Materialversorgung aus einem zentralen Supermarkt [HARRIS ET AL. 2003]. Der Fokus liegt dabei auf der Umsetzung eines „schlanken“ Materialflusses durch die Verwendung einer verbrauchsorientierten Steuerung. Für ein Fallbeispiel gestalten die Autoren zunächst die Route nach vorgegebenem Takt und dimensionieren anschließend das Routenzugsystem basierend auf durchschnittlichen Verbrauchsraten der Bereitstellorte. Abschließend geben sie Empfehlungen für die Umsetzung und den Betrieb von Routenzugsystemen.

COSTA ET AL. verwenden die Simulation (Arena) als Hilfsmittel bei der Planung eines getakteten Routenzugsystems zur Materialversorgung von zehn Produktionslinien in einem Unternehmen der Elektronik-Branche [COSTA ET AL. 2008]. Sie untersuchen vier selbstgewählte Szenarien,

²¹ Aufgrund der Vielzahl der Verfahren wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen [WÖHE, DÖRING 2013, S. 471 ff.; BECKER 2013, S. 41 ff.; ZANTOW, DINAUER 2011, S. 425 ff.].

²² Dem Autor sind unternehmensinterne Vorgehensweisen der Planung, Bewertung und Optimierung aus Projekten und Abschlussarbeiten bekannt. Da diese allerdings nicht öffentlich zugänglich und mit Sperrvermerken versehen sind, bleiben sie im Folgenden unberücksichtigt.

die sich hinsichtlich der verwendeten Routen unterscheiden. Die wesentlichen Zielgrößen sind die Anzahl der benötigten Ressourcen (Mitarbeiter, Routenzüge und IT) sowie deren Auslastungen.

In ihrem Artikel zur Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung mittels Routenzugsystem stellen ABELE und BRUNGS die grundlegenden Schritte zur Berechnung der erforderlichen Personalkapazität in einem Routenzugsystem dar [ABELE, BRUNGS 2009]. Die qualitative Optimierung des Routenzugsystems umfasst vier Stufen, wobei die Potentiale jeweils durch die Veränderung des Produktionskonzepts und damit der Randbedingungen entstehen. Beginnend bei der Werkstattfertigung erfolgt die Optimierung bis hin zur Direktbelieferung durch den Lieferanten.

RAPOSO ET AL. beschreiben in ihrem Artikel die Planung und Simulation eines Routenzugsystems im Qimonda-Werk in Porto (Portugal) [RAPOSO ET AL. 2009]. Im ersten Schritt erfolgt die Gestaltung und Dimensionierung des Routenzugsystems auf der Basis der vorliegenden Informationen (z. B. Art und Menge des zu transportierenden Materials). Im zweiten Schritt werden unterschiedliche Systemkonfigurationen simuliert (Arena) und eine Sensitivitätsanalyse bestimmter Einflussfaktoren (z. B. Fahrgeschwindigkeit oder Tourenstartabstand) durchgeführt.

DROSTE und DEUSE beschreiben in ihrem Artikel einen Modellierungsansatz zur Optimierung der Materialbereitstellung durch getaktete Routenzugsysteme [DROSTE, DEUSE 2011]. Eingangsgrößen sind unternehmens-, material- und bereitstellungsspezifische Parameter. Die Dimensionierung des Routenzugsystems erfolgt hinsichtlich der Kriterien Zeit, Kapazität und Ergonomie unter Verwendung der Systeme vorbestimmter Zeiten (hier: Methods-Time Measurement (MTM)²³), des Palettenbeladungsproblems (PLP) und des Multiple-Lasten-Tools (MLT). Das Ergebnis der Planung ist die optimale Zykluszeit. In seiner Dissertation nutzt DROSTE dieses parameterbasierte Modell zur Planung von getakteten Routenzugsystemen [DROSTE 2013]. Das Planungsvorgehen umfasst im ersten Schritt die Gestaltung der vier Elemente Quelle, Transport, Senke und Steuerung. Im zweiten Schritt werden die Auslastungen hinsichtlich der Kriterien Zeit, Kapazität und Ergonomie für das gestaltete Routenzugsystem bestimmt (Dimensionierung) und anhand dieser Bewertungskennzahlen ein Betriebsbereich mit realisierbaren Tourenstartabständen angegeben. DROSTE benennt im Zuge der Gestaltung als Entscheidungshilfe wesentliche Einflussgrößen, die auf die Zielgrößen wirken.

Der Planungsansatz von MEINHARDT und SCHMIDT fußt auf einem ausgestalteten Routenzugsystem (gegebene Routen, Abläufe, Prozesszeiten) und umfasst im Wesentlichen eine Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der Anzahl der notwendigen Fahrzeuge [MEINHARDT, SCHMIDT 2012]. Dies erfolgt auf der Basis der Bedarfe je Periode, der Routenzugkapazität, der

²³ Eine Beschreibung der Grundlagen des MTM-Verfahrens findet sich u. a. in [ZÜLCH 1999, S. 12-106 ff.].

3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen

Routenfrequenz und der Zykluszeit. Weiterhin werden der kapazitive und der zeitliche Nutzungsgrad als Bewertungskennzahlen bestimmt und simulativ die Anzahl der Pufferplätze je Bereitstellort ermittelt.

Gegenstand der Masterarbeit von KRAMPS ist die Entwicklung eines Planungskonzepts zur parameterbasierten Zeitermittlung von getakteten Routenzugsystemen [KRAMPS 2012]. Der Fokus liegt auf der Dimensionierung mit dem Ziel, für unterschiedliche Taktzeiten die resultierenden Zykluszeiten und Auslastungen zu berechnen. Dabei werden Transport- und Handhabungsprozesse unterschieden und in ablaufspezifische Prozessbausteine zerlegt. Die Ermittlung der jeweiligen Zeitwerte basiert auf der Zeitdatenermittlungsmethode MTM. Die Umsetzung des Planungsmodells erfolgt in MS Excel.

WANNER ET AL. berichten in ihrem Artikel über den Einsatz einer Simulation (Plant Simulation) bei der Planung von Routenzugsystemen [WANNER ET AL. 2012]. Aufbauend auf den Analyseergebnissen (z. B. Transport- und Entfernungsmatrix) erfolgt die Konzeptionierung des Routenzugsystems (Gestaltung). Mittels Testläufen erfolgt eine Bewertung der Transportrouten, wobei vorgegebene Parameter vom Planer manipuliert werden können (z. B. Kapazitäten oder Bedarfe). Zielgrößen sind u. a. Servicegrade, Zykluszeiten und Auslastungen.

In seiner Dissertation stellt BRUNGS eine zehnstufige Systematik zur Planung von manuellen, getakteten Routenzugsystemen vor [BRUNGS 2012, S. 103 ff.]. Die ersten drei Schritte dienen der Voruntersuchung. Die Schritte vier bis sechs umfassen die Konzeptplanung (Gestaltung) und enthalten Entscheidungshilfen zur Auswahl von Varianten für die vier Teilsysteme Kommissionierung, Fördermittel, Bereitstellung und Steuerung. Die Schritte sieben bis zehn dienen der Festlegung der Aufgabenplanung (Dimensionierung und u. a. anschließende Gestaltung des Steuerungssystems) sowie der Erstellung von Standards und Formulierung von Kennzahlen zum Zweck der Prozessüberwachung.

Die Routenzugstudie von GÜNTNER ET AL. beschreibt den Stand der Technik und die Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 29 ff.]. Bezüglich der Planung werden die grundsätzlichen Planungsschritte und die Vorgehensweise bis hin zur Umsetzung von Routenzugsystemen in 16 Unternehmen auf abstrakter Ebene dargestellt. Die Autoren zeigen des Weiteren die in den Planungsschritten zur Anwendung kommenden Methoden und Werkzeuge der Unternehmen auf, ohne im Detail auf die Ansätze und Ergebnisse einzugehen.

Das von WIEGEL ET AL. entwickelte Simulationsmodell dient der Planung und Optimierung von getakteten Routenzugsystemen [WIEGEL ET AL. 2013]. Eingangsgrößen sind das Layout sowie das ausgelegte Routenzugsystem. Durch inkrementelle Änderungen der Eingangsgrößen (Taktzeit, Routenzugkapazität u. a.) erfolgt die Optimierung der Zielgrößen (Anzahl der Transporte, Auslastung der Routenzüge, Bestandshöhe). Abschließend wird die Zielerreichung überprüft und werden ggf. Umgestaltungen vorgenommen.

Der Planungsleitfaden von GÜNTNER ET AL. behandelt die Planungsfelder der Gestaltung und der Dimensionierung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 96 ff.]. Im ersten Schritt erfolgt die Auswahl von Gestaltungsalternativen, basierend auf Beschreibungen und Entscheidungshilfen. Darauf aufbauend schließt sich im zweiten Schritt die Berechnung der erforderlichen Ressourcen mithilfe einfacher Berechnungsvorschriften an. Hierbei kann alternativ entweder von den Routen oder der Taktung ausgegangen werden. Die jeweilig andere Größe wird dann durch das Verfahren bestimmt.

KRAUSE ET AL. stellen in ihrem Konferenzbeitrag einen methodischen Ansatz zur ganzheitlichen Planung von Routenzugsystemen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses im Automobilbau vor, wobei der Fokus auf der Systemgestaltung liegt [KRAUSE ET AL. 2014]. Der Methode liegt ein heuristisches Entscheidungsmodell zugrunde, das für sieben Planungsfelder entsprechende Handlungsalternativen zur Verfügung stellt. Diese werden jeweils bezüglich der Logistikeffizienz bewertet und die beste Lösung ausgewählt. In zwei weiteren Konferenzbeiträgen greifen KRAUSE ET AL. insbesondere die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit als Bewertungskriterien von Routenzugsystemen auf [KRAUSE ET AL. 2015; KRAUSE ET AL. 2016]. Deren Verbesserung durch Änderung von Gestaltungselementen dient der Effizienzerhöhung, die aus der Bestimmung des optimalen Flexibilitätskorridors bzw. der Gestaltung der Wandlungsfähigkeit resultiert.

Die VDI-Richtlinie 5586 beschreibt im Blatt 1 „Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele“ u. a. die grundlegenden technischen und organisatorischen Gestaltungsalternativen von Routenzugsystemen und nennt deren Vor- und Nachteile sowie sinnvolle Anwendungsfelder [VDI 2016b]. Des Weiteren zeigen fünf Beispiele Lösungen aus dem Praxiseinsatz von Routenzugsystemen auf, die dem Planer als Anregungen zur Lösung eigener Problemstellungen dienen. Im Blatt 2 „Planung und Dimensionierung“ werden zunächst die grundlegenden Aspekte der Routenzugsystemplanung erläutert und Gestaltungsfelder benannt [VDI 2016c]. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Dimensionierung von Routenzugsystemen gemäß dem definierten Grundmodell (z. B. Versorgungsprozess, eine Route und feste Tourenstartabstände) detailliert beschrieben und anhand eines Beispiels verdeutlicht. Für dieses werden abschließend Ergebnis-Kennzahlen für verschiedene Tourenstartabstände numerisch und grafisch dargelegt.

3.2.2 Literatur im Bereich des Operations Research

ELSNER entwickelt in seiner Dissertation ein Modell zur strategischen Routenplanung für Routenzugsysteme auf der Basis einer statischen Amortisationsrechnung [ELSNER 1991]. Die Besonderheit des Modells liegt in der Berücksichtigung von Mehrfachanfahrten und der depotfreien Auslieferung. Zur exakten Lösung „kleiner“ Problem instanzen empfiehlt ELSNER ein Branch-and-Bound-Verfahren. Des Weiteren konzipiert er ein kombiniertes Verfahren, bestehend aus Branch-and-Bound und einer heuristischen Mutations- und Selektionsstrategie, um auch große Problem instanzen mit vertretbarem Aufwand lösen zu können.

3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen

Der Artikel von VAIDYANATHAN ET AL. behandelt die Routen- und Tourenplanung zur Optimierung des Routenzugeinsatzes bei der Materialversorgung nach dem Just-in-Time-Konzept²⁴ [VAIDYANATHAN ET AL. 1999]. Die Autoren verwenden dazu ein JITCVRP-Modell²⁵ unter Berücksichtigung nichtlinearer Kapazitätsgrenzen (Fahrzeuge und Pufferbestände). Das zweistufige Lösungsverfahren nutzt das Verfahren des besten Nachfolgers²⁶ (modifiziert) zur Bestimmung einer Ausgangslösung, woraufhin eine 3-Opt-Heuristik²⁷ die Lösung verbessert. Das Ziel ist die Maximierung der Routenzugauslastung bei gleichzeitiger Minimierung der Umlaufbestände.

In seiner Dissertation entwickelt CIEMNOCZOLOWSKI zunächst ein Modell zur Bewertung der Leistung von Routenzugsystemen [CIEMNOCZOLOWSKI 2007]. Dies geschieht mittels eines Sicherheitsfaktors zur Wahrung der Versorgung und der Bestimmung der notwendigen Kanban-Anzahl bei im Zeitverlauf ungleichmäßigen, aber sich wiederholenden Transportbedarfen. Im zweiten Schritt formuliert er ein gemischt-ganzzahliges Programm zur Layoutplanung unter Berücksichtigung der Zuordnung von Arbeitsstationen zu Routen. Die in der Dissertation vorgestellten Methoden zur Berechnung der Systemstabilität und Verteilung der Transportbedarfe sowie zur Bestimmung der Kanban-Anzahl werden in zwei Artikeln erneut aufgegriffen und behandelt [BOZER, CIEMNOCZOLOWSKI 2013; CIEMNOCZOLOWSKI, BOZER 2013].

In seiner Präsentation zur Routenoptimierung in Routenzugsystemen stellt SLY eine Methode zur systematischen Bestimmung von Routen bei schwankenden Transportbedarfen vor [SLY 2008]. Der Ansatz basiert auf dem automatischen Export von Daten aus einem CAD-Layout und einer MS Excel-Materialverbrauchsliste. Die Berechnung der Routen erfolgt mithilfe eines nicht spezifizierten shortest-path-Algorithmus²⁸ und dem Verfahren Branch-and-Bound unter Einbeziehung der Möglichkeit zur Routensplittung. Die Zielgröße ist die Anzahl der benötigten Routenzugfahrer. Bewertungskennzahlen werden im Anschluss an die Optimierung in einem Report grafisch und numerisch zur Verfügung gestellt.

²⁴ Just-in-Time (kurz: JIT) bedeutet, dass das benötigte Material genau zur rechten Zeit und in der richtigen Menge bereitgestellt wird. Das Ziel des JIT-Konzepts ist die Reduzierung der Umlaufbestände in der Produktion [OHNO 2009, S. 35]. Just-in-Sequence (kurz: JIS) bedeutet, dass das benötigte Material zusätzlich in der benötigten Reihenfolge bereitgestellt wird.

²⁵ Just-in-Time Capacitated Vehicle Routing Problem (JITCVRP) bezeichnet das Problem der Routen- und Tourenplanung innerhalb einer nach dem JIT-Konzept gesteuerten Produktion unter Berücksichtigung kapazitiver Restriktionen der Transportmittel.

²⁶ Das Verfahren des besten Nachfolgers beginnt die Tourenbildung mit einem beliebigen Ort. In jeder Iteration fügt man der Tour denjenigen noch nicht in ihr befindlichen Ort hinzu, der zu dem in der vorherigen Iteration hinzugefügten Ort die geringste Entfernung besitzt [DOMSCHKE, DREXL 2005, S. 143 f.].

²⁷ Die k-Opt-Heuristik verbessert eine bereits bestehende Lösung eines Routen- und Tourenplanungsproblems durch Austausch von k Orten einer bestehenden Tour gegen k andere Orte [DOMSCHKE, DREXL 2005, S. 145].

²⁸ Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Weges in einem Graphen.

Die kumulative Dissertation von EMDE behandelt die Routenzugplanung im Rahmen der Materialversorgung von Montagelinien in der Automobilindustrie [EMDE 2011]. Die Planung umfasst die Supermarktanordnung, die Routendefinition, die Fahrplanbestimmung (Tourenplanung) und die Festlegung der Beladungsreihenfolge, wobei die Routen- und die Fahrplanoptimierung aufgrund ihrer Abhängigkeiten simultan gelöst werden. EMDE verwendet für die Lösung der Optimierungsprobleme die dynamische Programmierung (mit ungleichmäßigen, aber sich wiederholenden Transportbedarfen) und zeigt die Auswirkungen von Parameterwertveränderungen (z. B. Anzahl Supermärkte oder Anzahl Routenzüge) auf den Zielfunktionswert auf.²⁹

GOLZ ET AL. beschreiben in ihrem Artikel eine zweistufige Heuristik (mit Konstruktions- und Verbesserungsverfahren) zur Routen- und Tourenplanung im Fall der Materialbereitstellung an Variantenfließlinien mittels Routenzügen [GOLZ ET AL. 2012]. Sie gehen dabei von einer bedarfsgesteuerten Nachschubversorgung aus. Ausgangspunkt der Planung sind die aus dem Produktionsprogramm berechneten Transportaufträge und Bereitstellzeitpunkte. Das im ersten Schritt formulierte gemischt-ganzzahlige Modell zur Routenbildung wird mit einem angepassten Savings-Algorithmus³⁰ und einem heuristischen Tauschverfahren gelöst. Die anschließende Tourenplanung erfolgt durch einen Greedy-Ansatz³¹ mit dem Ziel, die Anzahl der Fahrer zu minimieren. In ihrer Dissertation beschreibt GOLZ die genannten Verfahren detailliert und wendet den Ansatz auf ein Beispiel in der Automobilmontage an [GOLZ 2014].

KILIC ET AL. klassifizieren in ihrem Artikel Routenzugsysteme in Abhängigkeit von der Zuordnung der Routenzüge zu Routen (eine oder mehrere Routen je Routenzug) und der Tourenstartabstände (fix oder variabel) [KILIC ET AL. 2012]. Für den Fall fixer Tourenstartabstände formulieren die Autoren zwei Modelle der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung zur Routenplanung mit dem Ziel, die Anzahl der Routenzüge und die Wegstrecken zu minimieren. Zur Modellierung und Lösung des Problems wird das General Algebraic Modeling System (GAMS) eingesetzt.

Der Artikel von SATOGLU und SAHIN behandelt die Routen- und Tourenplanung im Zuge der Planung der Materialversorgung einer JIT-Produktion mit getakteten Routenzügen [SATOGLU,

²⁹ Da es sich um eine kumulative Dissertation handelt, wird auf die wiederholende Beschreibung der zugehörigen Zeitschriftenaufsätze verzichtet und lediglich auf die entsprechende Literatur verwiesen [EMDE ET AL. 2010; EMDE, BOYSEN 2012a; EMDE, BOYSEN 2012b; EMDE ET AL. 2012].

³⁰ Der Savings-Algorithmus ist ein heuristisches Lösungsverfahren für die Tourenplanung, bei dem die Tourenbildung und Reihenfolgebestimmung simultan erfolgen. In jeder Iteration weist man denjenigen Ort mit dem höchsten Savings-Wert (aus einer Liste aller nicht zugeordneter Orte) einer Tour zu [CLARKE, WRIGHT 1964].

³¹ Ein Greedy-Algorithmus (greedy (engl.) = gierig) ist ein heuristisches Lösungsverfahren, bei dem ein Optimierungsproblem schrittweise verbessert wird, wobei in jedem Schritt diejenige Alternative gewählt wird, die zum Betrachtungszeitpunkt am vielversprechendsten erscheint [SIEPERMANN, LACKES 2017].

3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen

SAHIN 2013]. Die Autoren formulieren dazu ein nichtlineares JITVRP-Modell³² in GAMS und entwickeln die Heuristik RCA (Feasible Route Construction Algorithm) zur Routen- und Tourenbildung bei vorgegebenen Tourenstartabständen mit dem Ziel, die Summe aus Transport- und Umlaufbestandskosten zu minimieren. Die Anwendung der Heuristik erfolgt auf ein Routenzugsystem zur Materialversorgung von zwei TV-Montagelinien. Aus den von den Autoren vorgegebenen Tourenstartabständen wird manuell diejenige mit den geringsten Gesamtkosten ausgewählt.

Der Konferenzbeitrag von GYULAI ET AL. fokussiert die Routen- und Tourenplanung in Routenzugsystemen mit dem Ziel, die Anzahl der benötigten Routenzüge zu minimieren [GYULAI ET AL. 2013]. Ihr Ansatz nutzt im ersten Schritt den Dijkstra-Algorithmus³³, um aus den Layoutdaten eine Entfernungsmatrix mit den jeweils kürzesten Wegen zwischen den Bereitstellorten zu berechnen. Darauf aufbauend generiert eine Cluster-Heuristik realisierbare Routen unter Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen. Im dritten Schritt erfolgt die Verbesserung der Ausgangslösung durch Tauschoperationen mithilfe einer k-Opt-Heuristik. Die Anwendbarkeit des Ansatzes wird anhand einer realen Produktionsversorgungsaufgabe in der Automobilindustrie unter Beweis gestellt.

FACCIO ET AL. stellen in ihrem Artikel ein Modell zur Dimensionierung von Routenzugsystemen für die mit Kanban gesteuerte Materialversorgung von Montagelinien unter Verwendung von Supermärkten vor [FACCIO ET AL. 2013a]. Im ersten Schritt berechnen sie mithilfe eines analytischen Modells basierend auf material- und produktionsspezifischen Durchschnittswerten die Anzahl der notwendigen Routenzüge und Fahrer sowie den Servicegrad. In der darauffolgenden dynamischen Simulation werden in einer Multi-Szenario-Analyse Eingangsgrößen variiert und Bewertungskennzahlen ermittelt. Die Autoren wenden die Methode bei einem italienischen Automobilhersteller zur Materialversorgungsplanung von vier Montagelinien an. In einem weiteren Artikel behandeln FACCIO ET AL. die gleiche Problemstellung, legen den Fokus allerdings auf die Optimierung der Anzahl der Kanban [FACCIO ET AL. 2013b]. Sie dimensionieren dazu das Routenzugsystem mit dem Ziel, die Bestands-, Transport- und Stillstandskosten zu minimieren. Aus der resultierenden Wiederbeschaffungszeit berechnet sie schließlich die Kanban-Anzahl. Abschließend wird die Methode bei einem Motorradhersteller angewendet und eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Änderung des Produktmixes vorgenommen.

ALNAHHAL und NOCHE stellen in ihrem Artikel einen methodischen Ansatz zur simultanen Lösung des Routen-, Touren- und Beladungsproblems in Routenzugsystemen unter Berücksichtigung kapazitiver Restriktionen vor [ALNAHHAL, NOCHE 2013]. ALNAHHAL konkretisiert diesen Lösungsansatz daraufhin in seiner Dissertation [ALNAHHAL 2015]. Er berechnet im ersten

³² Just-in-Time Vehicle Routing Problem (JITVRP) bezeichnet das Problem der Routen- und Tourenplanung innerhalb einer nach dem JIT-Konzept gesteuerten Produktion ohne Berücksichtigung kapazitiver Restriktionen der Transportmittel.

³³ Der Dijkstra-Algorithmus berechnet den kürzesten Pfad zwischen zwei Knoten in einem ungerichteten Graphen mit Angabe der Länge der Kanten [DOMSCHKE, DREXL 2005, S. 72 f.].

Schritt die möglichen Tourenstartabstände anhand von mathematischen Gleichungen. Im zweiten Schritt nutzt er die dynamische Programmierung zur Bestimmung der mindestens erforderlichen Anzahl der Routenzüge zwecks Eingrenzung des Lösungsraumes. Der dritte Schritt minimiert schließlich parallel die Anzahl der Routenzüge, die Variabilität der Beladung und Routenlänge sowie die Umlaufbestandskosten durch erneute Anwendung der dynamischen Programmierung.

FATHI ET AL. optimieren mit ihrem Ansatz die Materialversorgung von Montagelinien nach dem JIT-Konzept aus Supermärkten mit Routenzügen [FATHI ET AL. 2014a]. Sie formulieren dazu ein gemischt-ganzzahliges lineares Modell und lösen es mit einer Heuristik basierend auf dem Verfahren Simulated Annealing³⁴ mit dem Ziel, die Anzahl der Touren und die Umlaufbestandskosten zu minimieren. Die Autoren testen die Heuristik anhand von zwei Fallbeispielen und vergleichen die Lösungsergebnisse mit den mathematischen Optimierungsergebnissen des Tools CPLEX. Sie fassen zusammen, dass ihr Ansatz gute Ergebnisse in kürzerer Zeit liefert. FATHI ET AL. lösen das gleiche Problem kurze Zeit später mit einer Kombination aus Ameisenalgorithmus³⁵ und Tauschheuristik bei unveränderten Zielgrößen [FATHI ET AL. 2014b]. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Lösungen bei kürzerer Laufzeit gleich oder besser als die Ergebnisse von CPLEX sind.

DEWITZ ET AL. stellen in ihrem Artikel ein Verfahren zur schichtbasierten Fahrplanoptimierung getakteter Routenzüge in drei Schritten vor [DEWITZ ET AL. 2014]. Im ersten Schritt werden die zulässigen Taktzeiten auf Basis vorab zu definierender Routen und durchschnittlicher Ladungsträgerdurchsätze je Bereitstellort festgelegt. Die Berechnung der Taktzeiten je Route erfolgt unter Berücksichtigung von kapazitiven und zeitlichen Restriktionen sowie der Forderung nach einer ganzzahligen Anzahl Touren pro Schicht. Im zweiten Schritt werden darauf aufbauend gültige Fahrpläne erzeugt, indem Routenzüge so zu Zeitfenstern zugeordnet werden, dass ihre Beladung überschneidungsfrei erfolgen kann. Der dritte Schritt umfasst die Fahrplanoptimierung in Bezug auf die Anzahl der je Schicht benötigten Routenzüge und Mitarbeiter durch zeitliche Verschiebung der Tourenstarts. Hierfür wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm formuliert. Die Überprüfung des Potentials des Verfahrens anhand einer Simulationsstudie (Plant Simulation) ergibt eine Reduzierung des gesamten Wartezeitanteils von 36 % auf 14 %.

³⁴ Simulated Annealing bildet den Abkühlungsprozess bei der Metallherstellung nach. Durch langsame und kontrollierte Abkühlung bilden die Atome geordnete und stabile Kristallgitter mit niedrigem Energiezustand. In Analogie dazu sucht der Algorithmus den optimalen Zustand für ein mathematisches Problem. [KLÜVER ET AL. 2012, S. 87 ff.]

³⁵ Der Ameisenalgorithmus ist inspiriert vom Verhalten der Ameisen bei der Futtersuche. Der Algorithmus adaptiert die Markierung von Wegen mit einem Duftstoff (Pheromon) und nutzt künstliche Pheromonspuren, um den kürzesten Weg zwischen zwei Orten zu finden. [DORIGO, STÜTZLE 2004, S. 1 ff.; DREHER ET AL. 2009, S. 133]

In ihrem Konferenzbeitrag untersuchen KLENK ET AL. drei Strategien für den Umgang mit Belastungsspitzen in getakteten, mit Kanban gesteuerten Routenzugsystemen und variablen Transportbedarfen [KLENK ET AL. 2015]. Das formulierte Routenzugmodell unterscheidet sich bei den Strategien dahingehend, dass Transportaufträge, die aufgrund der begrenzten Routenzugkapazität nicht in der nächsten Tour ausgeliefert werden können, entweder einzeln durch Sondertransporte (Strategie 1), gebündelt durch Sondertransporte mittels separatem Routenzugprozess (Strategie 2) oder durch Rückstellungen auf nachfolgende Touren realisiert werden (Strategie 3). Die Strategien werden anhand zweier Fallbeispiele mit variierten Parameterwerten (z. B. Tourenstartabstand oder Routenzugkapazität) hinsichtlich der Zielgrößen Kosten und Wiederbeschaffungszeit beurteilt. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Strategie 3 in der Regel die niedrigsten Gesamtkosten verursacht.

Das Forschungsprojekt „Dynamische Routenzugsteuerung für kurzfristig schwankende Transportbedarfe“ der TU München hat die Entwicklung eines Konzepts zur Festlegung von Touren, Abfahrtzeitpunkten und Ressourcenzuteilung im laufenden Betrieb zum Ziel [LIEB 2017]. Dies soll auf Basis aktueller Transportbedarfe und unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands des Routenzugsystems erfolgen. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von Algorithmen für die dynamische Disposition mit dem Ziel, kostenintensive Sonderfahrten zu vermeiden.³⁶

3.2.3 Routenzugspezifische Software

Im Jahr 2009 stellen DREHER ET AL. ein Tool der Fa. inpro zur Routenoptimierung vor [DREHER ET AL. 2009]. Zur Lösung des Optimierungsproblems nutzt das Tool sowohl heuristische Verfahren (Einfügeheuristik als Eröffnungsverfahren und Tauschheuristik als Verbesserungsverfahren) als auch den aus der Bionik stammenden Ameisenalgorithmus. Als Ergebnis werden Optimierungsvarianten und routenspezifische Kennzahlen zur Verfügung gestellt. Die Routenoptimierung ist in das Logistikplanungstool MALAGA (Materialfluss Layout Grafische Anbindung) der Fa. ZIP integriert [ZIP 2013]. Im Jahr 2011 nutzen EBER und NÜRNBERGER das inpro-Tool und die Planungssoftware MALAGA zur Bestimmung von Einflussfaktoren im Innovationsprozess der Produktionsplanung [EBER, NÜRNBERGER 2011].

Die Fa. INFORM stellte auf der LogiMAT 2013 erstmals ein Routenzug-Modul für ihr Transportleitsystem SynchroTESS vor [INFORM 2013]. Nach Angabe des Herstellers soll es damit möglich sein, Routen und Fahrpläne flexibel in Abhängigkeit des aktuellen Transportbedarfs zu planen. Dazu kommen spezielle Prognose- und Optimierungsverfahren zum Einsatz, wobei INFORM keine weiteren Angaben über die verwendeten Algorithmen bekannt gibt. Bei Abweichungen des tatsächlichen vom prognostizierten Bedarf im Betrieb, berechnet das Tool in Echtzeit neue Routen und Fahrpläne, die den Fahrern der Routenzüge mittels Datenfunk und entsprechender Anzeigergeräte mitgeteilt werden. Das Tool berücksichtigt zudem individuelle

³⁶ Weiterführende Informationen über die verwendeten Verfahren sind zum Zeitpunkt der Abgabe der vorliegenden Arbeit nicht bekannt.

Randbedingungen (z. B. Technikeignung oder Schichtmodelle) und konfliktäre Zielstellungen (z. B. Minimierung des Fahrzeugbedarfs und Maximierung der Versorgungssicherheit).

Die Fa. LOGSOL bietet mit ihrer Softwarelösung RoutMan ein webbasiertes Planungsunterstützungssystem für die Routenzugkalkulation, dessen Funktionsweise vier wesentliche Schritte umfasst [WUSTMANN 2014]. Im ersten Schritt nutzt das Tool den Floyd-Warshall-Algorithmus und das Verfahren des besten Nachfolgers zur Routenfindung auf der Basis des Layouts und des vorzugebenden Verkehrsnetzes. Im zweiten Schritt erfolgt die Ermittlung möglicher Routenzugstrukturen unter Berücksichtigung technischer Restriktionen (z. B. Zuglänge oder Fahrwegbreite), wobei technische Varianten sowohl in einer Datenbank zur Verfügung stehen als auch individuell vorgegeben werden können. Im dritten Schritt erfolgt die Berechnung der Tourenanzahl, die notwendig ist, um die durchschnittlichen Bedarfe basierend auf Materialfluss- und Produktionsdaten zu decken. Abschließend wird die notwendige Anzahl von Routenzügen berechnet und Kennzahlen (z. B. Wirtschaftlichkeit oder Nutzungsgrade) ausgegeben. Dabei können alternative Lösungsszenarien gegenübergestellt und im Sinne einer Grob-bewertung miteinander verglichen werden [WUSTMANN ET AL. 2016, S. 197 ff.]. Nach Aussage von LOGSOL wird das Ziel verfolgt, die Software zukünftig auch für die operative Planung und Steuerung von Routenzugsystemen in Echtzeit nutzen zu können (z. B. Fahrplanerstellung). Im Zuge eines Kooperationsprojekts mit der TU Dresden sollen dazu existierende analytische Dimensionierungsverfahren erweitert werden [RITTER ET AL. 2016].

Die Fa. ALMERT LOGISTIC INTELLIGENCE unterstützt die Planung und den Betrieb von Routenzugsystemen mit einer selbstentwickelten Softwarelösung [ALMERT 2015]. Nach Angabe des Herstellers ermöglicht das Tool auf der Basis des Layouts und der zu definierenden Quellen, Senken und Fahrwege die Echtzeit-Planung von Routen unter Berücksichtigung von variablen Transportbedarfen. Dabei kommt ein Ameisenalgorithmus zum Einsatz. Über Bewertungskennzahlen und Optimierungspotentiale wurden keine Angaben gemacht.

Das im Jahr 2016 vorgestellte softwarebasierte Planungswerkzeug der TU München wurde im Rahmen des Forschungsprojekts IntegRoute entwickelt und setzt das Planungsvorgehen der VDI-Richtlinie 5586 [VDI 2016b; VDI 2016c] für die Grobplanung von Routenzugsystemen um [GÜNTNER, KEUNTJE 2016]. Die Kernidee des Planungsansatzes besteht in der parallelisierten Planung von Technik, Steuerung und Prozessen. Diese drei Planungsfelder sind in Form von Morphologien mit ihren jeweiligen Unterkategorien in einem MS Excel-Tool hinterlegt und können vom Planer zum Zweck der Bildung von Planungsvarianten ausgewählt werden. Anschließend werden die gebildeten Planungsvarianten unter Einsatz von MTM dimensioniert und die Anzahl der Routenzüge und Mitarbeiter sowie der Flächenbedarf bestimmt. Abschließend erfolgen die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Planungsvarianten sowie die Bewertung hinsichtlich fünf nichtmonetärer Oberkategorien (z. B. Ergonomie und Fahreigenschaften).

ten), wobei die Bewertung der Planungsvarianten relativ zueinander erfolgt. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen kann die Robustheit des Planungsergebnisses gegenüber Veränderungen einzelner Eingabeparameterwerte überprüft werden.³⁷

3.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Die Tab. 9 (S. 36) zeigt eine Gegenüberstellung der beschriebenen Ansätze bezogen auf die Klassifizierungsmerkmale Funktion, Einbeziehung von Transportbedarfen und Verfahren. Die vergleichende Betrachtung verdeutlicht insbesondere die divergenten Sichtweisen und Zielstellungen der Autoren in den jeweiligen Forschungsgebieten.

Im Bereich der **Produktionstechnik** dominiert eine pragmatische, anwendungsbezogene Vorgehensweise. Die Ansätze sind in der Mehrzahl regelbasiert und die Gestaltungsregeln bauen auf einfachen Berechnungen und vereinfachenden Annahmen auf. Das Ziel der Bemühungen ist es, praktikable Verfahrensweisen zur Erzeugung funktionierender Lösungen zu bekommen. Das Finden des globalen Optimums wird hier zunächst oft als nachrangig angesehen.

Es ist erkennbar, dass der Fokus der Betrachtungen auf der Gestaltung und Dimensionierung liegt. Die Disposition wird selten und lediglich ansatzweise behandelt, was auf die überwiegende Verwendung konstanter Transportbedarfe zurückzuführen ist. Die Bewertung beschränkt sich in allen Ansätzen auf die Angabe einiger ausgewählter Kennzahlen. Vereinzelt werden Kriterienkataloge erstellt und Sensitivitätsanalysen als Hilfsmittel bei der Bewertung eingesetzt. Die Optimierung von Routenzugsystemen wird überwiegend in den simulativen Ansätzen behandelt, wobei die Simulation lediglich der Analyse des Systemverhaltens dient. Die Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen wird hingegen nicht methodisch unterstützt und obliegt dem Anwender.

Im Bereich des **Operations Research** dagegen steht die Methodenentwicklung und nicht das umsetzbare Ergebnis im Mittelpunkt. Die Verfahren beschränken sich in der Regel auf abgegrenzte Teilprobleme, bilden diese in Form von komplexen mathematischen Gleichungssystemen ab und optimieren sie mit den gängigen Methoden.

Die Gegenüberstellung der relevanten Quellen verdeutlicht, dass der Fokus aller mathematisch geprägten Ansätze auf der Lösung von Dispositionsaufgaben liegt, wobei immer die Dimensionierung des Routenzugsystems das übergeordnete Ziel ist. Zudem handelt es sich stets um Optimierungsaufgaben im mathematischen Sinne (vgl. Abschnitt 3.1.1). Die Bewertung erfolgt zwangsläufig, da in allen mathematischen Modellen mindestens eine zu optimierende Zielgröße berücksichtigt wird. Dabei konzentrieren sich alle Autoren auf Kennzahlen und häufig auf Sensitivitätsanalysen. Eine differenzierte Bewertung bleibt allerdings in allen Ansätzen aus. Die

³⁷ Die aus dem Forschungsprojekt IntegRoute resultierenden Veröffentlichungen werden hier nicht separat aufgeführt, weil deren Inhalte im Abschlussbericht behandelt werden [KEUNTJE ET AL. 2016a; KEUNTJE, GÜNTNER 2016b; KEUNTJE ET AL. 2016b; KEUNTJE ET AL. 2016c].

Gestaltung von Systemelementen und -prozessen ist ebenfalls nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Die routenzugspezifische **Software** verfolgt das Ziel die Dimensionierungs-, Dispositions- und Optimierungsverfahren aus dem Bereich des Operations Research im Bereich der Produktionstechnik für reale Problemstellungen anwendbar zu machen. Die angewandten Verfahren decken dabei ein breites Spektrum ab. Gestalterische Aspekte werden, mit Ausnahme des Abschlussberichts zum Forschungsprojekt IntegRoute der TU München [GÜNTNER, KEUNTJE 2016], nur am Rande betrachtet.

In der Gesamtschau wird deutlich, dass die Mehrheit der Quellen in der Tab. 9 ausschließlich die Planung von Routenzugsystemen fokussiert, wobei entweder die Gestaltung und Dimensionierung oder die Dimensionierung und Disposition gemeinsam behandelt werden. Lediglich die simulativen Ansätze haben neben der Planung auch die Verbesserung bestehender Systeme unter den oben genannten Einschränkungen zum Ziel. Vergleicht man über die genannten Klassifizierungsmerkmale hinaus die Ansätze im Bereich des Operations Research hinsichtlich der jeweiligen Randbedingungen, Entscheidungsprobleme und Zielgrößen, fällt auf, dass die vorgestellten Methoden und Verfahren bestimmte Teilprobleme fokussieren (z. B. Routenoptimierung) und nicht universell einsetzbar sind [ALNAHAL ET AL. 2014; MARTINI 2014, S. 16].

Auffällig ist des Weiteren die divergierende Sichtweise in der Literatur bezogen auf die Bedeutung von Einflussfaktoren bei der Planung und im Betrieb von Routenzugsystemen [MARTINI 2015, S. 5]. Dies ist zurückzuführen auf die Systemkomplexität, die oftmals spezifischen Randbedingungen und Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 7.2.1). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen unterschiedlicher Routenzugsystemkonfigurationen haben u. a. gezeigt, dass es bedeutende und unbedeutende Einflussfaktoren gibt und dass deren Wirkungen auf Zielgrößen abhängig vom Betriebspunkt des Routenzugsystems sind [MARTINI ET AL. 2015, S. 70]. Dieser Sachverhalt findet in den bisherigen Ansätzen nur unzureichende Berücksichtigung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein methodischer Ansatz fehlt, der eine ganzheitliche Bewertung und Analyse sowie eine darauf aufbauende zielgerichtete Optimierung (im Sinne der Verbesserung) von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen aus Anwendersicht ermöglicht.

4 Anforderungen und Lösungsansatz

4.1 Anforderungen an die Funktionalität der Methode

Das Ziel dieser Arbeit basiert auf der im vorherigen Kapitel aufgezeigten Forschungslücke; die Entwicklung einer Methode zur Bewertung und Analyse von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen mit dem Ziel der anwendungsorientierten Optimierung³⁸ unter Berücksichtigung individueller Zielsetzungen. An die Methode an sich werden Anforderungen bezüglich der abzudeckenden Funktionalität gestellt, die sich durch die Zerlegung des übergeordneten Ziels in Teilziele formulieren lassen. Die Methode soll...

- den Anwender befähigen ein Routenzugsystem auf der Basis von Ist-Aufnahmen und -Analysen (z. B. Prozesszeiten oder Transportmengen) in einem Modell abzubilden und hinsichtlich wirtschaftlicher, logistischer und qualitativer Kriterien zu bewerten.
- die Analyse des abgebildeten Routenzugsystems dahingehend ermöglichen, dass aufgezeigt wird, wie sich die Variation von Eingabeparameterwerten auf die Zielgrößen auswirkt und welche Eingabeparameter für die Optimierung relevant sind.
- basierend auf den Analyseergebnissen die Identifizierung von potentiellen Optimierungsmaßnahmen unterstützen und eine Entscheidungsregel für die Auswahl zweckmäßiger Maßnahmen unter Berücksichtigung individueller Zielgrößen zur Verfügung stellen.

4.2 Lösungsansatz

Die funktionalen Anforderungen an die Methode ermöglichen die Formulierung eines Lösungsansatzes, bestehend aus drei modellbasierten³⁹ Bausteinen. Im **Bewertungsmodell** werden zunächst die technischen und organisatorischen Gestaltungsalternativen des Ist-Zustands abgefragt. Dies erfolgt mithilfe von Morphologien, da sie zum einen die Gestaltungsvielfalt von Routenzugsystemen verdeutlichen und zum anderen den Ist-Zustand übersichtlich in Tabellen darstellen. Daraufhin sind die jeweiligen Eingangsparameter einzugeben. Mittels eines Kennzahlensystems erfolgt die auf dem anwendungsorientierten Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c] basierende Berechnung routen- und systembezogener Bewertungskennzahlen. Die Disposition als drittes Planungsfeld ist demzufolge nicht Gegenstand der Betrachtung (vgl. Abschnitt 1.1). Das Kennzahlensystem bietet im Gegensatz zu einkriteriellen Bewertungsverfahren (z. B. Kapitalwertmethode) die Möglichkeit Bewertungskriterien

³⁸ Optimierung meint im Zusammenhang mit der zu entwickelnden Methode die Veränderung eines Zustands hin zu einem verbesserten Zustand (vgl. Abschnitt 3.1.1). Das Ziel ist demzufolge nicht das Finden des globalen Optimums, sondern die schrittweise Verbesserung hin zu einem im Vergleich besseren Zustand.

³⁹ Ein Modell ist die „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ [VDI 2014, S. 11].

4 Anforderungen und Lösungsansatz

mit unterschiedlichen Dimensionen (z. B. Kosten und Zeit) berücksichtigen zu können. Im Vergleich zu anderen multikriteriellen Bewertungsverfahren (z. B. Nutzwertanalyse) bietet es den Vorteil, die im Rahmen der Analyse relevanten Wirkungen quantitativ, objektiv und hinsichtlich ihrer Verknüpfung variabel abbilden zu können.

Das **Analysemodell** dient der Identifizierung von Wirkungen auf die Bewertungskennzahlen. Da sich Wirkungen in komplexen Systemen in der Regel nicht hinsichtlich ihrer Intensität und nur zum Teil hinsichtlich ihrer Wirkungsrichtung konkretisieren und in allgemeingültige Funktionen überführen lassen [KIRCHNER 2004, S. 74], ist eine fallspezifische Wirkungsanalyse erforderlich. Zu diesem Zweck variiert das Analysemodell zunächst die Eingabeparameterwerte des Bewertungsmodells systematisch im Sinne einer Sensitivitätsanalyse. Diese erfolgt „ceteris paribus“ („unter sonst gleichen Bedingungen“), weil dadurch die Änderungen der Kennzahlenwerte auf die Variation lediglich eines Eingabeparameterwerts zurückzuführen sind (Ursache-Wirkungs-Zusammenhang) [MARTINI ET AL. 2015, S. 66]. Die Darstellung von Wirkungen erfolgt in Parameter- und Wirkungsanalysen numerisch und grafisch, da somit Kennzahlverläufe mit variierenden Gradienten und betriebspunktabhängige Wirkintensitäten deutlich werden [MARTINI ET AL. 2015, S. 68 ff.]. Anhand ihrer Wirkintensität werden die Eingabeparameter schließlich hinsichtlich ihrer Relevanz für die Optimierung beurteilt.

Im **Optimierungsmodell** erfolgt zunächst die Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen, die einen Einfluss auf die relevanten Eingabeparameter haben können. Die Grundlage dafür bildet die Wissensbasis der Gestaltungsmöglichkeiten. Im nächsten Schritt sind die tatsächlichen Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen auf die Eingabeparameter zu überprüfen. Das ist notwendig, weil gestalterische Veränderungen nicht zwangsläufig einen singulären Einfluss auf Eingangsgrößen haben, sondern komplexe Wirkungszusammenhänge vorliegen [MARTINI 2015, S. 4]. Es sind somit die Struktur des Routenzugsystems anzupassen und die Wirkungen auf die Kennzahlenwerte zu überprüfen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Da die Überprüfung am realen System nicht sinnvoll ist, muss das neu gestaltete Routenzugsystem (für jede Optimierungsmaßnahme) mithilfe des Bewertungsmodells dimensioniert werden. Abschließend erfolgt die Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade, indem die geplanten Varianten mit dem Ist-Zustand in Bezug auf ihre Nutzwerte, unter Berücksichtigung individueller Wertfunktionen je Kennzahl, verglichen werden. Im Sinne eines Entscheidungsbaumverfahrens werden lediglich die im Vergleich zum Ist-Zustand besseren Varianten in Betracht gezogen [HILLIER, LIEBERMAN 2001, S. 764 ff.]. Diese Varianten können wiederum als neue Ausgangslösungen verwendet werden (iterative Verbesserung). Die Optimierung ist beendet, wenn keine bessere Lösung mehr gefunden wird oder eine bestimmte Zahl von Iterationen durchgeführt wurde.

Die Bewertung und Analyse erfolgen aufgrund des Berechnungsumfangs im Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel, da es weit verbreitet ist und standardmäßig die notwendigen Funk-

tionen für die Berechnungen und Auswertungen zur Verfügung stellt (z. B. Makro-Programmierung).⁴⁰ Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Methode mit einfachen Mitteln modular umzusetzen, um einerseits die Übersichtlichkeit zu gewährleisten und andererseits die Erweiterbarkeit der Methode und des Tools sicherzustellen. Die Abb. 3 veranschaulicht den gewählten iterativen Lösungsansatz, bestehend aus drei Bausteinen und zeigt deren grundlegende Inhalte auf.

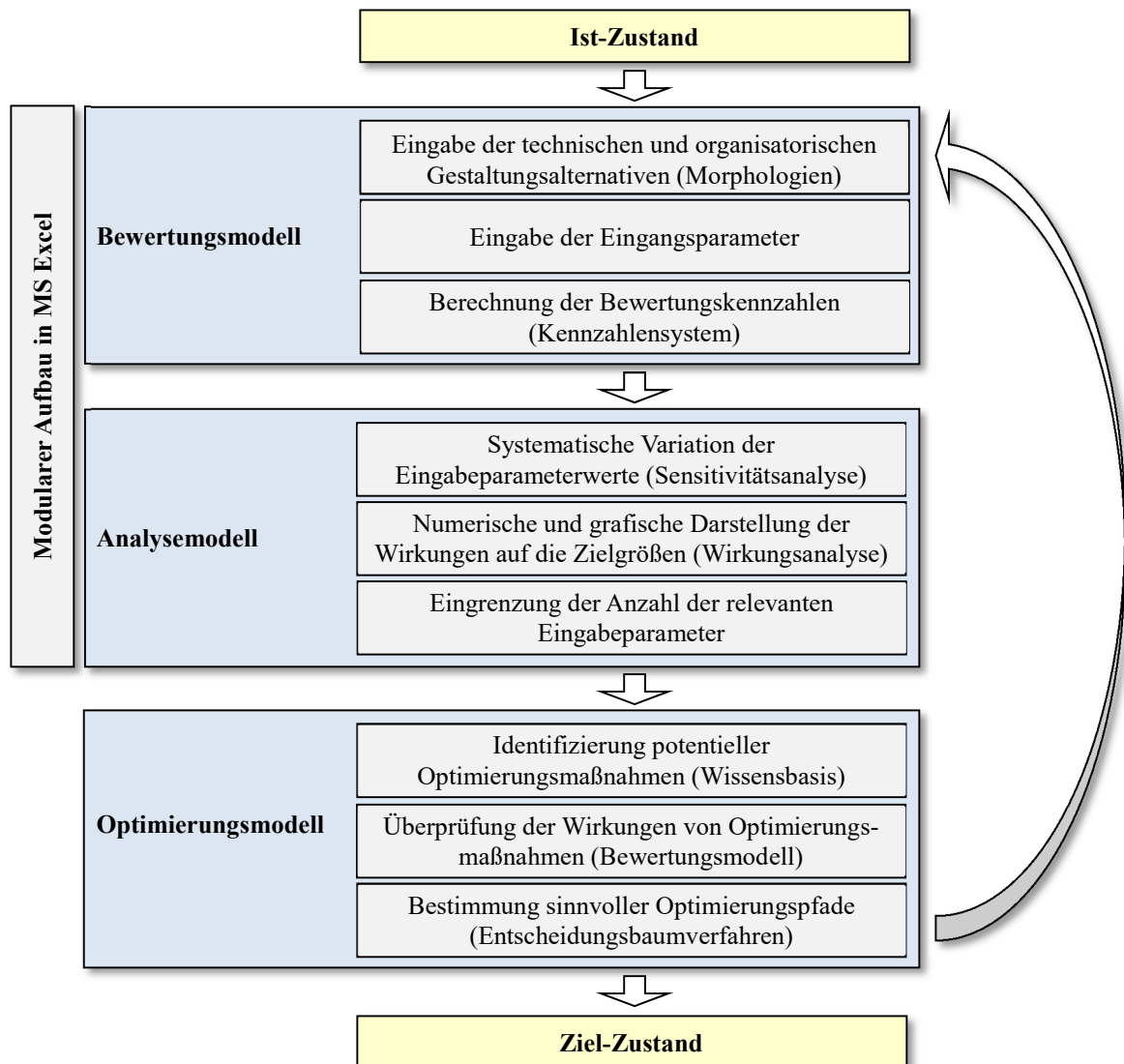


Abb. 3: Lösungsansatz für die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen

4.3 Anforderungen an die Modelle

Ein Modell dient der vereinfachten Darstellung realer Systeme und komplexer Zusammenhänge durch Abstraktion der Realität; eine vollständige Abbildung ist oftmals nicht möglich

⁴⁰ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Modellen um statische Modelle mit deterministischen Eingangsgrößen handelt (vgl. Abschnitt 6.1), weshalb der Einsatz spezieller Simulationssoftware nicht notwendig ist.

4 Anforderungen und Lösungsansatz

oder nicht erwünscht [ADAM 1996, S. 60; PFOHL, STÖLZLE 1997, S. 52; FLEISCHMANN ET AL. 2005, S. 81]. Bei der Modellbildung sind die grundlegenden Anforderungen an Modelle gemäß der Tab. 10 zu beachten [PFENNIG 1988, S. 47; BECKER 1991, S. 20 ff.; WIEDENMANN 2001, S. 42 ff.; GREIFFENBERG 2004, S. 76; KIRCHNER 2004, S. 45 f.; BUNGARTZ 2005, S. 20; ADAM 1996, S. 61; PFOHL, STÖLZLE 1997, S. 121].

Tab. 10: Anforderungen an die Modelle bei der Modellbildung

Zielorientierung	Das Modell ermöglicht verlässliche Aussagen über das reale Systemverhalten. Es ist zielführend in Bezug auf die übergeordnete Zielstellung sowie die mit der Erstellung und Anwendung des Modells verfolgten Teilziele.
Vollständigkeit	Das Modell berücksichtigt alle relevanten Teilaspekte eines realen Systems, bestehend aus Elementen, Prozessen sowie deren Beziehungen zueinander. Im Modell müssen alle relevanten Eingangsgrößen, Einflussfaktoren und Zielgrößen Berücksichtigung finden.
Allgemeingültigkeit	Das Modell besitzt ein breites Einsatzspektrum in Bezug auf die abbildbaren realen Systeme und berücksichtigt hinsichtlich der Struktur eine Vielzahl unterschiedlicher Systemkonfigurationen. Des Weiteren ist die Vorgehensweise innerhalb des Modells unabhängig von der Systemkonfiguration.
Richtigkeit	Das Modell gibt Elemente und Prozesse sowie deren Beziehungen zueinander realitätsnah wieder. Das Systemverhalten im Modell ist valide und die Ergebnisse sind plausibel.
Objektivität	Im Modell sind die Bezeichnungen von Elementen und Prozessen eindeutig definiert. Das Modellverhalten ist frei von subjektiven Einflüssen und die Ergebnisse bei unveränderten Eingangsgrößen reproduzierbar.
Einfachheit	Das Modell ist mit geringem Aufwand erstellbar und intuitiv nutzbar. ⁴¹ Des Weiteren ist sicherzustellen, dass der Einsatz des Modells ohne spezielles Modellierungs-Know-how des Nutzers möglich ist.
Genauigkeit	Das Modell weist den richtigen Detaillierungsgrad bezüglich der Abbildung der Realität und der Ergebnisse auf. Es sind diejenigen Merkmale zu berücksichtigen, die einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten haben, sodass letztlich Rückschlüsse vom Modellverhalten auf das reale System möglich sind. Nachrangige Merkmale gilt es demnach durch Vereinfachungen oder Zusammenfassungen abzubilden, unwesentliche hingegen zu vernachlässigen.
Nachvollziehbarkeit	Die Darstellung der Modellstruktur ist übersichtlich und unterstützt die Nachvollziehbarkeit des Modellverhaltens. Die Berechnungslogik ist für Facharbeiter im entsprechenden Bereich verständlich und die Ergebnisse nachvollziehbar.
Änderbarkeit	Das Modell ist mit wenig Aufwand an strukturelle Veränderungen (z. B. veränderte Randbedingungen) oder Erweiterungen des realen Systems (z. B. neue Gestaltungsmöglichkeiten) anpassbar. Das Modellverhalten ist entsprechend dem Verhalten des realen Systems flexibel abbildbar.

Anhand dieser grundlegenden Anforderungen an Modelle im Allgemeinen lassen sich in den Abschnitten 6.3.1.3, 7.2.1.2 und 8.4.1.2 die spezifischen Anforderungen an die Modelle des Lösungsansatzes ableiten. Dies dient zum einen der zielgerichteten Modellbildung und zum anderen der abschließenden Beurteilung der Methode hinsichtlich der Zielerfüllung (vgl. Abschnitt 9.1).

⁴¹ Lange Modellentwicklungszeiten bergen die Gefahr der Modellüberalterung und sollen daher vermieden werden [JÜNEMANN 1999, S. 16-13].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Das Ziel dieses Kapitels ist es, die technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen aufzuzeigen und anhand von Merkmalen und Merkmalsausprägungen übersichtlich darzustellen.⁴² Dies unterstützt einerseits die strukturierte Entwicklung des Bewertungsmodells und dessen Umsetzung im Excel-Tool (vgl. Abschnitt 6.6) und dient andererseits als Wissensbasis für die Bestimmung potentieller Optimierungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 8.2). Letzteres erfordert insbesondere die technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten sowie deren Vor- und Nachteile, Anwendungsfelder und Eignungen zu kennen und zu berücksichtigen.

Die Struktur der Merkmale ist angelehnt an die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 [VDI 2016b], die im Rahmen der Erstellung der vorliegenden Arbeit entstanden ist, wobei im Folgenden lediglich zwischen technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten unterschieden wird. Die in der Richtlinie unter der Kategorie „Randbedingungen“ aufgeführten Merkmale und Erscheinungsformen werden der Technik oder der Organisation zugeordnet, da sie nicht von vornherein als potentielle Ansatzpunkte für Optimierungen ausgeschlossen werden sollen.

5.1 Technik

5.1.1 Ladungsträger

Der Ladungsträger⁴³ ist nach DIN 30781 Teil 1 ein tragendes Mittel zur Zusammenfassung von Gütern zu einer Ladeinheit [DIN 1989, S. 2]. Er dient der Vereinfachung des Transports, des Umschlags und der Lagerung sowie dem Schutz von Gütern [KLUG 2010, S. 149]. Unter Umständen kann der Ladungsträger auch als Informationsträger verwendet werden, z. B. im Rahmen eines Behälter-Kanban-Systems (vgl. Abschnitt 5.1.5).

Die Erscheinungsformen von Ladungsträgern sind aufgrund spezifischer Anforderungen und Einsatzbereiche sehr vielfältig [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 128]. Sie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Form, Abmessungen und Werkstoffe [KLUG 2010, S. 149]. Sowohl die Routenzugstudie von GÜNTNER ET AL. als auch die Erfahrungen des Autors im Rahmen der Betreuung studentischer Arbeiten haben gezeigt, dass die Ergebnisse der Routenzugplanung insbesondere von den Abmessungen und der Umschlagfähigkeit der Ladungsträger abhängen [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39]. Aus diesem Grund wird im Folgenden zwischen KLT und

⁴² Die Darstellung aller Erscheinungsformen von Routenzugsystemen ist an dieser Stelle nicht zweckmäßig. Die nachfolgenden Ausführungen behandeln daher die wesentlichen Merkmale und Merkmalsausprägungen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 [VDI 2016b, S. 3 ff.] und erheben folglich keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

⁴³ Synonym verwandte Begriffe: Förder-, Lade-, Lager- oder Transporthilfsmittel [SCHULTE 2009, S. 150]. In dieser Arbeit wird zum Teil auch der Begriff „Behälter“ synonym verwendet, da sich z. B. die Bezeichnung „Behälter-Kanban“ in der Literatur durchgesetzt hat, dieser aber für alle Ladungsträger gelten soll.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

GLT unterschieden. Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal ist die Universalität des Einsatzes der Ladungsträger, wobei einerseits zwischen Standard-Ladungsträgern (z. B. KLT nach VDA 4500 [VDA 2013a] oder Euro-Gitterboxpalette nach DIN 15155 [DIN 1986]) und andererseits Spezial-Ladungsträgern (z. B. Set-Behälter oder individuelle Transportgestelle) differenziert wird. Die Klassifizierung der Ladungsträger in Routenzugsystemen zeigt die Tab. 11.

Tab. 11: Klassifizierung von Ladungsträgern in Routenzugsystemen in Anlehnung an SCHEDLBAUER, BOPPERT und KLUG [SCHEDLBAUER 2008, S. 126; BOPPERT 2008, S. 72; KLUG 2010, S. 150]

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>				
Ladungsträger	kein Ladungsträger	Standard-KLT (modular auf die Grundflächen 800 x 1200 mm (Euro) und 1000 x 1200 mm (ISO) abgestimmt)	Spezial-KLT (Grundfläche 800 x 1200/ 600 x 800 mm (Euro) oder 1000 x 1200 mm (ISO))	Standard-GLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)	Spezial-GLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)

Der Transport und die Bereitstellung von Gütern erfolgt **ohne Ladungsträger**, wenn beispielsweise Baugruppen direkt auf Anhängern oder Wagen abgelegt werden. Hierbei werden ergonomische und wertschöpfungsorientierte Anforderungen der Montage bestmöglich erfüllt [SCHEDLBAUER 2008, S. 123; BOPPERT 2008, S. 70]. In der Literatur wird dieses Transport- und Bereitstellungs-konzept als „Minomi“ bezeichnet [LIKER, MEIER 2006, S. 320; CHAPPELL 2006, S. 22; HANSON 2011].

Unter KLT werden im Folgenden nicht unterfahrbare Ladungsträger bis zu einer Grundgröße von 600 x 400 mm verstanden, die manuell ohne zusätzliches Transportmittel gehandhabt werden können [MARTIN 2016, S. 63; VDA 2013b, S. 5]. Sie eignen sich insbesondere für Klein- und schüttgutfähige Massenteile [KLUG 2010, S. 149]. **Standard-KLT** sind universell einsetzbar, d. h. sie besitzen Funktionen und Materialeigenschaften unabhängig vom Transportgut und Einsatzzweck, und sind durch Typ-Nummern gekennzeichnet (Normierung) [VDA 2013b, S. 6]. Sie besitzen modulare Größenaufteilungen und sind oftmals stapel- und/oder ineinander schachtelbar [MARTIN 2016, S. 63]. Standard-KLT eignen sich zur werks- und unternehmensübergreifenden Anwendung, z. B. als Mehrwegverpackungssystem [KLUG 2010, S. 150 f.]. **Spezial-KLT** sind demgegenüber als transportgut- oder verwendungszweckabhängige Ladungsträger zu verstehen. Sie werden z. B. aufgrund der Geometrie oder Oberflächenbeschaffenheit des Transportguts speziell entwickelt und gefertigt [KLUG 2010, S. 152].

GLT sind unterfahrbare Ladungsträger mit einer Grundgröße von mehr als 600 x 400 mm, für deren Handhabung ein zusätzliches Fördermittel (z. B. Gabelstapler oder Handhubwagen) notwendig ist [KLUG 2010, S. 150]. Sie dienen zum einen der Bildung von größeren Ladeeinheiten (z. B. mehrere KLT auf einem GLT), zum anderen dem Transport und der Lagerung von großen

und schweren Gütern [MARTIN 2016, S. 65]. **Standard-GLT** sind analog zu Standard-KLT hinsichtlich ihrer Abmessungen genormt und universell einsetzbar. Bekannte Beispiele sind die EURO-Palette⁴⁴ und EURO-Gitterboxpalette⁴⁵ nach DIN 15155 [DIN 1986] oder VDA-GLT nach VDA 4520 [VDA 2013b]. **Spezial-GLT** sind analog zu Spezial-KLT vom Transportgut oder dem Verwendungszweck abhängig. Zu dieser Klasse zählen z. B. Transportgestelle wie sie in der Automobilindustrie zur Bereitstellung von großen Baugruppen und lackierten Karosserieteilen zum Einsatz kommen. Die Abb. 4 zeigt je ein Beispiel der Ladungsträgertypen.



Abb. 4: Minomi-Konzept zur ladungsträgerfreien Materialbereitstellung (oben links), Standard-KLT in modularen Größen (oben Mitte), Set-Behälter zum Transport mehrerer Produkte ohne trennende Zwischenschicht (oben rechts), EURO-Gitterboxpalette (unten links) und Spezial-Transportgestell für Fahrzeugsitze (unten rechts) [CEC; AUER Packaging; Fromm Fördertechnik; EPAL; Elkas]

5.1.2 Transportmittel

Als Transportmittel sind definitionsgemäß alle flurgebundenen Unstetigförderer (auch Flurförderzeuge genannt [DIN 1994]) einsetzbar (vgl. Abschnitt 2.1). Eine Unterteilung der Gestaltungsmöglichkeiten ist nach verschiedenen Kriterien möglich [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 228;

⁴⁴ Synonym verwandte Begriffe: EURO-Pool- oder DIN-Palette [MARTIN 2016, S. 68].

⁴⁵ Synonym verwandte Begriffe: EURO-Gitterbox-Pool-Palette [KLUG 2010, S. 150; PFOHL, STÖLZLE 1997, S. 92] oder Gitterbox (umgangssprachlich).

5 Gestaltungsmöglichkeiten

DIN 1994, S. 3; SCHULTE 2009, S. 160]. Für Routenzugsysteme ist eine Kategorisierung hinsichtlich der Art des Fahrzeugs⁴⁶ [DIN 1994, S. 3] und der Art der Steuerung gemäß der Tab. 12 sinnvoll.

Tab. 12: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Transportmitteln in Routenzugsystemen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>				
Art des Fahrzeugs	Wagen mit fester Plattform	Schlepper mit Anhänger	Gabelstapler	Kommissionierer	Handwagen
Art der Steuerung	fahrergeführt			fahrerlos	

5.1.2.1 Art des Fahrzeugs

Wagen mit fester Plattform dienen dem Horizontaltransport von Lasten im Innen- und Außenbereich [MARTIN 2016, S. 244]. Ein Beispiel eines Plattformwagens zeigt Abb. 5 (links). Vorteilhaft sind die in der Regel hohe Tragfähigkeit bis ca. 2 t sowie die hohe Fahrgeschwindigkeit bis ca. 25 km/h. Nachteilig ist die Notwendigkeit eines zusätzlichen Fördermittels zur Be- und Entladung von großen bzw. schweren Gebinden. Plattformwagen eignen sich insbesondere, wenn Großladungsträger mit hohem Gewicht über weite Strecken transportiert werden müssen. Die Verwendung von Wagen (ohne Anhänger) für Routenverkehre gemäß Abschnitt 2.1 ist aufgrund der geringen Transportkapazität (in der Regel Stellfläche für max. zwei Palettenplätze) wenig verbreitet. Da Plattformwagen aber auch für das Ziehen von Anhängern genutzt werden können [KNEHR 2013], ist ihr Einsatz in Routenzugsystemen grundsätzlich möglich. Im Verbund mit Anhängern erfüllen Plattformwagen die Funktion eines Schleppers, erweisen sich aber hinsichtlich der maximalen Anhängelast sowie des Wenderadius als nachteilig (vgl. Abb. 6 auf S. 46).



Abb. 5: Plattformwagen (links) und Schlepper mit Anhänger (rechts) [Linde; Jungheinrich]

Ein **Schlepper** ist ein Flurförderzeug, das „mit Kupplungen versehen ist und speziell zum Ziehen von auf Flur fahrenden Fahrzeugen bestimmt ist“ [DIN 1994, S. 4]. Er dient dem Horizon-

⁴⁶ Nach [DIN 1994] „Benutzungsart“ genannt.

taltransport von Anhängern. Da Schleppzüge sowohl in der Literatur als auch in der betrieblichen Praxis eine große Relevanz im Zusammenhang mit Routenzugsystemen besitzen, wird im Folgenden insbesondere auf Schlepper und in Abschnitt 5.1.2.2 auf Anhänger eingegangen. Die Abb. 5 (rechts) zeigt einen typischen Schlepper zum Ziehen von Anhängern im innerbetrieblichen Bereich. Schlepper lassen sich hinsichtlich verschiedener Merkmale unterteilen, die bei der Technikauswahl zu berücksichtigen sind (vgl. Tab. 13).

Tab. 13: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Schleppern

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Bauweise	Dreirad-Schlepper		Vierrad-Schlepper
Antrieb	Elektroantrieb	Verbrennungsantrieb	Hybridantrieb
Anhängelast⁴⁷	leicht (< 5 t)	mittel (5 - 25 t)	schwer (> 25 t)
Bedienung	stehend		sitzend

Schlepper in Dreirad-Bauweise (starre Hinterachse und gelenktes Vorderrad) sind in der Regel wendiger als Vierrad-Schlepper (vgl. Abb. 6) und damit vor allem für Anwendungsbereiche geeignet, die ein geringes Platzangebot und schmale Fahrwege aufweisen (z. B. Montagebereiche) [TEN HOMPEL, SCHMIDT 2010, S. 97; MARTIN 2016, S. 243]. Da sie überwiegend für den innerbetrieblichen Materialtransport verwendet werden, sind sie vorwiegend elektrisch angetrieben [TEN HOMPEL, SCHMIDT 2010, S. 97]. Die maximal möglichen Anhängelasten sind vom jeweiligen Anwendungsfall (Belastungsdauer, Steigung usw.) abhängig und variieren in der Regel zwischen ca. 500 kg und zehn Tonnen (vgl. Abb. 6). Die Fahrgeschwindigkeit von Dreirad-Schleppern kann unbeladen bis ca. 17 km/h betragen [BIEGALE 2014, S. Datenanhang], in der Praxis liegt sie jedoch aufgrund des Beladungszustands, den örtlichen Gegebenheiten und betrieblichen Sicherheitsvorkehrungen meist bei drei bis zehn Kilometer pro Stunde.

Vierrad-Schlepper mit Elektroantrieb besitzen üblicherweise Anhängelasten bis ca. 25 t (vgl. Abb. 6) und eignen sich somit für schwere Transporte im Innen- und Außenbereich. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt bis zu 25 km/h. Schlepper mit Verbrennungsantrieben (Diesel oder Treibgas) besitzen zum Teil weitaus höhere Anhängelasten, werden dann aber in der Regel nicht für den innerbetrieblichen Materialtransport eingesetzt. Unter hybriden Antrieben für Schlepper versteht man die Kombination aus Brennstoffzelle und Elektromotor, bei der durch chemische Reaktion von Wasserstoffmolekülen elektrische Energie freigesetzt wird, die wiederum einen

⁴⁷ Die Anhängelast ist nach DIN 15172 „die Masse der Anhänger, die an die Anhängerkupplung eines schleppenden Flurförderzeuges gekuppelt ist“ [DIN 1988, S. 1]. Die maximale Anhängelast lässt sich durch Division der maximalen Zugkraft eines schleppenden Flurförderzeuges mit dem spezifischen Rollwiderstand der Anhänger (in der Regel 200 N/t) für das Schleppen in der Horizontalen berechnen. Die maximale Zugkraft ist dabei die Kraft, die ein schleppendes Flurförderzeug beim Ziehen unter definierten Bedingungen auf die Anhängerkupplung aufbringen kann [DIN 1986]. Beim Schleppen auf Steigungen verringert sich die maximale Anhängelast, weshalb die Zugkraft als Kennzahl für die Leistungsfähigkeit eines Schleppers besser geeignet ist. Im Folgenden wird allerdings die maximale Anhängelast verwendet, da sie die anschaulichere Kennzahl ist (Angabe als Masse anstatt als Kraft) und von den Herstellern für das Schleppen in der Horizontalen angegeben wird.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Elektromotor versorgt [KOCH 2011]. Die Forschungsprojekte „Hylog-Fleet“ und „H2IntraDrive“ zeigen erste Anwendungsbeispiele für Schlepper mit Brennstoffzellen-Hybridantrieb [KOCH 2011; ANONYM 2015].

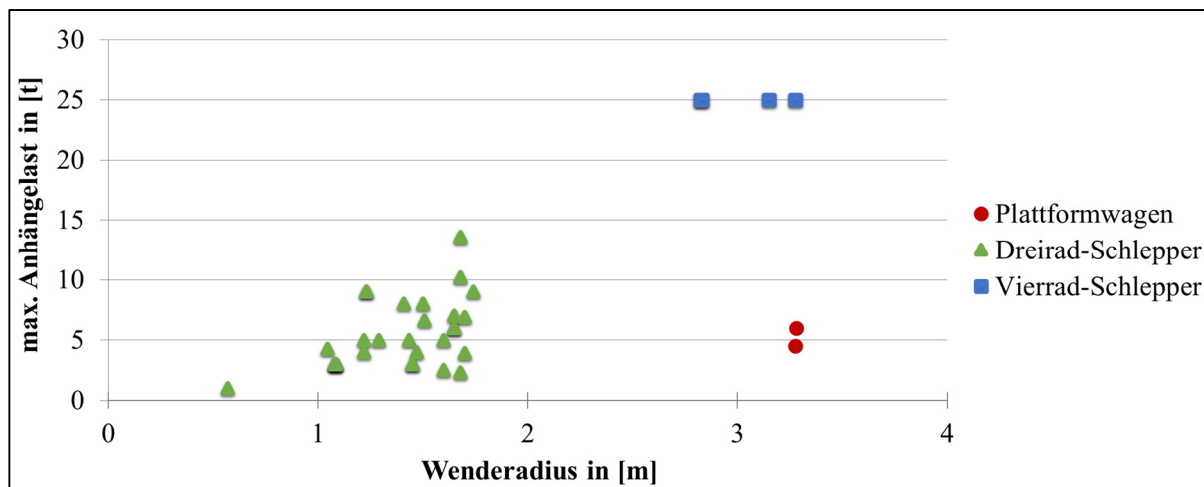


Abb. 6: Darstellung der maximalen Anhängelasten und Wenderadien von zwei Plattformwagen, 30 Dreirad- und vier Vierrad-Schleppern [BIEGALE 2014, S. 25]

Der Zusammenhang von Zugkraft, Anhängelast, Steigung, Fahrgeschwindigkeit und zulässiger Fahrstrecke wird für Wagen und Schlepper in sogenannten Leistungsdiagrammen angegeben. Damit ist auf Basis der maximalen Anhängelast sowie der vorliegenden Steigung eine Aussage über die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit und die zulässige Fahrstrecke möglich. Das Beispiel in der Abb. 7 zeigt, dass bei einer dreiprozentigen Steigung mit einer Anhängelast von drei Tonnen, diese Last mit einer Geschwindigkeit von 4,3 km/h 4.400 m weit ununterbrochen gezogen und noch abgebremst werden kann.

Die Anhängerkupplung hat die Aufgabe, die Zug-, Druck- und Lenkverbindung innerhalb des Routenzugs zwischen Schlepper und Anhänger sowie zwischen zwei Anhängern herzustellen [BIEGALE 2014, S. 31]. Zughaken-Kupplungen in Verbindung mit Zugösen zeichnen sich vor allem durch eine einfache Bauweise und ihre Wartungsfreiheit aus. Das An- und Abkuppeln ist allerdings nur manuell möglich. Steckbolzen-Kupplungen bieten die Möglichkeit zur besseren Sicherung der Verbindung, es ist allerdings eine sehr genaue Positionierung der Zugöse der Anhänger erforderlich. Rockinger-Kupplungen weisen eine komplizierte Bauweise auf und sind teurer als Zughaken- oder Steckbolzen-Kupplungen. Vorteilhaft ist demgegenüber die Möglichkeit zum automatischen Ankuppeln von Anhängern. Automatik-Kupplungen sind aufwendig konstruiert und verhältnismäßig teuer, ermöglichen allerdings ein zeitsparendes und ergonomisches An- und Abkuppeln von Anhängern. Schlepper und Wagen können in der Regel mit unterschiedlichen Kupplungsarten ausgestattet werden, die Auswahl ist dann z. B. von der Anzahl der Handhabungsvorgänge und deren Komplexität abhängig.

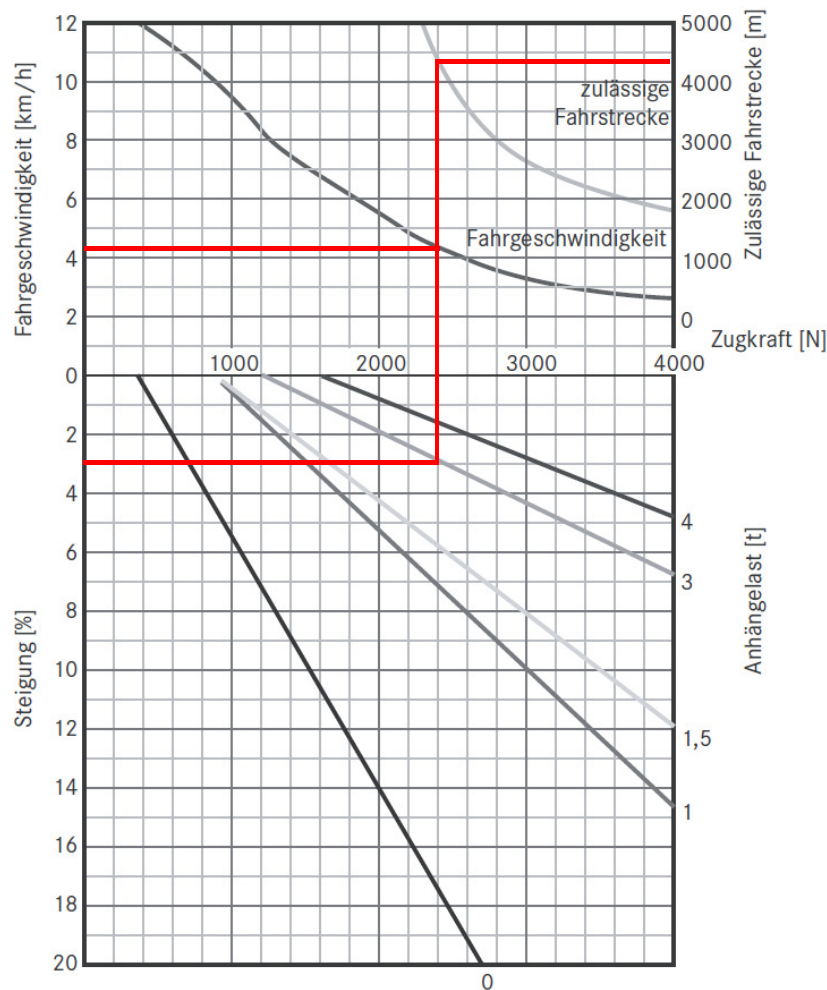


Abb. 7: Leistungsdigramm STILL CX-T mit Einsatzbeispiel [STILL]

In Bezug auf die Bedienung unterscheiden sich Schlepper dahingehend, ob der Fahrer während der Fahrt auf dem Schlepper steht oder sitzt. Die Bedienung im Stehen besitzt den Vorteil, dass das Auf- und Absteigen einfach und schnell erfolgen kann, weshalb sich der Einsatz vor allem bei häufigem Auf- und Absteigen, z. B. bei kurzen Routenlängen und vielen Haltepunkten je Route, empfiehlt [HARRIS ET AL. 2003, S. 47]. Demgegenüber weist die Bedienung im Sitzen Vorteile hinsichtlich der Ergonomie auf, insbesondere bei langen Fahrstrecken und wenigen Haltepunkten.

Aufgrund der veränderbaren Anhängeranzahl besitzen Schlepper eine variable Transportkapazität, die in der Regel höher ist als bei den anderen beschriebenen Transportmitteln. Nach der Routenzug-Studie von GÜNTNER ET AL. kommen in den untersuchten Unternehmen in ca. 75 % der Fälle bis zu vier Anhänger zum Einsatz [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 54]. Die Anzahl der Anhänger kann durch die Anhängelasten der Schlepper, aber auch durch örtliche Gegebenheiten wie beispielsweise Kurvenradien begrenzt sein.

Ein Nachteil von Schleppern ist das fehlende Lastaufnahmemittel, weshalb zum Be- und Entladen von Anhängern (oder Trolleys) mit nicht manuell handhabbaren Ladungsträgern (z. B.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

GLT) oftmals Gabelstapler oder Hubwagen erforderlich sind [DROSTE 2013, S. 42]. Für weitere Vor- und Nachteile von Schleppern sei auf den Abschnitt 2.3 verwiesen.

Gabelstapler weisen unterschiedliche Bauformen auf [KOETHER 2007, S. 39], wobei im Folgenden aufgrund der weiten Verbreitung auf den Frontstapler⁴⁸ mit Fahrersitz Bezug genommen wird. Frontstapler lassen sich grundsätzlich nach den gleichen Kriterien wie Schlepper unterteilen (vgl. Tab. 13 auf S. 45) und weisen damit die gleichen Vor- und Nachteile auf. Im Gegensatz zu Wagen und Schleppern besitzen sie ein Hubgerüst, das eine vertikale Lastbewegung ermöglicht [MARTIN 2016, S. 246]. Zudem bieten sie die Möglichkeit zur Rückwärtsfahrt, sodass Gabelstapler im Vergleich zu Schleppern flexibler hinsichtlich des Layouts, des Arbeitsraumes und der Handhabung von Ladungsträgern sind [KOETHER 2007, S. 41; ARNOLD ET AL. 2008, S. 637 f.].

Als nachteilig gilt die erhöhte Unfallgefahr beim Gabelstaplereinsatz, die durch vermehrten Kreuzungsverkehr, den Transport von großen, sichtbehindernden Ladungsträgern und Rückwärtsfahren entsteht [KLUG 2010, S. 184; BAUDIN 2004, S. 53]. Zudem stellen Rückwärtsfahrten aufgrund der notwendigen Drehung des Oberkörpers für den Fahrer ein gesundheitliches Risiko dar [KLUG 2010, S. 184]. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Transportkapazität (in der Regel ein GLT)⁴⁹. Gabelstapler werden deshalb meist im Direktverkehr – auch Taxi-Prinzip genannt [KLUG 2010, S. 183] – eingesetzt. Der Einsatz in einem Routenverkehr – auch Bus-Prinzip genannt [KLUG 2010, S. 185] – ist somit lediglich für den KLT-Transport denkbar. In diesem Fall muss der Fahrer allerdings bei jeder Be- und Entladung Auf- und Absteigen, was hinsichtlich der körperlichen Belastung und des zeitlichen Aufwands als nachteilig zu bewerten ist.

Da der Gabelstapler im Rahmen von Routenzugsystemen eine nachrangige Rolle spielt, wird im Folgenden nicht näher auf die technischen Leistungsdaten Bezug genommen, sondern diesbezüglich auf die vertiefende Literatur von MARTIN und TEN HOMPEL ET AL. [MARTIN 2016, S. 246 ff.; TEN HOMPEL ET AL. 2007, S. 170 ff.] verwiesen.

Kommissionierer⁵⁰ sind elektrisch angetriebene Gabelhubwagen, die über einen Fahrerstand oder -sitz verfügen und in der Regel bei der Kommissionierung eingesetzt werden [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 47]. Sie verfügen je nach Ausführung über Gabelzinken mit bis zu zwei Palettenplätzen und sind somit für Routenverkehre mit KLT- und GLT-Transporten anwendbar [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 47]. Durch die Hubfunktion kann die Höhe der Gabelzinken angepasst werden, um die Ergonomie bei der Be- und Entladung zu verbessern.

⁴⁸ Auch Gegengewichtstapler genannt [ARNOLD ET AL. 2008, S. 637].

⁴⁹ In der betrieblichen Praxis lässt sich oftmals das Stapeln mehrerer Ladungsträger (z. B. Gitterboxen) beobachten, was letztlich einer Kapazitätserhöhung gleichkommt. Dies erhöht allerdings die Unfallgefahr und widerspricht in der Regel den betrieblichen Sicherheitsvorschriften.

⁵⁰ Auch Niederhubwagen genannt [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 47].

Grundsätzlich wird zwischen Horizontal- und Vertikal-Kommissionierern unterschieden. Bei Vertikal-Kommissionierern ist die Anhebung des Fahrerstandes/-sitzes möglich, sodass der Bediener über mehrere Regalebenen kommissionieren kann [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 47]. Die maximale Tragfähigkeit von Horizontal-Kommissionierern beträgt in der Regel zwischen ca. 500 kg und drei Tonnen, diejenige von Vertikal-Kommissionierern beträgt hingegen zwischen 500 und 1.250 kg. Die maximale Fahrgeschwindigkeit liegt bei ca. 15 km/h im unbeladenen Zustand, der Beladungszustand, die örtlichen Gegebenheiten sowie betriebliche Sicherheitsvorkehrungen begrenzen die maximale Fahrgeschwindigkeit jedoch oftmals auf niedrigere Werte.

Kommissionierer eignen sich vor allem für Routenzugsysteme, bei denen mehrere KLT auf Paletten oder Gestellen transportiert werden. Die Abb. 8 zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Versorgung der LKW-Produktion mit KLT bis maximal 20 kg durch einen Horizontal-Kommissionierer im Mercedes-Benz Werk in Wörth.



Abb. 8: Horizontal-Kommissionierer zur Aufnahme von zwei mit KLT beladenen Gestellen [Mercedes-Benz]

Vorteile von Horizontal- und Vertikal-Kommissionierern sind vor allem die geringen Investitionskosten sowie die flexible Anwendbarkeit durch das Lastaufnahmemittel und die Möglichkeit zur Rückwärtsfahrt. Die Be- und Entladung des fahernahen Stellplatzes mit GLT ist nur möglich, wenn die dahinterliegenden Stellplätze frei sind bzw. wenn diese gleichzeitig Be- und Entladen werden. Die Flexibilität bei der Ver- und Entsorgung von GLT ist somit als gering zu beurteilen. Demgegenüber werden beim KLT-Transport lediglich einzelne Ladungsträger entnommen, weshalb Kommissionierer für diese Aufgabe besonders geeignet sind.

Handwagen verfügen im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Transportmitteln über keinen eigenständigen Antrieb und werden demnach vom Bediener gezogen oder geschoben [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 46]. Unter dem Begriff Handwagen sind z. B. Kommissionierwagen oder Handgabelhubwagen zusammengefasst (vgl. Abb. 9). Kommissionierwagen mit mehreren Ebenen besitzen üblicherweise eine maximale Tragfähigkeit von wenigen hundert Kilogramm. Die maximale Tragfähigkeit von Kommissionierwagen mit Plattform und Handgabelhubwagen kann bis zu zwei Tonnen betragen.

5 Gestaltungsmöglichkeiten



Abb. 9: Kommissionierwagen mit zwei Ebenen (links), Kommissionierwagen mit Plattform (Mitte) und Handgabelhubwagen (rechts) [Fetra; Richter]

Die Vorteile von Handwagen sind die geringen Investitionskosten, der geringe Platzbedarf und die sehr gute Wendigkeit [BAUDIN 2004, S. 52]. Nachteilig ist hingegen die körperliche Belastung durch das Ziehen bzw. Schieben. Aus diesem Grund eignen sich Handwagen vor allem für den Transport von kleinen und leichten Gütern in Routenzugsystemen mit geringen zurückzulegenden Entfernungen zwischen den Bereitstellorten [BRUNGS 2012, S. 66].

Die zuvor beschriebenen Transportmittel sind in ihrer hier dargestellten, ursprünglichen Form **fahrergeführt**, d. h. sie werden von einem Bediener manuell gesteuert. Die **fahrerlosen** Realisierungsformen dieser Transportmittel lassen sich den fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) zuordnen, die durch einen eigenen Fährantrieb, eine automatische Steuerung und eine berührungslose Spurführung charakterisiert sind [VDI 2005, S. 7].⁵¹ Grundsätzlich wird zwischen lastziehenden und lasttragenden FTF unterschieden [VDI 2005, S. 8 ff.; MARTIN 2016, S. 286]. Zu den lastziehenden FTF gehören fahrerlose Schlepper sowie Unterfahrschlepper, die Lasten unterfahren und mittels Verriegelung mitnehmen (z. B. zwecks Rollcontainertransport). Zu den lasttragenden FTF gehören Fahrzeuge mit passiven Lastaufnahmemitteln, bei denen die zu transportierende Last mithilfe eines zusätzlichen Fördermittels auf einer Fläche abgelegt wird (z. B. fahrerloser Wagen mit Plattform), sowie Fahrzeuge mit aktiven Lastaufnahmemitteln, bei denen die Last vom Fahrzeug selbstständig aufgenommen werden kann (z. B. fahrerloser Gabelstapler). Für den vollständig automatisierten Routenverkehr (inkl. Be- und Entladung) eignen sich lediglich fahrerlose Schlepper mit mehreren Anhängern sowie Unterfahrschlepper zum Transport von Regalen (vgl. Abb. 10).

Der Vorteil fahrerloser Transportmittel besteht vor allem in der Verringerung der Personalbindung, wodurch sich die Personalkosten senken lassen [VDI 2005, S. 3; MARTIN 2016, S. 285]. Insbesondere im Mehrschichtbetrieb kann dies zu einer deutlichen Senkung der Betriebskosten führen [MARTINI ET AL. 2014c, S. 13]. Die Nachteile von fahrerlosen Transportmitteln sind die in der Regel sehr hohen Investitionskosten [ERLACH 2010, S. 158], der hohe Steuerungsaufwand [FISCHER 2016, S. 18], die geringe Flexibilität [KOETHER 2007, S. 50 f.] sowie die in der Regel geringe Fahrgeschwindigkeit im Vergleich zu fahrergeführten Transportmitteln.

⁵¹ Da Handwagen keinen eigenen Antrieb besitzen, ist für die fahrerlose Variante eine Nachrüstung erforderlich.



Abb. 10: Fahrerloser Schlepper zum Ziehen mehrerer Anhänger (links) und Unterfahrschlepper zum Transport von KLT in Regalen (rechts) [E&K Automation; ANT-System]

Weiterführende Informationen zu Erscheinungsformen, technischen Details und Sicherheitsbestimmungen von FTF sowie Anwendungsgebieten und Planungsgrundlagen von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) finden sich in den VDI-Richtlinien 2510, 2710 und 4451, der DIN EN 1525 sowie bei ULLRICH [VDI 2005; VDI 1995-2005; VDI 2007-2014; DIN 1986; ULLRICH 2014].

5.1.2.2 Anhänger

Bei der Verwendung von Schlepplügen sind zusätzlich zum Schlepper geeignete Anhänger auszuwählen. Die derzeit am Markt verfügbaren Anhänger lassen sich nach der Tab. 14 in drei Kategorien einordnen [BAERWOLFF 2011, S. 161 ff.], deren Auswahl überwiegend von der Art des verwendeten Ladungsträgers und der zu handhabenden Gewichte abhängt [PANDZHAROVA 2013, S. 11; VDI 2016b, S. 5].⁵²

Beim **Trailer-Konzept** werden die Ladungsträger ohne zusätzliche Trolleys gehandhabt, d. h. Anhänger und Ladungsträger bilden eine Einheit [BAERWOLFF 2011, S. 161]. Zu dieser Kategorie zählen die in der Abb. 11 dargestellten Plattformwagen, Regalwagen sowie Rollenverschiebesysteme, bei denen ggf. zusätzliche Rahmen erforderlich sein können [KEUNTJE 2016, S. 75]. Plattformwagen und Rollenverschiebesysteme eignen sich für GLT-Transporte, wobei zur Be- und Entladung von Plattformwagen ein zusätzliches Förderhilfsmittel notwendig ist. Aus diesem Grund werden die Anhänger meist vom Schlepplügen abgekoppelt und mitsamt dem

⁵² In der einschlägigen Literatur gibt es uneinheitliche Ansätze zur Klassifizierung von Anhängertypen [BRUNGS 2012, S. 28; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 47; KRAUSE, STRAUCH 2013, S. 315]. Die hier gewählte Unterteilung in grundlegende Konzepte sowie konkrete Ausprägungsformen ist sinnvoll, da die in der Praxis häufig eingesetzten Anhängermodelle eindeutig zugeordnet werden können. Die im Folgenden dargestellten Anhängermodelle verdeutlichen lediglich beispielhaft die grundlegenden Anhänger-Konzepte. Eine Standardisierung der am Markt verfügbaren Anhänger gibt es allerdings noch nicht, da die Aufgabenspektren der Unternehmen – und damit die Anforderungen an die Technik – sehr unterschiedlich sind [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 8].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Ladungsträger am Bereitstellort bereitgestellt, was zu erhöhtem Handhabungsaufwand führt [BOSSMANN 2005, S. 27].

Tab. 14: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Anhängern in Routenzugsystemen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>					
Typ	Trailer-Konzept			Taxi-Konzept	Einschub-Konzept	
	Plattformwagen	Regalwagen	Rollenverschiebesystem (ggf. + Rahmen)	Taxiwagen (+ Trolley)	C-/E-/H-/U-Rahmen (+ Trolley)	
Medienversorgung	keine		Hydraulik	Pneumatik	Elektrik	
Be- und Entladeseite	einseitig		zweiseitig (Beladeseite definiert Entladeseite)		zweiseitig (Be- und Entladeseite unabhängig)	
Lenksystem (vgl. VDI-Richtlinie 2406 [VDI 2013, S. 5 ff.])	ungelenkt (einachsrig)	Lenkrollen-Lenkung (1 Achse)	Drehschemel-Lenkung (1 Achse)	Drehschemel-Lenkung (2 Achsen)	Achs-schenkel-Lenkung (1 Achse)	Achs-schenkel-Lenkung (2 Achsen)

Bei sachgemäßer Positionierung von Rollenverschiebesystemen ist demgegenüber kein zusätzliches Förderhilfsmittel zur Be- und Entladung notwendig, es ist allerdings zu beachten, dass an den Bereitstellorten jeweils fest installierte Rollenbahnen erforderlich sind [KEUNTJE 2016, S. 55]. Regalwagen dienen dem KLT-Transport ohne zusätzliche Trolleys. Die in der Höhe verstellbaren Regalebenen ermöglichen eine hohe Transportkapazität und fördern die Übersichtlichkeit bei der Anordnung der Ladungsträger (z. B. Sequenzierung). Nachteilig ist der hohe manuelle Handhabungsaufwand bei der Be- und Entladung.



Abb. 11: Plattformwagen (links), Regalwagen (Mitte) und Rollenverschiebesystem (rechts) [LKE; FEIL]

Beim **Taxi-Konzept** sind zusätzliche Trolleys erforderlich, die über Rampen auf die entsprechenden Wagen geschoben werden (vgl. Abb. 12).⁵³ Taxiwagen eignen sich für den Transport

⁵³ Trolleys unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Rahmengrundmaßes und des Fahrwerkaufbaus, sie dienen aber grundsätzlich der manuellen Handhabung (Ziehen und Schieben) von Ladungsträgern. Da im weiteren

von GLT oder gestapelten KLT, die am Bereitstellort auf Trolleys bereitgestellt werden sollen. Als nachteilig ist das Überwinden von Rampen zu beurteilen, da Ladungsträger vom Trolley fallen können und bei schweren Transportgütern ein hoher Kraftaufwand erforderlich ist. Die Transportkapazität ist im Vergleich zu Regalwagen meist geringer.



Abb. 12: Taxiwagen für KLT-Transport mit geöffneten Rampen zur Be- und Entladung (links) und mit geschlossenen Rampen (rechts) [LKE]

Unter dem Begriff **Einschub-Konzept** sind Anhänger mit sogenannten C-, E-, H- und U-Rahmen zusammengefasst (vgl. Abb. 13).⁵⁴ Die obligatorischen Trolleys werden hierbei seitlich zwischen die Anhängerrahmen geschoben. Handelt es sich um mitrollende Trolleys (Bodenkontakt während der Fahrt), führt dies in der Regel zu einem schnellen Verschleiß der Rollen und einer hohen Lärmentwicklung [BAERWOLFF 2011, S. 163]. Deshalb werden sie während der Fahrt zumeist mithilfe von Hubvorrichtungen vom Boden angehoben. Vorteilhaft bei diesem Konzept ist der geringe Kraftaufwand zur Be- und Entladung, sodass auch schwere GLT auf Trolleys manuell be- und entladen werden können. Nachteilig ist die für das Anheben der Trolleys meist notwendige Medienversorgung der einzelnen Anhänger zu beurteilen, da hierdurch zusätzlicher Wartungsaufwand entsteht. Die Medienversorgung kann gemäß der Tab. 14 **hydraulisch, pneumatisch** oder **elektrisch** sein [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 53].

Ein Nachteil aller Konzepte mit Trolleyeinsatz ist der zusätzliche Aufwand für die Be- und Entladung derselben. Bei der Anhängerauswahl müssen die zusätzlichen Umsetzungsvorgänge berücksichtigt werden [SAILE, WUNDERLICH 2008, S. 50 f.].

Verlauf dieser Arbeit lediglich relevant ist, ob und in welcher Anzahl Trolleys verwendet werden, bleiben Kriterien wie Rollenanzahl, Rollenmaterial usw. unberücksichtigt. Eine Übersicht möglicher Unterscheidungsmerkmale und Merkmalsausprägungen findet sich in [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 105 ff.].

⁵⁴ Die Begriffe werden bei den Anhängerherstellern nicht einheitlich verwendet. Zum besseren Verständnis werden die Anhängertypen in der vorliegenden Arbeit entsprechend ihrer Rahmenform (vgl. Abb. 13) benannt.

5 Gestaltungsmöglichkeiten



Abb. 13: Anhänger mit C- und E-Rahmen zur einseitigen Be- und Entladung (oben) sowie U- und H-Rahmen zur beidseitigen Be- und Entladung (unten) [STILL; Jungheinrich; BeeWaTec]

Die **Be- und Entladeseite** der Anhänger ist im Zuge der Routenplanung von Bedeutung, um unnötige Laufwege bei der Bereitstellung zu verhindern (z. B. Umlaufen des Schleppzugs) [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 49]. Bei C- und E-Rahmen erfolgt die Be- und Entladung stets einseitig. Die Be-/Entladeseite kann hierbei lediglich durch das Drehen der Anhänger im Anhängerverbund beeinflusst werden [UNRUH 2010], weshalb diese Anhängertypen die geringste Flexibilität bei der Routenplanung aufweisen [ZIERHUT 2012, S. 21]. Auch bei der Verwendung von Regalwagen kann die Be- und Entladung einseitig erfolgen, wenn beispielsweise geneigte Regalebenen eingesetzt werden, um die Entnahme der Ladungsträger zu erleichtern. Die zweiseitige Be- und Entladung, bei der die Seite der Beladung auch die Entladeseite vorgibt, ist ein Sonderfall und kommt nur bei der Verwendung von H-Rahmen vor [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 49]. Die zweiseitige Be- und Entladung ist bei Plattformwagen, Rollenverschiebesystemen, Taxiwagen und U-Rahmen in der Regel ohne Einschränkungen möglich, weshalb sie die größtmögliche Flexibilität bezüglich der Routenplanung aufweisen.

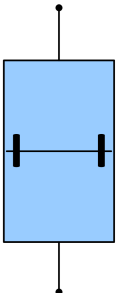
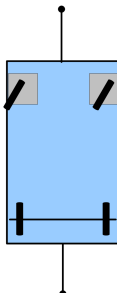
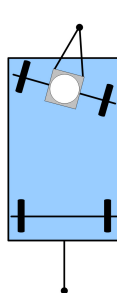
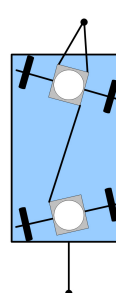
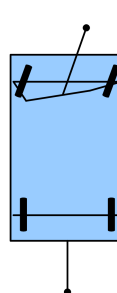
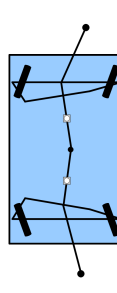
Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Routenzuganhängern sind Lenksysteme [VDI 2013], die in der Regel unabhängig vom Anhänger-Konzept realisierbar sind. In der Tab. 15 sind sechs in der Praxis häufig eingesetzte Lenksysteme dargestellt und einander hinsichtlich wichtiger Auswahlkriterien gegenübergestellt.⁵⁵

Ungelenkte, einachsige Anhänger weisen grundsätzlich ein sehr gutes Nachlaufverhalten [PIEPENBURG ET AL. 2014, S. 1] und eine hohe Wendigkeit auf, sofern die Deichseln starr und

⁵⁵ Aufgrund ihrer aktuell noch geringen Bedeutung im Vergleich zu den aufgeführten Lenksystemen sind beispielsweise Einzelradlenkungen oder universelle selbstlenkende Routenzugachsen [ULRICH ET AL. 2016, S. 37] nicht Gegenstand der Betrachtung.

hinsichtlich der Längen aufeinander abgestimmt sind [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 50]. Vorteilhaft ist auch die einfache Bauweise. Da die Anhänger einzeln nicht standsicher sind (Nicken um die Achse), ist der Einsatz lediglich sinnvoll, wenn die Anhänger im Verbund oder überhaupt nicht vom Schlepper abgekoppelt werden.

Tab. 15: Gegenüberstellung gebräuchlicher Lenksysteme für Routenzuganhänger⁵⁶

<i>Lenksystem</i>	<i>ungelenkt (einachsig)</i>	<i>Lenkrollen- Lenkung (1 Achse)</i>	<i>Drehschemel- Lenkung (1 Achse)</i>	<i>Drehschemel- Lenkung (2 Achsen)</i>	<i>Achs- schenkel- Lenkung (1 Achse)</i>	<i>Achs- schenkel- Lenkung (2 Achsen)</i>
<i>Kriterium</i>						
Komplexitätsgrad der Bauweise	sehr gering	gering	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
Spurtreue	sehr hoch	gering	gering	mittel	gering	sehr hoch
Wendigkeit	hoch	hoch	mittel	gering	mittel	hoch
Ladeflächenhöhe (untere Ebene)	mittel	niedrig	hoch	hoch	niedrig	niedrig
Tragfähigkeit	mittel	gering	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Stabilität	mittel (abgekoppelt, einzeln nicht standsicher)	mittel (bei Fahrt auf unebenen Böden nicht spurtreu)	gering (Kippgefahr bei großem Lenkeinschlag)	mittel (nur bei Lenkeinschlagbegrenzung kipp sicher)	hoch	hoch

Bei der **Lenkrollen-Lenkung** sind die Rollen der Vorderachse unabhängig voneinander drehbar und besitzen keine Verbindung zur Deichsel. Dadurch ist dieses Lenk-System kostengünstig realisierbar und besitzt den Vorteil, dass die Einzelanhänger besonders wendig sind [VDI 2013, S. 7]. Nachteilig wirken sich die geringe Tragfähigkeit und Spurtreue aus, weshalb diese Art der Lenkung nur bei ebenen Böden, geringen Lasten und kurzen Schleppzügen sinnvoll einsetzbar ist.⁵⁷

Die **Drehschemel-Lenkung** besitzt eine oder zwei horizontal drehbare Radachsen. Bei Kurvenfahrten werden die Lenkbewegungen von der fest mit der vorderen Radachse verbundenen Deichsel übertragen [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 50]. Die einachsige Drehschemel-Lenkung

⁵⁶ Beurteilungen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2406 und GÜNTNER ET AL. [VDI 2013, S. 7; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 50].

⁵⁷ HARRIS ET AL. empfehlen Anhänger mit vier frei drehbaren Rollen, weil die dadurch besonders wendig sind und enge Kurvenradien ermöglichen [HARRIS ET AL. 2003, S. 46]. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass die Spurtreue sowie auch die Positionierbarkeit [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 131] aufgrund der fehlenden Seitenführung sehr schlecht ist, weswegen diese Rollenordnung nicht empfohlen wird.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

weist eine robuste, relativ einfache Bauweise auf und besitzt dadurch eine hohe Tragfähigkeit [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 50]. Demgegenüber stehen die geringe Spurtreue und die geringe Stabilität bei großem Lenkeinschlag. Bei der zweiachsigen Variante sind die Radachsen über ein Gestänge miteinander verbunden, sodass bei Kurvenfahrten die Spurtreue durch die gegenläufig lenkende, hintere Radachse verbessert wird. Ein weiterer Vorteil ist die Reduzierung der Kippgefahr bei großem Lenkeinschlag, da dieser meist konstruktionsbedingt begrenzt ist. Nachteile sind die komplexere Bauweise sowie die geringe Wendigkeit. Die Drehschemel-Lenkung ist universell einsetzbar, eignet sich aber aufgrund ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen besonders für Transporte im Außenbereich.

Bei der **Achsschenkel-Lenkung** werden die Räder der Achse einzeln in Abhängigkeit von der Stellung der Deichsel gelenkt. Die Übertragung der Lenkbewegung erfolgt dabei durch ein Lenkstangensystem auf die Radschenkel [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 51]. Die einachsige Achsschenkel-Lenkung weist trotz aufwendiger Bauweise eine geringe Spurtreue und Wendigkeit auf. Demgegenüber besitzt die zweiachsige Achsschenkel-Lenkung eine sehr hohe Spurtreue [PIEPENBURG ET AL. 2014, S. 1] und Wendigkeit bei gleichzeitig sehr hoher Tragfähigkeit, weshalb sie, trotz der sehr komplexen Bauweise, in der Praxis häufiger eingesetzt wird [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 51]. Die Stabilität ist durch die unveränderliche Position der Räder während des Lenkeinschlags jederzeit gewährleistet. Nachteilig wirken sich lediglich der aus der aufwändigen Lenkkonstruktion resultierende hohe Wartungsaufwand sowie die Anfälligkeit gegenüber Verschmutzungen aus. Die zweiachsige Achsschenkel-Lenkung ist universell einsetzbar, eignet sich aber insbesondere für Anwendungsfälle mit langen Routenzügen und hohen Anforderungen an das Nachlaufverhalten (z. B. schmale Fahrwege und enge Kurvenradien) [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 51].

5.1.3 Be- und Entladetechnik

Die technischen Gestaltungsmöglichkeiten bei der Be- und Entladung lassen sich hinsichtlich ihres Automatisierungsgrades kategorisieren, wobei die Be- und Entladevorgänge unabhängig voneinander realisiert werden können [MARTINI ET AL. 2014b, S. 17]. Bei der Verwendung von Trolleys oder Rahmen ist deren Be-/Entladung separat von der Be-/Entladung des Routenzugs zu gestalten (mehrstufige Be-/Entladung). Die Merkmalsausprägungen der unterschiedlichen Be- und Entladevorgänge zeigt die Tab. 16.⁵⁸ Die nachfolgend beschriebenen Realisierungsmöglichkeiten für Beladevorgänge können grundsätzlich auch für die Entladung angewandt werden, weshalb auf die wiederholende Beschreibung verzichtet wird.

⁵⁸ In der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 wird die Unterscheidung zwischen der manuellen oder automatischen Be- und Entladung von Transport- und Transporthilfsmitteln im Rahmen der organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten behandelt [VDI 2016b, S. 7 f.]. Da in der vorliegenden Arbeit auch die technischen Umsetzungsmöglichkeiten der Be- und Entladung aufgezeigt und detailliert beschrieben werden, erfolgt die technikorientierte Einordnung dieser Unterscheidungsmerkmale und Merkmalsausprägungen.

Tab. 16: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Be- und Entladetechnik in Routenzugsystemen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>			
Beladetechnik Routenzug	manuell		automatisch	
	ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)		
Beladetechnik Trolley/Rahmen	kein Trollyeinsatz	manuell		automatisch
		ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	
Entladetechnik Routenzug	manuell		automatisch	
	ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)		
Entladetechnik Trolley/Rahmen	kein Trollyeinsatz	manuell	manuell	automatisch
		mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)		

Die Beladung stellt die Schnittstelle zwischen der Kommissionierung und der Fahrt dar [MARTINI ET AL. 2014b, S. 17], wobei unter Kommissionierung auch das Einsammeln von Fertigwaren bei Entsorgungsprozessen zu verstehen ist. Die **manuelle Beladung von Routenzügen** ohne Hilfsmittel ist lediglich bei der Verwendung von KLT oder dem Minomi-Konzept möglich (vgl. Abschnitt 5.1.1). GLT sind sowohl in Bezug auf die Abmessungen als auch die Gewichte nicht für den manuellen Umschlag ohne Hilfsmittel geeignet. Ihre Handhabung erfordert daher grundsätzlich Hilfsmittel, wie beispielsweise Handhubwagen oder Gabelstapler. Im Vergleich zu Automatisierungslösungen sind vor allem die hohe Flexibilität (z. B. bezüglich der Bereitstelltechnik oder der verwendbaren Ladungsträger), die Fähigkeit schnell auf Änderungen reagieren zu können sowie die geringen Investitionskosten von Vorteil. Demgegenüber stehen die aus dem Personaleinsatz resultierenden Betriebskosten sowie die unter Umständen hohe körperliche Belastung der Mitarbeiter. Ein weiterer Nachteil kann der mögliche Zeitaufwand für das Suchen, Bedienen und Abstellen von Hilfsmitteln sein.

Die **automatische Beladung von Routenzügen** hat u. a. die Reduktion von Personalkosten, die Standardisierung von Prozessen und die Verringerung der körperlichen Belastung der Mitarbeiter zum Ziel [MARTINI ET AL. 2014b, S. 17]. Ergonomische und wirtschaftliche Anforderungen spielen insbesondere vor dem Hintergrund der Erhöhung von Transportfrequenzen und der Verkleinerung der Transporteinheiten eine bedeutende Rolle [GALKA ET AL. 2013a, S. 128; GÜNTNER ET AL. 2013b, S. 56 f.]. Als allgemeine Vorteile der Automatisierung lassen sich die oftmals geringen Betriebskosten, die hohen Bearbeitungs- und Handhabungsgeschwindigkeiten sowie die hohe Verfügbarkeit der Maschinen aufführen [MARTINI ET AL. 2014b, S. 17]. Im Zusammenhang mit Routenzugsystemen sind die Vermeidung von Fehlern bei der Beladung (z. B. Vertauschen von Ladungsträgern) und die Reduktion der körperlichen Belastung als weitere Vorteile zu nennen [DEWITZ ET AL. 2012, S. 237; GALKA ET AL. 2013a, S. 129; FISCHER 2016, S. 18]. So ist es beispielsweise möglich durch Automatisierungstechnik bei der Be- und Entla-

5 Gestaltungsmöglichkeiten

dung auch große und schwere Lasten (z. B. GLT mit 800 kg oder mehr) in den Routenzugprozess einzubinden [FISCHER 2016, S. 18]. Eine automatische Beladetechnik erfordert allerdings oftmals hohe Investitionskosten und ist mit einem hohen Steuerungsaufwand verbunden [FISCHER 2016, S. 18]. Zudem weist sie oftmals eine geringe Flexibilität auf, da sie auf spezifische Anwendungsfälle (z. B. bestimmte Ladungsträgerart) ausgelegt ist.

Die Merkmalsausprägungen, Vor- und Nachteile sowie Eignungen (KLT- oder GLT-Prozess) bei der **Beladung von Trolleys oder Rahmen** entsprechen denen der Beladung von Routenzügen, wobei es sich hierbei um ein optionales Merkmal handelt.

Die technischen Möglichkeiten der Automatisierung sind vielfältig und häufig auf die individuellen Anforderungen im Anwendungsbereich zugeschnitten, weshalb eine umfassende Darstellung von Automatisierungskonzepten nicht möglich ist. Da in der einschlägigen Literatur allerdings auch die speziell für Routenzugsysteme entwickelten Konzepte kaum Beachtung finden, werden im Folgenden einige innovative, routenzugspezifische Be- und Entladekonzepte beispielhaft hinsichtlich ihrer Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile beschrieben.

Für die **automatische Beladung von Routenzügen mit KLT** werden in der Regel Durchlaufregale eingesetzt, bei denen die Ladungsträger auf geneigten Rollenbahnen stehen. Der Aufbau des Routenzugs bzw. Anhängers wird in gleicher Art und Weise realisiert, wobei die Rollenbahnen bei der Übergabe jeweils in Verlängerung zueinander stehen. Es werden somit hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit bei der Anfahrt gestellt [DEWITZ ET AL. 2012, S. 240]. Der Austausch der Ladungsträger erfolgt nach dem Schwerkraft-Prinzip [HALIM ET AL. 2012, S. 1714], nachdem die Arretierungen der Ladungsträger gelöst sind. Auf mechanisierte Lösungen (z. B. angetriebene Rollen oder Teleskopgreifer) wird oftmals verzichtet, da diese zusätzliche Fehlerquellen darstellen und nicht dem Prinzip der „schlanken“ Prozessgestaltung entsprechen [DEWITZ ET AL. 2012, S. 239; AQS 2013, S. 24 ff.]. Die Abb. 14 zeigt ein automatisches Durchlaufregal zur Nachschubversorgung von KLT an einen Montagearbeitsplatz. Die oberen Regalebenen dienen der Bereitstellung von Vollgut, die untere Ebene dient der Übergabe des Leerguts, weshalb diese Rollenbahnen in entgegengesetzter Richtung geneigt sind.

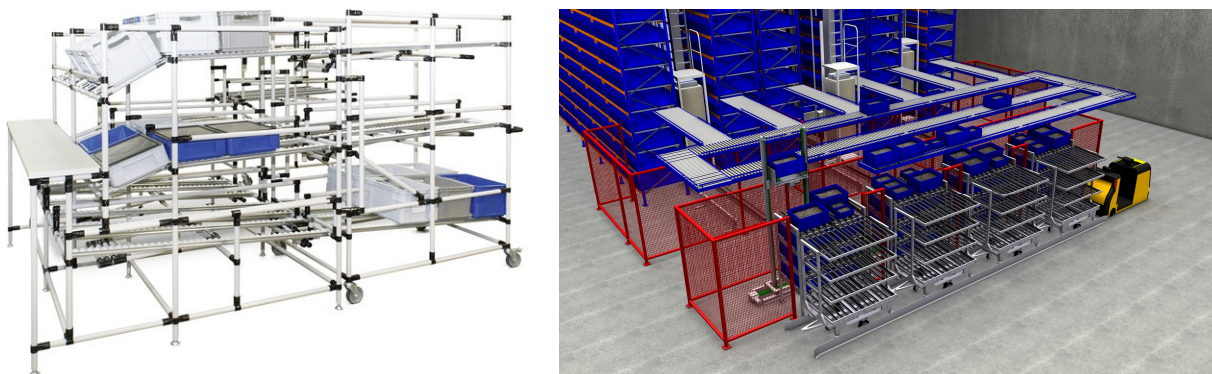


Abb. 14: Routenzug-Anhänger als automatisches Durchlaufregal für KLT (links) und Drive-Thru-Konzept zur automatischen Beladung von Schleppzügen (rechts) [BeeWaTec; fml TUM]

Ein Anwendungsfall für die automatische Beladung von Schleppzügen mit Durchlaufregalen ist das Drive-Thru-Konzept des Lehrstuhls Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München [DEWITZ, GALKA 2012; DEWITZ ET AL. 2012; GALKA ET AL. 2013a]. Hierbei werden zusätzlich zur Beladung die zeitlich vorgelagerte Kommissionierung und die Sequenzierung der Ladungsträger automatisiert. Dies wird durch ein automatisches Kleinteilelager (AKL) sowie eine Vorzone mit entsprechender Förder- und Sortiertechnik realisiert [DEWITZ ET AL. 2012, S. 238]. Ein spezieller Vorteil des Drive-Thru-Konzepts ist die Möglichkeit alle Ladungsträger gleichzeitig zu verladen, wodurch sich die technische Vorlaufzeit⁵⁹ um bis zu 50 % reduzieren lässt [DEWITZ, GALKA 2012, S. 12; GALKA ET AL. 2013a, S. 131]. Dies führt zu einer Verringerung der Wiederbeschaffungszeiten um den gleichen Betrag, was letztlich zu einer Reduzierung der Bestände am Bereitstellort führt [GALKA ET AL. 2013a, S. 131].⁶⁰ Nachteilig wirken sich die Abhängigkeiten zwischen Beladestationen und AKL aus, da die Beladesequenz bereits durch die Reihenfolge der Auslagerungen bestimmt ist. Sind die Ladungsträger erst einmal an die Ladestationen übergeben worden, steht die Zuordnung der Ladungsträger zu Schleppzügen und Anhängern fest, weshalb das Konzept entsprechend unflexibel ist [DEWITZ ET AL. 2012, S. 241]. Ein weiterer Nachteil ist die Reihenfolgeabhängigkeit der Schleppzüge untereinander. Da die Ladungsträger in der Beladestation einem bestimmten Schleppzug zugeordnet sind, führt dessen Verspätung zu Wartezeiten für nachfolgende Schleppzüge [DEWITZ ET AL. 2012, S. 241].

Für die **automatische Beladung von Routenzügen mit GLT** kommen zumeist Umsetzstationen oder in Schleppzuganhänger integrierte Lastaufnahmemittel zum Einsatz [MARTINI ET AL. 2014b, S. 17 f.].⁶¹ Umsetzstationen werden z. B. durch horizontal dreh- oder verfahrbare Lastaufnahmemittel (in der Regel teleskopierbare Gabelzinken) realisiert. Diese können mit einer Vielzahl weiterer Förder- und Handhabungstechnik kombiniert werden, um beispielsweise die vorgelagerte Sequenzierung von Ladungsträgern zu realisieren. Die Abb. 15 zeigt beispielhaft ein Konzept der Fa. M.W.B. zur vollautomatischen Beladung von Schleppzuganhängern mit GLT [MARTINI ET AL. 2014b, S. 18]. Diese werden auf vier Rollenbahnen in Sequenz bereitgestellt, von Hubtischen mit integrierten, teleskopierbaren Gabelzinken aufgenommen und anschließend auf die positionierten Schleppzuganhänger geladen.

Im hier gezeigten Beispiel erfolgt der Abtransport von Leergut mithilfe separater Rollenbahnen auf der zweiten Ebene. Die zusätzlich benötigten Trolleys für den Transport der GLT am Bereitstellort verbleiben auf den Anhängern und werden mit Vollgut beladen. Die Hubtische sind

⁵⁹ Die technische Vorlaufzeit ist diejenige Zeitspanne, die ein automatisches System vom Beginn der Auslagerung für eine Tour bis zu deren Start benötigt.

⁶⁰ Die Wiederbeschaffungszeit umfasst je nach Systemkonfiguration die Transportzeit des Transportmittels (z. B. Zykluszeit bei Nachschubsteuerung mittels Karten-Kanban), Zeiten für vorgelagerte Prozesse (z. B. Auslagerung) und informationstechnische Prozesse (z. B. Übermittlung von Nachschubaufträgen) sowie Liegezeiten des Transportguts (vgl. Abschnitt 6.4.1.3).

⁶¹ Die Beladung eines Transportmittels mithilfe eines zweiten, autonom fahrenden Fördermittels ist theoretisch möglich, besitzt allerdings derzeit keine praktische Relevanz. Beispielhaft kann hierfür das Projekt **marion** (mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten) genannt werden, das als BMWi-Verbundprojekt durchgeführt und im Jahr 2013 abgeschlossen wurde [BMWi 2013, S. 21 f.].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

linear verfahrbar, sodass Reihenfolgeänderungen bis zur Beladung der Anhänger möglich sind. Sind die Ladungsträger bereits in der richtigen Reihenfolge bereitgestellt, lassen sich alle Anhänger zeitgleich beladen, wodurch auch bei diesem Konzept die technische Vorlaufzeit reduziert wird. Von Nachteil sind hingegen der hohe Anteil mechanisierter Komponenten sowie die Notwendigkeit zum Einsatz von Sensoren zwecks Positionierung der Anhänger bzw. Hubtische, weil hierdurch das Ausfallrisiko steigt.

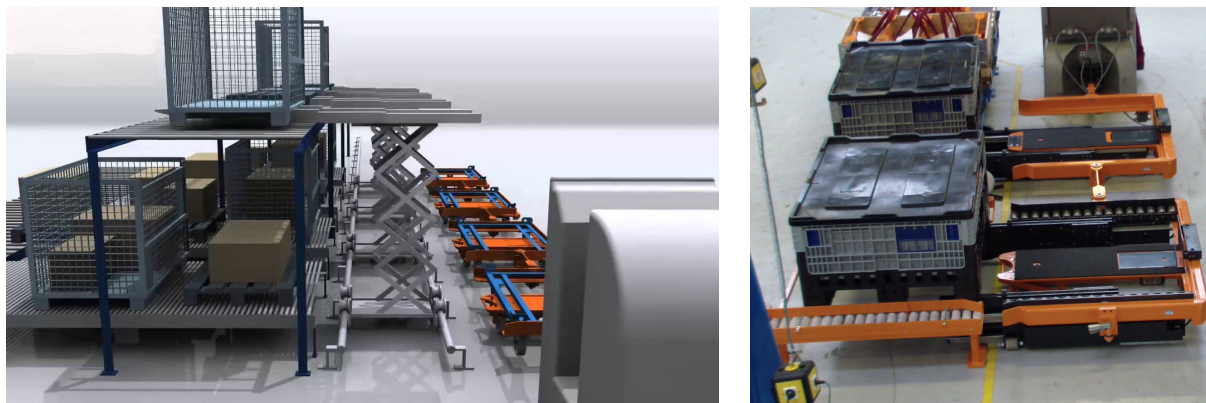


Abb. 15: Vollautomatisches System zur Beladung von Schleppzügen (links) und teilautomatisiertes System zur Beladung von E-Rahmen mit GLT auf Trolleys (rechts) [M.W.B.; LR Intralogistik]

Ein Beispiel für ein in den Schleppzuganhänger integriertes Lastaufnahmemittel zeigt die Abb. 15. Hierbei handelt es sich um den von der Fa. LR Intralogistik umgebauten E-Rahmen (STILL), der um ein teleskopier- und anhebbares Lastaufnahmemittel erweitert wurde [LR INTRALOGISTIK 2014]. Zur Beladung eines Schleppzugs wird dieser zunächst mithilfe eines Laserpointers und entsprechenden Bodenmarkierungen vom Fahrer vor den Beladestationen positioniert. Über das am Schlepper montierte Bedienelement kann der Fahrer die Lastaufnahmemittel der Anhänger einzeln steuern. Die in den Beladestationen bereitgestellten GLT (mit oder ohne Trolleys) bis zu 1.000 kg werden automatisch angehoben und in die E-Rahmen gezogen. Dieser Vorgang dauert ca. 25 s [LR INTRALOGISTIK 2014]. Da der Fahrer die Bedienung der Lastaufnahmemittel übernimmt, handelt es sich um ein teilautomatisiertes Beladesystem [MARTINI ET AL. 2014b, S. 18].

Vorteilhaft bei diesem Konzept ist die individuelle Steuerung der Beladevorgänge je nach Bedarf, wodurch das System im Vergleich zum zuvor beschriebenen vollautomatischen Konzept flexibler ist. Durch die Möglichkeit mehrere Anhänger simultan beladen zu können, lassen sich kurze Umschlagszeiten pro Schleppzug realisieren. Da die notwendige Fläche für die Bewegung des Fahrers oder Logistikers entfällt, können die Fahrwege bzw. Haltepunkte schmäler ausgeführt sein als bei der manuellen Beladung. Demgegenüber erhöht sich in der Regel der Flächenbedarf pro Haltepunkt in der Länge aufgrund des parallelen Anfahrwegs zwecks Positionierung [FISCHER 2016, S. 14]. Die erforderliche Positioniergenauigkeit des Schleppzugs ist dabei als nachteilig zu werten, ebenso wie der hohe Mechanisierungsanteil.

Die **automatische Beladung von Trolleys oder Rahmen** kann beispielsweise durch Umsetzstationen gemäß der Abb. 16 erfolgen. Zu sehen ist ein horizontal drehbares Lastaufnahmemittel (Gabelzinken) mit Hubfunktion, das die auf einer Rollenbahn bereitgestellten GLT auf Trolleys lädt. Die GLT werden dazu angehoben, das Lastaufnahmemittel dreht sich in Richtung Beladestation und setzt den GLT auf den bereitgestellten Trolley. Der beladene Trolley wird anschließend von einem Mitarbeiter durch einen leeren Trolley ersetzt und der Vorgang beginnt von vorne. Die im Beispiel abgebildeten hinteren Rollenbahnen dienen als Puffer, um z. B. Reihenfolgeänderungen der Ladungsträger vornehmen zu können. Vorteilhaft ist die Tatsache, dass der Mitarbeiter während des Beladevorgangs andere Tätigkeiten ausüben kann, wodurch sich unter Umständen auch die technische Vorlaufzeit reduzieren lässt. Von Nachteil ist lediglich das Ausfallrisiko aufgrund verwendeter Sensoren, Sicherheitseinrichtungen und mechanisierter Komponenten.



Abb. 16: Umsetzstation zur automatischen Beladung von Trolleys mit GLT [M.W.B.]

5.1.4 Bereitstelltechnik

Die Materialbereitstellung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3), für die Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen sind allerdings die Auswirkungen von bereitstelltechnischen Anforderungen auf Routenzugprozesse relevant (z. B. Be- und Entladezeit in Abhängigkeit von der Bereitstelltechnik). Zudem dient das Merkmal bzw. die Merkmalsausprägungen der Konsistenzprüfung im Rahmen der Bewertung eines Routenzugsystems im Excel-Tool (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Hinsichtlich der Merkmalsausprägungen wird gemäß der Tab. 17 kategorisch zwischen der Boden- und Regallagerung sowie der Lagerung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln unterschieden [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 147].⁶²

Im Folgenden wird zwischen der Bereitstellung an der Quelle und der Bereitstellung an der Senke differenziert. Hierbei ist jeweils die direkte Quelle bzw. Senke aus Sicht des Routenzugs

⁶² Weiterführende Informationen zum Thema Materialbereitstellungsplanung, insbesondere im Rahmen der Montage, finden sich in [BULLINGER, LUNG 1994; NYHUIS ET AL. 2006; BOPPERT 2008, S. 65 ff.; KLUG 2010, S. 167 ff.] bzw. zum Thema Lagertechnik in [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 143 ff.; SCHULTE 2009, S. 227 ff.; MARTIN 2016, S. 371 ff.].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

gemeint. Im Fall der Abholung von im Lager vorkommissionierten und auf einer Pufferfläche bereitgestellten Anhängern ist die direkte Quelle beispielsweise die Pufferfläche, nicht das Lager. Im Fall der Belieferung eines Supermarktes aus einem Zentrallager mittels Routenzug ist die direkte Senke der Supermarkt, nicht die im darauffolgenden Prozess zu versorgenden Bereitstellorte.⁶³

Tab. 17: Klassifizierung der Bereitstelltechnik an Quellen und Senken in Anlehnung an JÜNEMANN ET AL. [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 147]

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Bereitstellung Quelle	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Palettenregal, AKL, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/ Transporthilfsmitteln
Bereitstellung Senke	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Fachbodenregal, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/ Transporthilfsmitteln

Die **Bodenbereitstellung** erfolgt in Block- oder Zeilenlagern ohne Regaltechnik [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 147]. Die Güter werden hierbei, u. a. in Abhängigkeit von deren Eigenschaften oder den verwendeten Ladungsträgern, ungestapelt oder gestapelt direkt auf dem Boden abgestellt. Vorteile der Bodenbereitstellung sind insbesondere die geringen Investitionskosten sowie die hohe Flexibilität bezüglich der örtlichen Gegebenheiten [SCHULTE 2009, S. 233; TEN HOMPEL, SCHMIDT 2010, S. 74]. Nachteilig sind u. a. die begrenzte Stapelhöhe, die Anwendung des LIFO-Prinzips (Blocklager) und der geringe Raumnutzungsgrad (Zeilenlager) [MARTIN 2016, S. 376; TEN HOMPEL, SCHMIDT 2010, S. 74 f.].

Die Ausführungsvarianten bei der **Regalbereitstellung** sind vielfältig und im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig darstellbar. Grundsätzlich wird zwischen der statischen (Güter verbleiben zwischen der Ein- und Auslagerung an einem Platz) und dynamischen Bereitstellung (Güter werden zwischen der Ein- und Auslagerung bewegt) unterschieden [GUDEHUS 2012, S. 717 ff.]. Übliche Regalarten der ersten Gruppe sind z. B. Palettenregale, AKL oder Fachbodenregale. Zur zweiten Gruppe zählen z. B. Durchlaufregale oder Umlaufregale. Allgemeine Vorteile der Regalbereitstellung sind die gute Höhenausnutzung, die Umsetzbarkeit geforderter Strategien (z. B. FIFO-Prinzip), die Möglichkeiten zur Automatisierung sowie der hohe Raumnutzungsgrad [SCHULTE 2009, S. 235 ff.; TEN HOMPEL, SCHMIDT 2010, S. 76]. Die wesentlichen Nachteile sind die zum Teil hohen Investitionen und die geringe Flexibilität bezüglich der örtlichen Gegebenheiten [SCHULTE 2009, S. 240; MARTIN 2016, S. 376].

Bei der **Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln** werden die Güter entweder am Bereitstellort auf abgekuppelten Anhängern (bei Schleppzugsystemen) oder auf Transporthilfs-

⁶³ Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Systemgrenzen in Routenzugsystemen nicht einheitlich definiert werden können (vgl. Abschnitt 1.3).

mitteln bereitgestellt (z. B. Bereitstellen von Ladungsträgern auf Trolleys). Zu den Transporthilfsmitteln zählen im Verständnis dieser Arbeit auch an den Bereitstellorten fest installierte Rollenbahnen bei der Verwendung von Rollenverschiebesystemen [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 52]. In beiden Fällen erfüllt das Routenzugsystem zusätzlich die Funktion Lagerung (vgl. Abschnitt 1.3). Vorteilhaft bei dieser Bereitstellungsart ist die kurze Umschlagszeit, vor allem, wenn mehrere Ladungsträger/Güter an einem Bereitstellort bereitgestellt werden (z. B. gestapelte KLT auf Trolley). Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit GLT auch ohne zusätzliches Förderhilfsmittel bereitstellen zu können. Ein Nachteil ist die hohe Investitionsbelastung aufgrund der zusätzlich benötigten Anhänger bzw. Transporthilfsmittel. Die Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln eignet sich daher insbesondere für Anwendungsfälle, bei denen lediglich wenige Pufferplätze am Bereitstellort genutzt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich beispielsweise bei der Bereitstellung von Teile-Sets an Montagelinien mit sehr hoher Teile-Variantenvielfalt (z. B. Automobilendmontage) [SCHMIDT 2012, S. 20 f.].

5.1.5 Informationstechnik

Die Informationstechnik umfasst die Hard- und Software zur Erfüllung der Informationsflussfunktionen Eingeben, Speichern, Verarbeiten, Übermitteln und Ausgeben [SCHULTE 2009, S. 67]. Die technischen Realisierungsmöglichkeiten in diesem Bereich sind vielfältig, sollen in dieser Arbeit aber nicht detailliert behandelt werden.⁶⁴ Für die Planung von Routenzugsystemen ist vor allem die Übermittlung von Bedarfsinformationen relevant, weil die dafür benötigte Dauer die Wiederbeschaffungszeiten beeinflusst (vgl. Abb. 18 auf S. 81). Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang der technische Informationsträger⁶⁵, der unmittelbar von der Ausprägung des gewählten Materialflusssteuerungsprinzips⁶⁶ (vgl. Abschnitt 5.2.2) abhängt.

Grundsätzlich lässt sich der Materialfluss nach Bedarf oder nach Verbrauch steuern [BULLINGER, LUNG 1994, S. 15 ff.; MARTIN 2016, S. 23].⁶⁷ Bei der Bedarfssteuerung wird die Information bezüglich eines notwendigen Transports von der zentralen Fertigungssteuerung ausgehend vom Produktionsplan übermittelt. Hierbei kann der Computer als Informationsträger bezeichnet werden. Bei der Verbrauchssteuerung sind es hingegen die jeweiligen Senken im System (z. B. Montagestationen), die auf der Basis des tatsächlichen Verbrauchs die Transportaufträge auslösen. Diese Steuerung basiert auf dem Kanban-Prinzip, dessen Erscheinungsformen getrennt

⁶⁴ Weiterführende Informationen zum Thema Informationstechnik finden sich u. a. in [ARNOLD ET AL. 2008, S. 789 ff.; SCHULTE 2009, S. 65 ff.].

⁶⁵ Technischer Informationsträger: Technisches Mittel zur Übertragung und Speicherung von Informationen.

⁶⁶ In der Literatur wird insbesondere bei der Materialbereitstellungsplanung der Begriff „Art der Bereitstellung“ verwendet [BULLINGER, LUNG 1994, S. 17; HARTEL, LOTTER 2012, S. 294 f.; GOLZ 2014, S. 32]. Um den Bezug zu der Transportbedarfsauslösung und der Steuerungsfunktion darzustellen, wird in dieser Arbeit der Begriff Materialflusssteuerungsprinzip synonym verwendet.

⁶⁷ Die Beschreibungen hier und im Folgenden beziehen sich auf die Versorgung von Bereitstellorten mit Materialien. Für den Entsorgungsfall müssen die Begriffe „Quelle“ und „Senke“ getauscht werden und der Verbrauch von Materialien als „Verbrauch“ von Fertigwarenstellplätzen interpretiert werden.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

voneinander zu betrachten sind [WILDEMAN 1996, S. 63]. Entsprechend sind die technischen Informationsträger gemäß der Tab. 18 zu unterscheiden.

Tab. 18: Klassifizierung technischer Informationsträger bei der Übermittlung von Bedarfsinformationen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>				
Technischer Informationsträger	keiner (Signal-Kanban)	Karte (Karten-Kanban)	Behälter ⁶⁸ (Behälter-Kanban)	Computer (e-Kanban)	Computer (Produktionsplan)

Beim Karten-Kanban wird der Bedarf einer Senke durch die Übergabe einer **Karte** mit Informationen, wie z. B. Material-Nr., Materialbezeichnung, Nachschubmenge oder Bereitstellort [WILDEMAN 1996, S. 68], an die jeweilige Quelle signalisiert. Die Informationsübermittlung beginnt in diesem Fall erst, wenn die Karte von dem für die Versorgung zuständigen Mitarbeiter aufgenommen wird, d. h. die Entstehung des Bedarfs und die Bedarfsübermittlung fallen in der Regel zeitlich auseinander. Vorteile von Kanban-Systemen mit Karten sind insbesondere die geringen Investitionskosten und die einfache Handhabung (platzsparend bei Transport und Lagerung) [HARRIS ET AL. 2003, S. 54; SCHÜRLE 2009, S. 237]. Es besteht allerdings das Risiko, dass die Karten verloren gehen können [DICKMANN 2009, S. 406]. Dieses Risiko kann durch die Verwendung von **Behältern** als Informationsträger reduziert werden, da Behälter weniger leicht verloren gehen als Karten [SCHÜRLE 2009, S. 237]. Der Aufwand für Umschlag, Transport und Lagerung ist gegenüber dem Karten-Kanban allerdings höher [SCHÜRLE 2009, S. 237]. Sowohl beim Karten- als auch beim Behälter-Kanban muss sichergestellt sein, dass regelmäßig überprüft wird, ob Bedarfe vorliegen [ICHIKAWA 2009, S. 2277].

Soll auf die Übermittlung von Karten oder Behältern verzichtet werden, bietet sich die Steuerung mittels elektronischem Kanban (kurz: e-Kanban) an [SCHULTE 2009, S. 426]. Hierbei wird die Bedarfsinformation der Senke auf elektronischem Wege zur Quelle übermittelt, was dazu führt, dass der Zeitpunkt der Entstehung des Bedarfs an der Senke mit dem der Bedarfssignalisierung an der Quelle nahezu übereinstimmt. In diesem Fall ist der **Computer** als Informationsträger zu verstehen. Die wesentlichen Vorteile von e-Kanban sind, zusätzlich zur Wiederbeschaffungszeitverkürzung⁶⁹, die Reduzierung des Handhabungs-, Transport- und Lageraufwands [SCHÜRLE 2009, S. 237], die Möglichkeit zur schnellen Überbrückung räumlich weit entfernter Quellen und Senken sowie die Anbindung an existierende EDV-Systeme z. B. zwecks Fortschrittkontrolle oder Monitoring [WILDEMAN 1996, S. 80]. Nachteilig sind vor allem die im Verhältnis zu anderen Kanban-Systemen hohen Investitionen in EDV-Systeme,

⁶⁸ Da sich in der Literatur der Begriff „Behälter-Kanban“ etabliert hat, wird hier der Begriff „Behälter“ synonym zu „Ladungsträger“ verwendet (vgl. Abschnitt 5.1.1).

⁶⁹ Mit der Wiederbeschaffungszeitverkürzung geht in der Regel die Reduzierung der Pufferbestände in der Produktion einher, da die Bestandsreichweiten reduziert werden können. Auf den Einfluss des Materialflusssteuerungsprinzips auf die Wiederbeschaffungszeiten in Routenzugsystemen wird in Abschnitt 5.2.6 detailliert eingegangen.

die schlechtere Visualisierung des Materialflusses [DICKMANN 2009, S. 407] und Bestands [LIKER, MEIER 2006, S. 211] sowie die geringere Transparenz hinsichtlich der Erkennung von Fehlern [DICKMANN 2009, S. 407].

Erfolgt die Übermittlung von Bedarfsinformationen mittels **Computer** anhand eines Produktionsprogramms, sind die Bedarfsmengen und -zeitpunkte bereits im Voraus bekannt, sodass Wiederbeschaffungszeiten keine Rolle spielen, sofern die Materialien in ausreichender Menge vorgehalten werden. Des Weiteren sind geringe Investitionen notwendig, da an den jeweiligen Senken keine EDV-Systeme erforderlich sind. Weitere aus dem Materialflusssteuerungsprinzip resultierende Vor- und Nachteile werden im Abschnitt 5.2.2 behandelt.

Die Anwendung von Signal-Kanban⁷⁰ benötigt **keine zusätzlichen technischen Informationsträger** für die Signalübermittlung. Hierbei dienen leere Stellplätze oder Meldebestandsmarkierungen als Information [WIENDAHL 1999, S. 14–87]. Befinden sich Quelle und Senke in unmittelbarer Nähe zueinander, ist dies die einfachste und am wenigsten störungsanfällige Kanban-Variante [LÖDDING 2008, S. 183 f.; SCHÜRLE 2009, S. 238]. Besteht zwischen der Senke und der Quelle keine Sichtverbindung oder erfolgt die Bedarfsauslösung „auf Zuruf“, dient der Mensch als Informationsträger. Diese Variante ist die fehleranfälligste Form der Informationsübermittlung, weshalb die Anwendung nicht empfohlen wird.⁷¹

5.2 Organisation

5.2.1 Primäre Transportaufgabe

Routenzugsysteme lassen sich hinsichtlich ihrer primären Transportaufgabe gemäß der Tab. 19 unterscheiden [VDI 2016b, S. 5], wobei sich der Zusatz „primär“ auf die mit dem Routenzugsystem zu erfüllende Hauptfunktion, z. B. die Materialversorgung einer Montagelinie, bezieht. Die damit einhergehenden zusätzlichen Funktionen, z. B. der Tausch von Vollgut gegen Leergut und dessen Transport zum Leergutlager, werden als sekundäre Transportaufgaben bezeichnet.

Tab. 19: Klassifizierung der primären Transportaufgabe in Routenzugsystemen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Primäre Transportaufgabe	Versorgung	Entsorgung	Ver- und Entsorgung

In der Praxis ist die häufigste Form die **Versorgung** von mehreren Senken aus einer Quelle, z. B. im Zuge der Belieferung von Montagestationen einer Montagelinie mit Materialien aus einem Lager [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 16]. Die **Entsorgung** weist demgegenüber mehrere

⁷⁰ Synonym verwandter Begriff: Sicht-Kanban [LÖDDING 2008, S. 183; SCHÜRLE 2009, S. 238].

⁷¹ Weiterführende Informationen zu Vor- und Nachteilen, Eignungen, Funktionsweisen und der Dimensionierung von Kanban-Systemen finden sich u. a. in [WILDEMAN 1996; WIENDAHL 1999, S. 14-84 ff.; LÖDDING 2008, S. 177; SCHÜRLE 2009, S. 227 ff.].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Quellen auf, von denen aus Material zu einer Senke transportiert wird, z. B. beim Abholen von Fertigwaren von verschiedenen Fertigungsstationen und Bereitstellen an einer zentralen Verpackungsanlage [BAUM 2012].⁷² Die grundlegende Vorgehensweise bei der Gestaltung und Dimensionierung von reinen Ver- bzw. Entsorgungssystemen ist identisch (vgl. Abschnitt 6.4).

Die gemischte **Ver- und Entsorgung** kommt z. B. bei der Werkstattfertigung vor, wenn Fertigungsbereiche sowohl Senken (Belieferung mit Materialien) als auch Quellen (Weitertransport zu anderen Fertigungsbereichen nach der Bearbeitung) darstellen. In diesem Fall ist der Materialfluss in der Regel umfangreicher und aufgrund ungerichteter Transportbeziehungen komplexer als in den beiden erstgenannten Fällen [WECK 1999, S. 10–11]. Bei der Dimensionierung solcher Systeme ergibt sich zudem die Schwierigkeit, dass der resultierende Ressourcenbedarf insbesondere davon abhängig ist, zu welchem Zeitpunkt die einzelnen Transportaufträge auf einer Route anfallen. Da allerdings in der Grobplanungsphase in der Regel keine konkreten Aussagen über das Auftreten von Transportaufträgen über die Zeit möglich sind, ist das Planungsergebnis von Prognosen und somit von deren Güte abhängig.

Ob es sich bei der Transportaufgabe um eine Ver- und/oder Entsorgung handelt, ist prinzipiell durch die Materialflussbeziehungen vorgegeben. Sind beide Transportaufgaben zu erfüllen, ist zu entscheiden, ob Ver- und Entsorgungsaufgaben in einem gemeinsamen oder in separaten Routenzugsystemen realisiert werden. Aufgrund der oben genannten Nachteile der Dimensionierung von Systemen mit gemischter Ver- und Entsorgung empfiehlt sich die Umsetzung separater Ver- und Entsorgungssysteme, um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu erhöhen.

5.2.2 Materialflusssteuerungsprinzip

Bereits in Abschnitt 5.1.5 wurden die Begriffe Bedarfs- und Verbrauchssteuerung mit den jeweiligen Ausprägungen eingeführt und beschrieben. Die beiden Prinzipien werden in der Tab. 20 mit Bezug zum Zentralisierungsgrad der Steuerung unterschieden.

Tab. 20: Klassifizierung der Materialflusssteuerungsprinzipien und des Zentralisierungsgrades der Steuerung

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>	
Materialflusssteuerungsprinzip	bedarfsorientiert (zentrales Steuerungssystem)	verbrauchsorientiert (selbststeuernde, dezentrale Regelkreise)

Bei der **bedarfsorientierten Materialflusssteuerung** mit zentralem Steuerungssystem werden die Transporte auf der Basis festgelegter Auftragsmengen und Bearbeitungstermine aller Arbeitsvorgänge ausgelöst [SCHULTE 2009, S. 418]. Für die Durchführung der zentralen Planung

⁷² In diesem Fall könnte eine sekundäre Transportaufgabe beispielsweise darin bestehen, Paletten vom Lager zu den Fertigungsstationen zu transportieren und dort bereitzustellen.

und Steuerung kommt z. B. das Material Requirement Planning (MRP) oder das Manufacturing Resource Planning (MRP II) zum Einsatz [GOLZ 2014, S. 32].

Zwei Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung der bedarfsorientierten Materialflusssteuerung sind aktuelle Rückmeldungen (möglichst in Echtzeit) über die Systemzustände in der Produktion [LAPPE ET AL. 2014, S. 114] und ein exaktes Prozessmodell [SCHULTE 2009, S. 417 f.]. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, können Transporte zeitgenau erfolgen und damit ein geringes Bestandsniveau erreicht werden [GOLZ 2014, S. 40 f.; VEIGT ET AL. 2015, S. 222]. Möglich ist dies insbesondere bei der Versorgung von Produktionslinien mit gleichbleibendem Takt (z. B. JIT/JIS-Versorgung in der Automobilendmontage). Ein weiterer Vorteil ist, dass lediglich die aktuell benötigten Materialien am Bereitstellort vorgehalten werden, was bei großer Variantenvielfalt in einem geringen Platzbedarf resultiert [GOLZ 2014, S. 41]. Von Nachteil ist der hohe Steuerungsaufwand [WILDEMANN 1996, S. 24], die Abhängigkeit von IT-Systemen [GOLZ 2014, S. 41] und die hohe Sensitivität bei Abweichungen vom Produktionsplan. Letzteres führt zu langen Durchlaufzeiten, hohen Beständen und schlechter Termintreue, woraus wiederum Eilaufträge und Planänderungen resultieren [JÜNEMANN ET AL. 1989, S. 25].

Die **verbrauchsorientierte Materialflusssteuerung** überträgt die kurzfristige Steuerungsfunktion in den jeweiligen Produktionsbereich und nutzt selbststeuernde Regelkreise zwischen zwei Produktionsstufen als Steuerungssystem für die Auslösung von Transporten [SCHULTE 2009, S. 425]. Die Verbrauchssteuerung basiert auf der Verwendung einer begrenzten Kanban-Anzahl (pro Regelkreis), durch die eine Überproduktion (Verschwendung im Sinne der „Lean Production“) verhindert werden kann [WILDEMANN 1996, S. 4; OHNO 2009, S. 63]. Der maximale Bestand im Produktionssystem ist somit begrenzt [GOLZ 2014, S. 41] und es wird lediglich diejenige Menge angefordert, die bereits verbraucht wurde [HARRIS ET AL. 2003, S. 53; COIMBRA 2013, S. 77].

Ein großer Vorteil der Verbrauchssteuerung ist die Selbstregulierung [SCHULTE 2009, S. 425] und der damit einhergehende geringe Steuerungsaufwand [WILDEMANN 1996, S. 24; GOLZ 2014, S. 41]. Nachteilig ist die Notwendigkeit zur Bevorratung eines Sicherheitsbestands, um die Wiederbeschaffungszeit zwischen der Bedarfsentstehung (Transportbedarf) und der Bereitstellung zu überbrücken (vgl. Abschnitt 5.2.6) [LÖDDING 2008, S. 199]. Grundsätzlich sind somit alle verbrauchsgesteuerten Materialien am Bereitstellort zu bevorraten [COIMBRA 2013, S. 76].⁷³ Ein weiterer Nachteil ist der Anpassungsbedarf bei Änderungen hinsichtlich der Struktur

⁷³ Die Verbrauchssteuerung wird oftmals mit dem Ziel der Reduzierung von Beständen in Verbindung gebracht. Dies trifft meist nur dann zu, wenn die Voraussetzungen für die Anwendung der Bedarfssteuerung nicht gegeben sind und die dadurch entstehenden Störungen in Bestandserhöhungen resultieren. Bei störungsfreier Umsetzung der Bedarfssteuerung ist das Bestandsniveau in der Regel geringer als bei der Verbrauchssteuerung. Erfolgreiche Umsetzungsbeispiele finden sich z. B. in der Automobilendmontage, in der durch die Anwendung des JIT/JIS-Prinzips variantenreiche Materialien zeitgenau bereitgestellt und so die Bestände am Band begrenzt werden [GOLZ 2014].

(z. B. Arbeitsplatzverlegung) oder der Verbrauchsdaten (z. B. Sortimentsbereinigung) [GOLZ 2014, S. 40 f.].⁷⁴

5.2.3 Auslösung des Transportauftrags

Die Auslösung des Transportauftrags ist eng verbunden mit dem Materialflusssteuerungsprinzip (vgl. Abschnitt 5.2.2) und dem technischen Informationsträger (vgl. Abschnitt 5.1.5). Während das Materialflusssteuerungsprinzip das Steuerungssystem zur Auslösung des Transportauftrags bestimmt und der Informationsträger die Art der Übermittlung des Transportauftrags, geht es bei der Auslösung des Transportauftrags um den Akteur, der den Auftrag auslöst und damit den Transportbedarf signalisiert (vgl. Tab. 21).

Tab. 21: Klassifizierung der Möglichkeiten zur Auslösung des Transportauftrags

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>				
Auslösung des Transportauftrags durch	EDV	Fahrer	Logistiker	Mitarbeiter Produktion	Technisches Hilfsmittel

Bei der bedarfsorientierten Materialflusssteuerung wird ein Transportauftrag automatisch vom **EDV-System** ausgelöst. Der Computer ist der technische Informationsträger. Es gelten die entsprechenden Vor- und Nachteile der bedarfsgesteuerten Materialflusssteuerung (vgl. Abschnitt 5.2.2) und der Informationsübertragung mittels Computer (vgl. Abschnitt 5.1.5).

Bei der verbrauchsorientierten Materialflusssteuerung ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob die Transportauftragsauslösung durch einen Mitarbeiter oder durch ein technisches Hilfsmittel (z. B. Sensor) erfolgt. Im erstgenannten Fall kann entweder der **Routenzugfahrer**, ein **Logistiker** oder ein **Mitarbeiter der Produktion** den Auftrag auslösen [VDI 2016b, S. 5]. Der Vorteil der Auslösung durch den Routenzugfahrer oder einen Logistiker ist die strikte Trennung der Produktion von der Logistik [ERLACH 2010, S. 291]. Der Produktionsmitarbeiter kann sich in diesem Fall ausschließlich auf wertschöpfende Tätigkeiten konzentrieren. Demgegenüber steht der erhöhte Koordinationsaufwand auf der Logistikseite, da sowohl Routenzugfahrer als auch Logistiker Informationen über Materialbedarfe zunächst identifizieren müssen. Löst der Mitarbeiter in der Produktion die Transportaufträge aus, übernimmt er zwar Aufgaben, die i. e. S. der Produktionslogistik zuzuordnen sind [SCHULTE 2009, S. 448], dies hat aber den Vorteil, dass der Materialbedarf umgehend nach der Entstehung in einen Transportauftrag umgesetzt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Auslösung von Transportaufträgen sind **technische Hilfsmittel**. Diese ermöglichen beispielsweise die automatische Auslösung von Transportaufträgen bei Erreichen eines definierten Materialbestands [DICKMANN 2009, S. 404]. Durch Sensoren (z. B.

⁷⁴ Weiterführende Informationen zum Thema Materialbereitstellung finden sich insbesondere in [BULLINGER, LUNG 1994; NYHUIS ET AL. 2006; BOPPERT 2008] bzw. zum Thema Steuerungsverfahren in [LÖDDING 2008].

Lichtschanke), Messsysteme (z. B. Waage) und Identifikationstechnologien (z. B. RFID) können Belegungen von Bereitstellplätzen oder Füllgrade von Ladungsträgern erfasst und Transportaufträge automatisch generiert werden [CARDAUN 2007]. Vorteilhaft ist die sofortige Auslösung des Transportauftrags bei Entstehung eines Bedarfs sowie die Möglichkeit der Einbindung der technischen Hilfsmittel in ein e-Kanban-System, um die Übermittlungszeiten zu reduzieren [CARDAUN 2007, S. 90; DICKMANN 2009, S. 404]. Nachteilig sind die hohen Investitionskosten für die Ausstattung aller Bereitstellorte mit der entsprechenden Technik. Zudem wirken sich Fehler oder Störgrößen sofort auf den Materialfluss aus und werden unter Umständen erst erkannt, wenn das benötigte Material nicht vorhanden ist [DICKMANN 2009, S. 407].

5.2.4 Route

Bezüglich der Routenwahl gibt es meist viele unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten, die maßgeblich vom Layout mit den spezifischen Gegebenheiten (z. B. Fahrwegbreite, Steigungen oder Anzahl und Lage der Bereitstellorte⁷⁵) beeinflusst werden. Da die möglichen Routen vom betrachteten Einzelfall abhängig sind, ist die Darstellung einzelner Routen in einer Morphologie nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Gestaltungsmöglichkeiten zunächst hinsichtlich der Anzahl der Routen, der Festlegung der Route in Bezug auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum sowie den grundlegenden Zuordnungen von Bereitstellorten zu Haltepunkten, Fahrern zu Routen und Routenzügen zu Routen gemäß der Tab. 22 unterschieden.

Tab. 22: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Route in einem Routenzugsystem

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>			
Anzahl der Routen	eine Route		mehrere Routen	
Festlegung Route (in Bezug auf bestimmten Betrachtungszeitraum)	statisch (gleichbleibende Route, unabhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)		dynamisch (Anpassung der Route, abhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)	
Zuordnung (Bereitstellorte:Haltepunkte)⁷⁶	1:1		m:1	
Zuordnung (Fahrer:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n
Zuordnung (Routenzug:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n

Die Anzahl der Routen stellt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal in einem Routenzugsystem dar. Im einfachsten Fall gibt es lediglich **eine Route** (sogenanntes „Einroutensystem“), die alle Quellen und Senken innerhalb der Systemgrenze umfasst [VDI 2016b, S. 6]. Von Vorteil

⁷⁵ Es sei hier vorausgesetzt, dass die Anzahl und Lage der Bereitstellorte sowie auch deren Art (Quelle bzw. Senke) bekannt und unveränderlich sind. Des Weiteren werden die Materialflussbeziehungen zwischen den Quellen und Senken als gegeben vorausgesetzt.

⁷⁶ In Datenmodellen werden die Beziehungen zwischen verschiedenen Entitäten (einzelne Objekte) als Kardinalität bezeichnet. Die Darstellung der Kardinalität erfolgt nach der Chen-Notation, die angibt, wie viele Entitäten eines Typs mit wie vielen Entitäten eines anderen Typs in Beziehung stehen [CHEN 1976, S. 19].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

ist dabei, dass der Planungsaufwand verhältnismäßig gering ist, da die Zuordnung der Bereitstellorte zu Routen entfällt [KILIC ET AL. 2012, S. 1138]. Die Planungsaufgabe beschränkt sich somit auf die Bestimmung eines geeigneten Weges im Layout, unter der Bedingung, dass alle Bereitstellorte angefahren und weitere Restriktionen (z. B. Berücksichtigung von Einbahnstraßen) eingehalten werden. In der Regel ist die Zielstellung das Finden der kürzesten Route bezüglich der Gesamtlänge.⁷⁷ Einroutensysteme eignen sich vor allem für Layouts mit tendenziell kompakten räumlichen Abmessungen, wenigen alternativen Fahrwegen und wenigen Bereitstellorten mit niedrigen Transportfrequenzen.

Routenzugsysteme mit **mehreren Routen** (sogenannte „Mehrroutensysteme“) [VDI 2016c, S. 6] besitzen den Vorteil, dass die zurückzulegenden Strecken verkürzt und die Transportbedarfe pro Route geglättet werden können, da sich Bereitstellorte entsprechend ihrer charakteristischen Eigenschaften (z. B. Lage im Layout oder notwendige Transportfrequenz) zusammenfassen lassen. Als nachteilig ist der erhöhte Planungsaufwand zu beurteilen, weil die Anzahl der möglichen Lösungen tendenziell größer ist als bei lediglich einer Route. Des Weiteren sind die Abhängigkeiten von sich überlagernden Routen zu berücksichtigen und zu bewerten. Dazu zählen beispielsweise die gemeinsame und konkurrierende Nutzung von Ressourcen, wie technischem Equipment, Transportwegen oder Flächen zur Be- und Entladung [VDI 2002, S. 8]. Mehrroutensysteme eignen sich insbesondere für Layouts mit vielen alternativen und langen Fahrwegen und vielen Bereitstellorten mit unterschiedlichen Transportfrequenzen. In der Regel lassen sich in solchen Fällen kürzere Zykluszeiten und in der Folge ein geringerer Fahrzeugbedarf realisieren [KILIC ET AL. 2012, S. 1138].

Die Festlegung der Route in Bezug auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum unterscheidet sich dahingehend, ob die Route gleichbleibend und unabhängig vom tatsächlichen Transportbedarf ist oder ob die Route abhängig vom tatsächlichen Transportbedarf angepasst wird. Im ersten Fall spricht man von statischer Routenplanung, im zweiten Fall von dynamischer Routenplanung [KLUG 2010, S. 186; DROSTE 2013, S. 41].⁷⁸

Bei der **statischen Routenplanung** werden für einen bestimmten Betrachtungszeitraum die Routen festgelegt und die jeweils zugeordneten Bereitstellorte auch dann passiert, wenn keine Be- oder Entladung erforderlich ist [DROSTE 2013, S. 43]. Fixe Routen in Routenzugsystemen sind vergleichbar mit Buslinien im öffentlichen Personennahverkehr [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 346]. Die Grundidee fixer Routen ist die Wiederholung bei unveränderlichen Randbedingun-

⁷⁷ In der Praxis ist die kürzeste Route unter Umständen nicht direkt ersichtlich, vor allem bei komplexeren Wegenetzen mit vielen alternativen Fahrwegen und einer Vielzahl von Restriktionen. Dem Planer stehen für solche Zwecke verschiedene Software-Produkte zur Verfügung, die ihn u. a. bei der Bestimmung der kürzesten Route unterstützen können. Beispiele sind die Produkte Opti-Route der Fa. inpro [INPRO 2013] oder RoutMan der Fa. LOGSOL [LOGSOL 2014].

⁷⁸ Mit direktem Bezug zur Route spricht man auch von „fixen“ und „variablen“ Routen [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 38; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101; MÜLLER 2014, S. 10; STAAB ET AL. 2015, S. 23], weshalb diese Bezeichnungen synonym verwendet werden.

gen mit dem Ziel der Komplexitätsreduzierung, Standardisierung und Erhöhung der Transparenz und [BEASLEY 1984, S. 49; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101; FISCHER 2016, S. 29]. Fixe Routen kommen daher in der Praxis besonders häufig zum Einsatz [KLENK ET AL. 2013, S. 56].

Fixe Routen besitzen den Vorteil, dass der Planungs- und Koordinationsaufwand gering ist, da die Routen lediglich zu Beginn eines bestimmten Betrachtungszeitraumes festzulegen sind [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 346; SAVELSBERGH, GOETSCHALCKX 1995, S. 164]. Für die Mitarbeiter besteht zudem die Möglichkeit der Routinebildung bei der Be- und Entladung sowie der Fahrt, da stets die gleichen Bereitstellorte bedient werden [DROSTE 2013, S. 43; SAVELSBERGH, GOETSCHALCKX 1995, S. 164]. Daraus resultiert ein geringes Risiko hinsichtlich der Anfälligkeit für Fehler (z. B. Lieferung des falschen Materials oder der falschen Menge), wodurch letztlich die Produktivität der Mitarbeiter im Routenzugsystem steigt [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 346]. Zudem sind Abweichungen vom Standard leicht erkennbar [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101].

Ein wesentlicher Nachteil von fixen Routen besteht in der schlechten Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen und in der geringen Flexibilität hinsichtlich der Verwendung von Ressourcen [SAVELSBERGH, GOETSCHALCKX 1995, S. 164; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101]. Bei stark schwankenden Transportbedarfen führen fixe Routen in der Regel zu niedrigen kapazitiven Auslastungen der Routenzüge [KILIC ET AL. 2012, S. 4]. Aus den genannten Gründen eignet sich die statische Routenplanung insbesondere bei geringen Schwankungen der Transportmengen.

Die **dynamische Routenplanung** erfolgt im operativen Betrieb aufgrund anstehender Transportaufträge entweder durch die Fahrer, die die Routen selbst wählen bzw. festlegen oder durch ein IT-System [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101].⁷⁹ Die Routenplanung erfolgt somit in kurzen, meist regelmäßigen Zeitabständen für beispielsweise eine Schicht, einen Tag oder eine Woche [BEASLEY 1984, S. 49; SAVELSBERGH, GOETSCHALCKX 1995, S. 164].

Gegenüber fixen Routen besitzen variable Routen den Vorteil, dass sie in Abhängigkeit von der aktuellen Belastungssituation optimiert werden können [KOPECEK 2013, S. 623]. Die zentrale Zielsetzung ist dabei in der Regel die Minimierung der Transportkosten z. B. durch die Verkürzung von Transportstrecken und die damit verbundene Reduzierung der benötigten Anzahl Routenzüge [BEASLEY 1984, S. 49; SAVELSBERGH, GOETSCHALCKX 1995, S. 163]. Die dynamische Routenplanung führt bei schwankenden und sich kurzfristig verändernden Transportbedarfen zu höheren kapazitiven Auslastungen der Routenzüge [ERIKSSON, HANSON 2008, S.

⁷⁹ Die Routenplanung i. e. S. behandelt die Festlegung von Routen vor dem Start einer Tour. Unter Umständen ist allerdings die Änderung der Routenführung nach dem Tourenstart sinnvoll, wenn beispielsweise während der Fahrt erkennbar ist, dass an einem der Route bisher nicht zugeordneten Bereitstellort doch gehalten werden sollte (z. B. zur Aufnahme von Kanban-Karten oder Mitnahme von Fertigwaren). In dieser Arbeit gilt die Fixierung der Route vor dem Tourenstart als Normalfall, da der gewählte Dimensionierungsansatz dies voraussetzt (vgl. Abschnitt 6.4.1.1).

5 Gestaltungsmöglichkeiten

346]. Variable Routen erlauben zudem das Abkürzen von langen Routen, was zu kürzeren Zykluszeiten und damit einhergehenden zeitlichen Reserven führt sowie Verkehrsbelastungen reduziert [FISCHER 2016, S. 29].

Nachteilig wirkt sich vor allem der hohe Planungs- und Koordinationsaufwand sowie die geringe Transparenz für die Mitarbeiter aus, die sich ständig an die neuen Gegebenheiten anpassen müssen [DROSTE 2013, S. 43]. Damit einher gehen das Risiko von Produktivitätsverlusten und eine höhere Fehleranfälligkeit. Die dynamische Routenplanung eignet sich insbesondere bei stark schwankenden Transportbedarfen [ERIKSSON, HANSON 2008, S. 346], wobei es empfehlenswert ist, die Mitarbeiter durch entsprechende Hilfsmittel zu unterstützen (z. B. Anzeige des Fahrwegs im Cockpit).

In der Praxis kann es vorkommen, dass sich die Transportbedarfe für unterschiedliche Perioden stark unterscheiden, aber innerhalb dieser weitestgehend konstant sind. Das ist beispielsweise der Fall, wenn sich Produktionsprogramme in der Frühschicht und Spätschicht unterscheiden. In solchen Fällen ist es oftmals zweckmäßig die Routen für jede Schicht statisch zu planen. Es entstehen somit mehrere Routenpläne mit fixen Routen für unterschiedliche Belastungssituationen [DOMINGO ET AL. 2007, S. 144; GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 101].

Die **Zuordnung der Bereitstellorte zu Haltepunkten** beeinflusst die Be- und Entladezeiten sowie die Haltepunktzeit am Bereitstellort. Bei der 1:1-Zuordnung besitzt jeder Bereitstellort einen separaten Haltepunkt, d. h. die Anzahl der Haltevorgänge je Tour entspricht im ungünstigsten Fall der Anzahl der Bereitstellorte der Tour [VDI 2016c, S. 9]. In diesem Fall werden die Haltepunkte nach Möglichkeit so gewählt, dass die Laufwege zwischen den Haltepunkten und Bereitstellorten möglichst gering sind, um die Be- und Entladezeiten je Haltepunkt zu reduzieren. Im Gegenzug wirken sich die häufigen Stopps negativ auf die Haltepunktzeit aus, da Nebenzeiten für z. B. Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, das Ab- und Aufsteigen vom bzw. auf den Routenzug oder Orientierungszeiten des Fahrers bei jedem Halt erneut auftreten und die Zykluszeit erhöhen [VDI 2016c, S. 8]. Grundsätzlich eignet sich die 1:1-Zuordnung der Bereitstellorte zu Haltepunkten, wenn die Bereitstellorte räumlich weit voneinander getrennt sind.

Bei der m:1-Zuordnung werden mehrere Bereitstellorte einem Haltepunkt zugeordnet mit dem Ziel, die Anzahl der Haltevorgänge und damit auch die obengenannten Nebenzeiten zu reduzieren [HARRIS ET AL. 2003, S. 48]. Nachteilig wirken sich in diesem Fall die unter Umständen verlängerten Laufwege zu den Bereitstellorten aus sowie der erhöhte Planungsaufwand für die Zusammenfassung mehrerer Bereitstellorte [DUNKLER 2008, S. 18]. Die m:1-Zuordnung eignet sich bei geringen Entfernungen mehrerer Bereitstellorte zueinander. In der Praxis trifft dies oftmals auf die Versorgung von Montagelinien mit KLT zu, wobei pro Halt mehrere KLT in unterschiedlichen Regalen bereitgestellt werden [DUNKLER 2008, S. 18; MARCHWINSKI 2003, S. 6 f.]. Dadurch lässt sich die Anzahl der Haltevorgänge reduzieren ohne die Laufwege signifikant zu erhöhen.

Bezüglich der **Zuordnung der Fahrer zu Routen** sind vier grundsätzliche Fälle zu unterscheiden [VDI 2016b, S. 6 f.]. Ist der Fahrer genau einer Route zugeordnet (1:1), hat dies den Vorteil, dass der Fahrer mit den jeweiligen Gegebenheiten des Fahrwegs, der Bereitstellorte usw. auf der Route vertraut ist. Des Weiteren ist sichergestellt, dass keine weiteren Fahrer auf dieser Route tätig sind, sodass Blockierungen, Staus o. Ä. vermieden werden. Nachteilig sind die geringe Flexibilität bei sich verändernden Transportbedarfen sowie die unter Umständen geringe zeitliche Auslastung der Fahrer [MARTINI 2016, S. 11 ff.].

Ist ein Fahrer für mehrere Routen zuständig (1:n), sind die Anforderungen an den Fahrer größer als im ersten Fall, da er alle Routen und deren Besonderheiten kennen muss. Oftmals ist es allerdings sinnvoll, mehrere Routen in Abhängigkeit vom Layout und den Transportbedarfen zu bestimmen (vgl. Merkmal „Anzahl der Routen“).

Sind mehrere Fahrer einer Route zugewiesen (m:1), dient dies in der Regel der Erhöhung der Transportfrequenzen oder des Transportvolumens auf der Route, falls diese nicht sinnvoll in mehrere kleine Routen geteilt werden kann. Bei vielen Fahrern auf einer kurzen Route sind die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Touren aufgrund der Nutzung der gleichen Fahrwege zu berücksichtigen (z. B. auch die erhöhte Unfallgefahr bei Überholvorgängen).

Wenn mehrere Fahrer für mehrere Routen zuständig sind (m:n)⁸⁰, ist die flexible Anpassung der verfügbaren Personalkapazitäten an die erforderlichen Kapazitäten der Routen vorteilhaft, so dass oftmals weniger Mitarbeiter erforderlich sind und eine hohe zeitliche Auslastung derselben erreicht werden können [CHIKAWA 2009, S. 2279; DEWITZ ET AL. 2014, S. 12; MARTINI ET AL. 2016, S. 27]. Der Koordinationsaufwand ist hingegen hoch, da die Wechselwirkungen zwischen den Routen in der Regel ausgeprägter sind als bei den anderen Zuordnungsarten. Zudem werden hohe Anforderungen an die Kenntnis und Flexibilität der Fahrer gestellt.

Die **Zuordnung der Routenzüge zu Routen** kann nach den gleichen Prinzipien wie die Zuordnung der Fahrer zu Routen erfolgen: „Ein Routenzug kann immer die gleiche Route abfahren (1:1), er kann mehrere Routen abfahren (1:n), mehrere Routenzüge können auf einer Route fahren (m:1) oder sie fahren auf mehreren Routen (m:n).“⁸¹ [VDI 2016b, S. 6 f.] Auch in diesen Fällen sind die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen und Routen ausschlaggebend für die Wahl einer Gestaltungsalternative. Eine Studie der TU München zeigt, dass in ca. 82 % der dort untersuchten Routenzugsysteme die Routenzüge den Routen fest zugeordnet sind [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 40; KLENK ET AL. 2013, S. 56], was auf die einfachere Planung und Koordination im Betrieb zurückzuführen ist.

⁸⁰ In der Praxis werden die 1:n- sowie die m:n-Zuordnung auch als „Mitarbeiter-Poolung“ bezeichnet, da für alle Routen ein Mitarbeiter-Pool zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 6.4.2) [FISCHER 2016, S. 29].

⁸¹ In der Praxis werden die 1:n- sowie die m:n-Zuordnung auch als „Fahrzeug-Poolung“ bezeichnet, da für alle Routen ein Fahrzeug-Pool zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 6.4.2) [FISCHER 2016, S. 29].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Die Zuordnung von Fahrern und Routenzügen zu Routen kann unterschiedlich sein, wenn beispielsweise Fahrer am Ende einer Tour das Fahrzeug wechseln und mit einem bereits vorbeladenen Routenzug die nächste Tour beginnen (vgl. Abschnitt 5.2.6).

5.2.5 Steuerung Tourenstart

Die Steuerung der Tourenstarts auf einer Route kann nach den drei in der Tab. 23 dargestellten Prinzipien erfolgen. Der Startzeitpunkt definiert sich jeweils anhand eines bestimmten Kriteriums (z. B. Zeit oder Menge), wobei die Prinzipien zum Teil in Kombination verwendbar sind.

Tab. 23: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Steuerung von Tourenstarts in Routenzugsystemen

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Steuerung Tourenstart	fester Fahrplan	auslastungsorientiert/ ereignisorientiert	permanent

In der Praxis ist die Steuerung der Touren nach einem **festen Fahrplan** weit verbreitet. In Analogie zur Festlegung von Abfahrtszeiten von beispielsweise Bussen im öffentlichen Personennahverkehr [BAUDIN 2004, S. 68] werden die Abfahrtszeitpunkte von Routenzügen vorgegeben.⁸² Die zu transportierende Materialmenge bzw. Anzahl der Ladungsträger je Tour ist hingegen variabel [DROSTE 2013, S. 38] und davon abhängig, wie viele Transportaufträge bis zum jeweiligen Abfahrtszeitpunkt vorliegen.

Ein Vorteil fester Fahrpläne ist die hohe Transparenz bezogen auf den Systemablauf [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103; LIEBETRUTH 2016, S. 125]. Durch die definierten Abfahrtszeiten ist sowohl für die Fahrer als auch für andere Mitarbeiter (z. B. Produktionsmitarbeiter, Planer oder Führungskräfte [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]) gut vorhersehbar, wann Transporte und Bereitstellungen erfolgen, wodurch das Vertrauen und die Akzeptanz aller Beteiligten gefördert werden [VDI 2016b, S. 7]. Des Weiteren können Standards im Sinne der „Schlanken Logistik“ definiert und Abweichungen von diesen leicht identifiziert werden [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]. Eine notwendige Voraussetzung für die Einhaltung von Wiederbeschaffungszeiten und Fahrplänen ist allerdings das Vorhalten entsprechender Zeit- und Kapazitätsreserven, damit mögliche Schwankungen bei den Transportmengen ausgeglichen und Transportaufträge jeweils auf der nächsten Tour ausgeliefert werden können [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103; VDI 2016b, S. 7]. Bei sehr stark schwankenden Transportmengen pro Tour führen feste Fahrpläne somit zu nennenswerten zeitlichen und kapazitiven Minderauslastungen [SCHLICK ET AL. 2014, S. 64; SCHNEIDER 2016, S. 228] bis hin zu Leerfahrten auf einzelnen Touren [ZIMMERLING, HÖLSCHER 2015, S. 355], weshalb sich dieses Prinzip vor allem bei regelmäßig anfallenden Transportbedarfen, möglichst konstanten Transportmengen und standardisierten Bauteilen eignet [BRUNGS 2012, S. 126; DROSTE 2013, S. 38]. Aufgrund der letztgenannten Kriterien ist

⁸² Die Abfahrtszeitpunkte der Routenzüge sind zwar fest definiert, die Abstände zwischen diesen Zeitpunkten können aber durchaus variieren. So ist es beispielsweise möglich, dass in Zeiten mit hohem Transportbedarf (z. B. Schichtbeginn oder -ende) häufiger auf einer Route gefahren wird.

dieses Steuerungsprinzip in der Regel sinnvoll mit fixen Routen kombinierbar (vgl. Abschnitt 5.2.4) und kommt in dieser Form in der Praxis häufig zum Einsatz [KLENK ET AL. 2013, S. 56].

Ein weiterer Vorteil fester Fahrpläne zeigt sich in Routenzugsystemen mit mehreren Routenzügen, die zum Teil die gleichen Ressourcen nutzen (z. B. Fahrwege oder Be- und Entladeflächen) [KLENK ET AL. 2013, S. 56]. Durch die Staffelung von Fahrplänen ist es u. a. möglich das Verkehrsaufkommen auf bestimmten Streckenabschnitten zu reduzieren und gegenseitige Behinderungen an Bereitstellorten zu vermeiden, was letztlich die Effizienz des Gesamtsystems verbessert [DEWITZ ET AL. 2014, S. 12; DEWITZ ET AL. 2015, S. 17]. Insbesondere wenn Routenzüge zentral be- oder entladen werden, dafür aber nur ein begrenztes Flächen- und Personalangebot zur Verfügung steht, lassen sich durch die zeitliche Abstimmung von Fahrplänen Wartezeiten reduzieren oder gar komplett vermeiden [DEWITZ ET AL. 2015, S. 17; LIEBETRUTH 2016, S. 125].

In sogenannten getakteten Routenzugsystemen werden feste Fahrpläne mit gleichen Abständen zwischen den Abfahrzeitpunkten realisiert (z. B. Tourenstart alle 30 min), wodurch die genannten Vorteile bezüglich Transparenz, Standardisierung und Vorhersagbarkeit stärker ausgeprägt sind. Die Taktung stellt allerdings höhere Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der anfallenden Transportbedarfe hinsichtlich der zeitlichen Verteilung und der Transportmenge pro Intervall, um Rückstellungen und/oder Minderauslastungen vermeiden zu können.⁸³ Aus diesem Grund eignen sich getaktete Routenzüge vor allem in Fällen, in denen ein Produktionstakt vorgegeben ist (Fließfertigung/-montage). Ein in der Literatur häufig behandeltes Beispiel ist die Materialversorgung von Montagelinien in der Automobilindustrie [KLUG 2010, S. 184 ff.; GOLZ 2014; EMDE 2011; DEWITZ ET AL. 2015]. In solchen Fällen sind die Transportmengen je Tour weitestgehend konstant, was letztlich zur Vermeidung des internen Bullwhip-Effekts⁸⁴ führt [KLUG 2010, S. 186].

Bei der **auslastungsorientierten Steuerung** wird eine Tour gestartet, sobald ausreichend Transportaufträge vorliegen, um eine vorgegebene kapazitive Auslastung des Routenzugs sicherzustellen [VDI 2016b, S. 7]. Die zu transportierende Menge je Tour ist in der Regel hoch, die Tourenstarts finden hingegen in ungleichmäßigen Zeitabständen statt (vgl. Abb. 17 auf S. 77). Der Vorteil dieses Prinzips liegt in der hohen zu erreichenden Kapazitätsauslastung der

⁸³ GÜNTNER ET AL. beschreiben als Alternative zur layoutbasierten Dimensionierung ein Verfahren zur Dimensionierung nach einheitlicher Taktung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 116]. Dabei wird erst die Taktzeit definiert und daraufhin werden die Routen durch Hinzufügen von Bereitstellorten festgelegt. Diese Verfahrensweise führt bei Durchsatzänderungen dazu, dass Routen angepasst werden müssen, was oftmals nicht praktikabel ist [DEWITZ ET AL. 2014, S. 7; DEWITZ ET AL. 2015, S. 18]. In der Praxis ist die layoutbasierte Dimensionierung gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 üblich [VDI 2016c], weshalb im Folgenden lediglich dieser Dimensionierungsansatz betrachtet wird (vgl. Abschnitt 6.4.1.1).

⁸⁴ Der Bullwhip-Effekt (deutsch: Peitschenschlageffekt) beschreibt das stufenweise Aufschaukeln der Aufträge über die einzelnen Stufen der Lieferkette in vorgelagerter Richtung [SCHULTE 2009, S. 17]. Bestellungen beim Lieferanten neigen damit zu mengenmäßig größeren Schwankungen als die Bestellungen der Kunden. Dies trifft auch auf die interne Lieferkette zu (z. B. Bestellungen Wareneingangslager ← Bestellungen Supermarkt ← Bestellungen Montagestationen ← Bestellungen Warenausgangslager).

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Routenzüge [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]. Als nachteilig sind schwankende Wiederbeschaffungszeiten aufgrund der ungleichmäßigen Zeitabstände zwischen den Tourenstarts zu beurteilen [SCHNEIDER 2016, S. 228]. Transportaufträge müssen somit unter Umständen lange warten und Abweichungen werden womöglich erst ersichtlich, wenn Materiallieferungen oder -abholungen zu spät erfolgen [SCHNEIDER 2016, S. 228]. Die auslastungsorientierte Steuerung ist bei der Materialentsorgung in der Regel nicht sinnvoll einsetzbar, da der Routenzug beim Tourenstart keine Kapazitätsauslastung aufweist. Bei der Materialversorgung ist dieses Prinzip aufgrund der beschriebenen Nachteile lediglich geeignet, wenn ausreichend Pufferplätze an den Senken vorhanden sind, um schwankende Wiederbeschaffungszeiten ausgleichen oder eine bestimmte Transportmenge pro Zeitintervall sicherstellen zu können. In Kombination mit einer Kanban-Steuerung mittels Karten oder Behältern (vgl. Abschnitt 5.1.5) ist die rein auslastungsorientierte Steuerung nicht geeignet, da sie zu Materialflussabbrissen führen kann.

In der Praxis wird die rein auslastungsorientierte Steuerung aufgrund der oben aufgeführten Nachteile kaum eingesetzt. Stattdessen werden zusätzliche Ereignisse definiert, die eine Tour starten lassen, sobald das Ereignis eintritt (z. B. spätestmöglicher Abfahrzeitpunkt eines Transportauftrags aufgrund von erreichter Sicherheitsbestandsgrenze des Materials) [SCHLICK ET AL. 2014, S. 66; VDI 2016b, S. 7]. Diese sogenannte **ereignisorientierte Steuerung** kommt nur in Kombination mit der auslastungsorientierten Steuerung zum Einsatz, um den oben aufgeführten Nachteilen entgegenzuwirken. Eine Tour wird somit gestartet, sobald eine definierte Auslastungsgrenze des Routenzugs erreicht oder ein definiertes Ereignis eingetreten ist [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39]. Diese Steuerungsart wird in der Praxis selten eingesetzt [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39], obwohl Untersuchungen gezeigt haben, dass dynamische (unregelmäßige) Abfahrzeiten die Anzahl der notwendigen Touren pro Zeiteinheit und die zurückgelegte Wegstrecke deutlich (im Untersuchungsfall um ca. 68 %) reduzieren können [LAPPE ET AL. 2014, S. 116; SCHLICK ET AL. 2014, S. 66 f.; STEPHAN, SCHLICK 2015, S. 377].

Bei der **permanenten Steuerung** startet die nächste Tour direkt nach Beendigung der vorangegangenen Tour. Auf einer Tour werden dabei alle Aufträge transportiert, die bis zu deren Beginn angefallen sind, sofern die Kapazität des Routenzugs ausreichend ist [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39]. Anderenfalls werden Transportaufträge zurückgestellt und auf der nachfolgenden Tour transportiert. Bei diesem Prinzip können sowohl die Zeitabstände zwischen den Tourenstarts als auch die jeweils zu transportierenden Mengen variieren, wodurch Wiederbeschaffungszeiten schwanken und die Transparenz eher gering ist. Dem hohen zeitlichen Nutzungsgrad von Routenzug bzw. Fahrer (100 %) steht die schwankende (im Extremfall zwischen Null und 100 %) und im Durchschnitt tendenziell niedrige Kapazitätsauslastung gegenüber (vgl. Abb. 17). Daher eignet sich die permanente Steuerung lediglich bei hohen Durchsätzen [FISCHER 2016, S. 29]. Zudem eignet sie sich insbesondere in Fällen, in denen keine zeitpunktgenaue Bereitstellung nach Fahrplan erforderlich ist und ein Transportauftrag einen hohen Anteil der Kapazität des Routenzugs in Anspruch nimmt bzw. einen hohen Anteil der Zykluszeit ausmacht. Das ist häufig bei GLT-Prozessen der Fall [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39 f.].

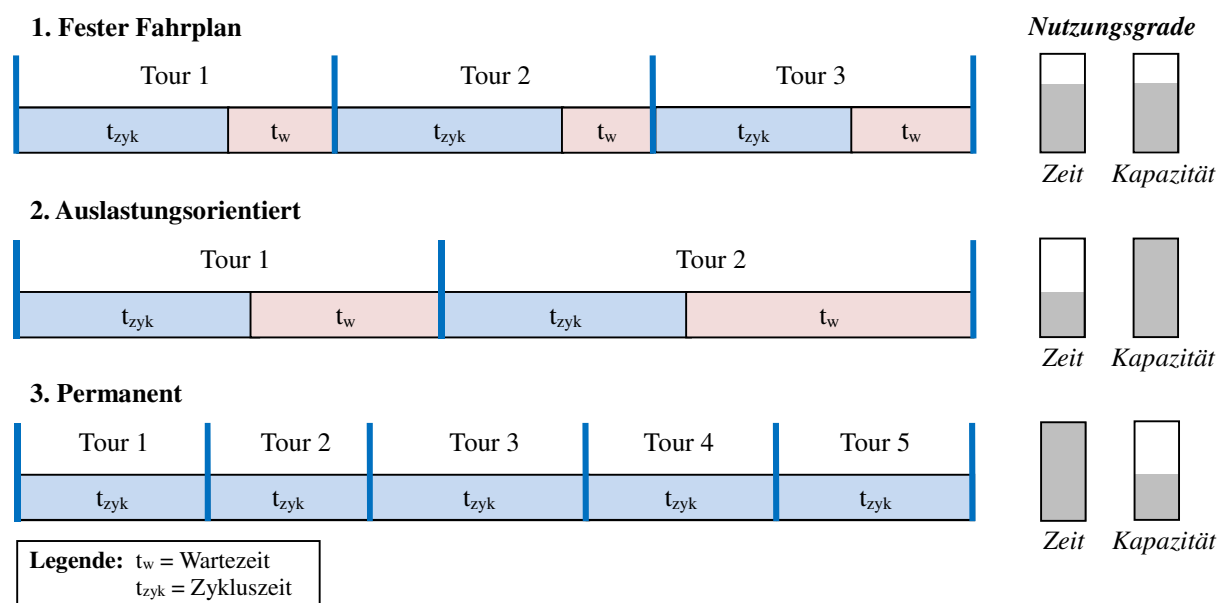


Abb. 17: Prinzipdarstellung der Steuerung von Tourenstarts in Routenzugsystemen

5.2.6 Integration von Be- und Entladung

Die Dauer der einer Tour – und damit der Zykluszeit – zugerechneten Be- bzw. Entladezeit ist maßgeblich davon abhängig, ob die Be- bzw. Entladung vollständig in die Tour integriert ist oder zum Teil von dieser entkoppelt stattfindet.⁸⁵ Grundsätzlich lassen sich die in der Tab. 24 aufgeführten Unterscheidungsmerkmale und deren Ausprägungen unterscheiden.

Tab. 24: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der Integration von Be- und Entladeprozessen in Routenzugsystemen

Unterscheidungsmerkmal	Merkmalsausprägungen	
Integration Beladung	integriert	entkoppelt
Integration Entladung	integriert	entkoppelt

Von **integrierter Beladung** spricht man, wenn der Beladeprozess vollständig der Tour zugeordnet ist, d. h. die gesamte Beladezeit in die Zykluszeit eingeht [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104; HARRIS ET AL. 2003, S. 56].⁸⁶ Die Beladezeit beinhaltet dabei auch den Zeitbedarf für vorgelagerte Kommissionierprozesse inkl. der notwendigen Nebenzeiten (z. B. Suche von Lagerplätzen oder Auspacken von Materialien). Die Integration der Beladung liegt zum Beispiel vor,

⁸⁵ In der Literatur spricht man auch von gekoppelten oder entkoppelten Routenzugsystemen (engl.: coupled/de-coupled routes) [HARRIS ET AL. 2003, S. 56; CIEMNOCZOŁOWSKI 2007, S. 6; MARCHWINSKI 2003, S. 7; DROSTE 2013, S. 39 ff.; ALNAHHAL ET AL. 2014, S. 89 ff.; HARRIS, HARRIS 2014, S. 2]. Um einen eindeutigen Bezug herzustellen, wird im Folgenden von der Integration oder Entkopplung der Be-/Entladung gesprochen.

⁸⁶ Handelt es sich bezüglich der primären Transportaufgabe um eine Entsorgung, ist die Beladung an den Bereitstellorten (z. B. Fertigungsinseln) stets als Teil der Tour anzusehen. Eine entkoppelte Beladung ist in diesem Fall nicht sinnvoll umsetzbar. Diese Kombinationsmöglichkeiten von Gestaltungsalternativen schließen sich entsprechend aus. Analog dazu lässt sich die entkoppelte Entladung an den Bereitstellorten (z. B. Montagestationen) bei Versorgungsaufgaben ausschließen.

5 Gestaltungsmöglichkeiten

wenn der Routenzugfahrer die Transportgüter aus einem Lagerbereich selbst kommissioniert, diese auf seinen Routenzug lädt und anschließend die Fahrt entlang der Route beginnt.⁸⁷

Der Vorteil der integrierten Beladung ist die Unabhängigkeit des Tourenstarts von vorgelagerten Prozessen aufgrund der geschlossenen Prozesskette. Dadurch wird die Transparenz im Hinblick auf die Abhängigkeit der Zykluszeit von der Beladezeit erhöht. Dies reduziert wiederum die Planungskomplexität sowie den Koordinationsaufwand im Betrieb [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Sofern es sich um einen fahrergeführten Routenzug handelt, sind die durchgängige Verantwortlichkeit des Routenzugfahrers für alle Prozesse einer Tour und der gemeinsame Material- und Informationsfluss ebenfalls als Vorteile zu sehen.

Der wesentliche Nachteil der integrierten Beladung ist die hohe sich ergebende Zykluszeit je Tour aufgrund des Zeitbedarfs für die Kommissionier- und Beladevorgänge. Dies wirkt sich bei einer verbrauchsgesteuerten Materialflusssteuerung unter Umständen verlängernd auf die Wiederbeschaffungszeiten aus, was wiederum höhere Bestandsreichweiten – und damit höhere Bestände – erfordert, da die Transportfrequenzen auf der Route sinken. Sind die notwendigen Transportfrequenzen je Route fix, weil beispielsweise die Bestände an den Bereitstellorten nicht erhöht werden können, sind ggf. zusätzliche Touren und damit zusätzliche Routenzüge und Fahrer erforderlich [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Daraus resultiert allerdings ein weiterer Nachteil, wenn mehrere Routenzüge den gleichen Kommissionierbereich verwenden; z. B. kann es in schmalen Regalgassen zu gegenseitigen Behinderungen oder Blockaden kommen [CIEMNOCZOŁOWSKI 2007, S. 6]. Des Weiteren erhöht sich das Verkehrsaufkommen im Produktionsumfeld. Ebenfalls nachteilig wirkt sich die unter Umständen hohe Anzahl der Handhabungsvorgänge auf die körperliche Belastung des Fahrers aus [BOZER, CIEMNOCZOŁOWSKI 2013, S. 557].

Die integrierte Beladung eignet sich insbesondere, wenn die notwendigen Transportfrequenzen verhältnismäßig gering sind und die Zykluszeit nicht der leistungslimitierende Faktor des Systems ist. Die Anzahl der aus einem Kommissionierbereich bedienten Routenzüge sollte möglichst gering sein, um gegenseitige Behinderungen zu vermeiden [KLENK ET AL. 2015, S. 1882]. Ist zudem die Anzahl und Intensität der Handhabungsvorgänge unkritisch hinsichtlich der körperlichen Belastung des Fahrers, ist die integrierte Beladung aufgrund des geringen Planungs- und Koordinationsaufwands zu empfehlen.

Bei der **entkoppelten Beladung** werden der Routenzug bzw. die Anhänger von einem Logistiker oder automatisiert vorbeladen und für die jeweilige Tour zur Abholung durch den Fahrer bereitgestellt [HARRIS ET AL. 2003, S. 56; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39; KLENK ET AL. 2015,

⁸⁷ Eine integrierte Beladung liegt ebenfalls vor, wenn die Kommissionierung und Beladung von einem Logistiker ausgeführt wird, während der Routenzugfahrer wartet bis er die nächste Tour beginnen kann [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104] oder wenn der Routenzugfahrer bei der Kommissionierung und Beladung von einem Logistiker unterstützt wird. Diese theoretisch realisierbaren Gestaltungsmöglichkeiten sind nicht sinnvoll umsetzbar und bleiben daher unberücksichtigt.

S. 1882]. Der Zeitbedarf für die Kommissionierung und Beladung geht somit nicht in die Zykluszeit ein, dafür hingegen der Zeitbedarf für die Übernahme des bereitgestellten Routenzugs bzw. der Anhänger [GÜNTNER ET AL. 2012d, S. 29].⁸⁸ Die Entkopplung der Beladung liegt zum Beispiel vor, wenn ein Logistiker Ladungsträger auf Anhänger kommissioniert und diese auf einer Pufferfläche bereitstellt, wo der Routenzugfahrer sie an seinen Schlepper ankuppelt und anschließend die Fahrt entlang der Route beginnt. Bei der Verwendung von Schleppzügen reduziert sich der Zeitbedarf für die Übernahme, wenn der Fahrer den Schleppzug wechselt, anstatt den Anhängerverbund ab- und anzukuppeln (vgl. Abschnitt 5.2.9).

Die Entkopplung der Beladung bietet den Vorteil, dass der Logistiker zeitgleich zur gerade ausgeführten Tour durch den Fahrer, die Transportgüter für dessen nächste Tour kommissionieren und bereitstellen kann [DROSTE 2013, S. 40]. Dadurch reduziert sich die Zykluszeit [FISCHER 2016, S. 20] und es können höhere Transportfrequenzen auf der Tour realisiert werden [LIEBE-TRUTH 2016, S. 125] oder es können längere, aber dafür weniger Touren gefahren werden, wodurch Wegeinsparungen möglich sind [HARRIS, HARRIS 2014, S. 2]. Unter Umständen kann dadurch der Fahrerbedarf im Vergleich zur integrierten Beladung reduziert werden, wobei zu bedenken ist, dass im Gegenzug zusätzliche Kommissionierer erforderlich sind. Die Wiederbeschaffungszeit kann sich im Vergleich zur integrierten Beladung reduzieren, wenn die Übermittlung des Verbrauchssignals mittels e-Kanban realisiert wird [DROSTE 2013, S. 40]. Ist das Verbrauchssignal hingegen physisch an den Routenzug gebunden (Signal-, Karten- oder Behälter-Kanban), muss der Logistiker auf die Ankunft des Routenzugs warten, sodass sich unter Umständen die Wiederbeschaffungszeit um die Dauer einer Zykluszeit erhöht (vgl. Abb. 18 auf S. 81) [HARRIS, HARRIS 2014, S. 2]. Werden mehrere Routenzüge in einem Kommissionierbereich bedient, führt die Entkopplung zu weniger gegenseitigen Behinderungen oder Blockaden [CIEMNOCZOŁOWSKI 2007, S. 6]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Tätigkeiten durch Bündelung effizienter zu gestalten, z. B. durch Multi-Order-Picking⁸⁹ bei der Kommissionierung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 105] oder Entkopplung weiterer Tätigkeiten von der Zykluszeit (z. B. Set-Bildung) [DROSTE 2013, S. 40].

Ein Nachteil und eine Anwendungsvoraussetzung für die sinnvolle Umsetzung einer entkoppelten Beladung ist die Notwendigkeit stets ausreichend Routenzüge vorhalten zu müssen, damit die Beladung parallel zur Tour stattfinden kann [FISCHER 2016, S. 20]. Je Routenzug muss mindestens ein zusätzlicher Routenzug bzw. Anhängerverbund zur Verfügung stehen [HARRIS, HARRIS 2014, S. 2]. Da die vorbeladenen Routenzüge in der Regel an einer Übergabestelle

⁸⁸ Die Mischform der beschriebenen Merkmalsausprägungen im Sinne einer entkoppelten Kommissionierung, aber integrierter Beladung des Routenzugs/der Anhänger ist denkbar, aber nicht praxisrelevant, weswegen sie im weiteren Verlauf nicht separat betrachtet wird.

⁸⁹ Multi-Order-Picking (auch Batch-Kommissionierung oder zweistufige Kommissionierung) bezeichnet die Konsolidierung mehrerer Einzelaufträge zu einem zusammengefassten Kommissionierauftrag mit dem Ziel, die Laufwege zu reduzieren und damit die Kommissionierleistung zu erhöhen. Nach der Kommissionierung werden die Artikel vereinzelt und zu den ursprünglichen Einzelaufträgen zusammengeführt [TEN HOMPEL ET AL. 2011, S. 31].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

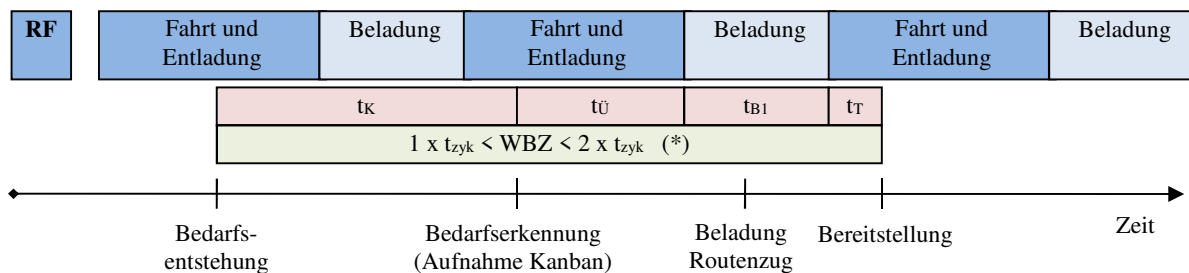
gepuffert werden, ist im Vergleich zur integrierten Beladung ein verhältnismäßig hoher Flächenbedarf erforderlich [FISCHER 2016, S. 19]. Zudem sind die Bestände im Gesamtsystem aufgrund der zusätzlichen Zwischenpufferung höher [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Die Planungskomplexität und der Koordinationsaufwand im Betrieb sind hoch, da die entkoppelten Prozesse synchronisiert werden müssen, um Fehler und Wartezeiten zu vermeiden [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 105]. Wenn die Material- und Informationsflüsse auseinanderfallen, wie es beispielsweise bei der Verbrauchssteuerung mittels e-Kanban der Fall ist, steigt zudem die Fehleranfälligkeit [TAKEDA 2008, S. 193]. Je mehr Routenzüge in einem Bereich vorbeladen und gepuffert werden, desto höher ist der Koordinationsaufwand.

Die entkoppelte Beladung eignet sich bei hohen Versorgungsfrequenzen, da die Zykluszeiten niedriger sind als bei der integrierten Beladung [TAKEDA 2008, S. 193]. Je nach Anwendungsfall lassen sich Wiederbeschaffungszeiten verkürzen, z. B. bei verbrauchsgesteuerter Materialflusststeuerung mittels e-Kanban (vgl. Abschnitt 5.1.5 und 5.2.2). Positive Effekte lassen sich insbesondere feststellen, wenn der Zeitbedarf für die Beladung bei deren Integration einen großen Teil der Zykluszeit ausmacht. Dies trifft allerdings nur zu, wenn das Bedarfssignal im Kommissionierbereich so früh eintrifft, dass der Logistiker die Beladung und Bereitstellung für die nächste Tour noch vor der Beendigung der aktuellen Tour des Fahrers sicherstellen kann. Demgegenüber stehen in der Regel Sicherheitsbestände, die mit der Entkopplung einhergehen, was dazu führt, dass Touren mit einer bestimmten Vorlaufzeit bereitgestellt werden, sodass die Wiederbeschaffungszeiten in der Praxis meist länger sind⁹⁰. Die Abb. 18 zeigt schematisch die Zyklus- und Wiederbeschaffungszeiten bei der Integration der Beladung im Vergleich zur Entkopplung für unterschiedliche Verbrauchssteuerungen (Karten-Kanban und e-Kanban), ohne Berücksichtigung von Vorlaufzeiten der Bereitstellung.

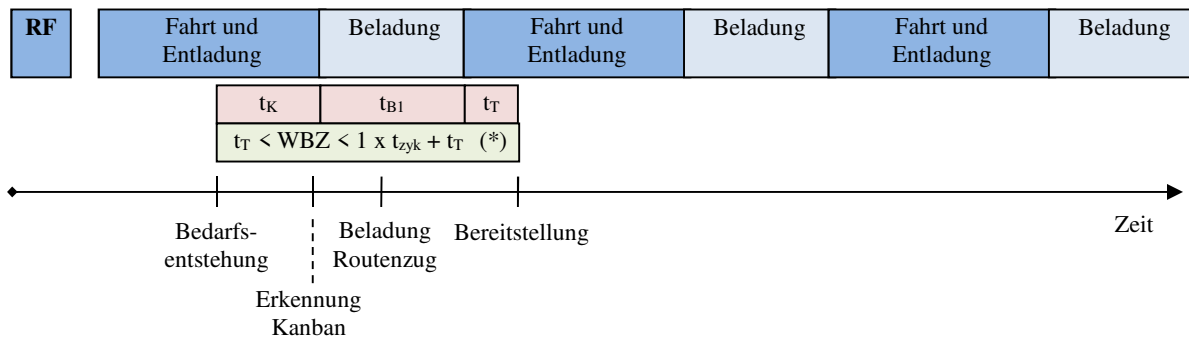
Je mehr Routenzüge in einem Kommissionierbereich zu bedienen sind, desto eher empfiehlt sich die Entkopplung der Beladung, da die Kommissionierung z. B. durch die Erhöhung der Mitarbeiterauslastung effizienter gestaltet werden kann [HARRIS ET AL. 2003, S. 56]. Voraussetzung für die effiziente Umsetzung eines entkoppelten Routenzugsystems ist allerdings, dass ausreichend Flächen und Routenzüge zur Verfügung stehen, um diese vorbeladen, puffern und wechseln zu können. Zudem ist auf eine geeignete Steuerung der Tourenstarts und Beladezeiten) dahingehend zu achten, dass zeitliche Überschneidungen und Wartezeiten zu vermeiden sind (vgl. Abschnitt 5.2.5). In der Praxis werden Routenzugsysteme mit entkoppelter Beladung häufig dann eingesetzt, wenn aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Fläche am Bereitstellort, die Ver-/Entsorgungsfrequenzen hoch sind. Das ist zum Beispiel bei der Materialversorgung von Montagelinien der Fall, insbesondere in der Automobilindustrie [COSTA ET AL. 2008, S. 441; KOVÁCS 2011; GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39; BATTINI ET AL. 2013, S. 213].

⁹⁰ HARRIS ET AL. gehen bei ihrer Kanban-Berechnung von einer Daumenregel aus, nach der die Wiederbeschaffungszeit bei der entkoppelten Beladung im Vergleich zur integrierten Beladung um einen Tourenstartabstand länger ist [HARRIS ET AL. 2003, S. 58].

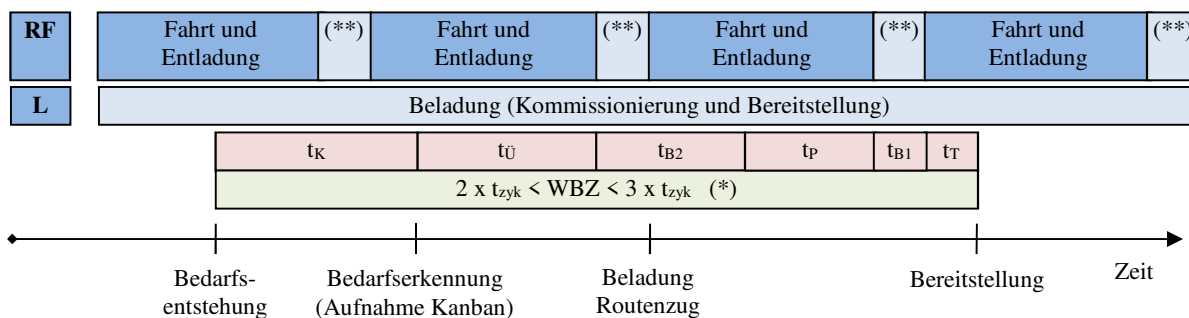
1. Integration der Beladung & Karten-Kanban



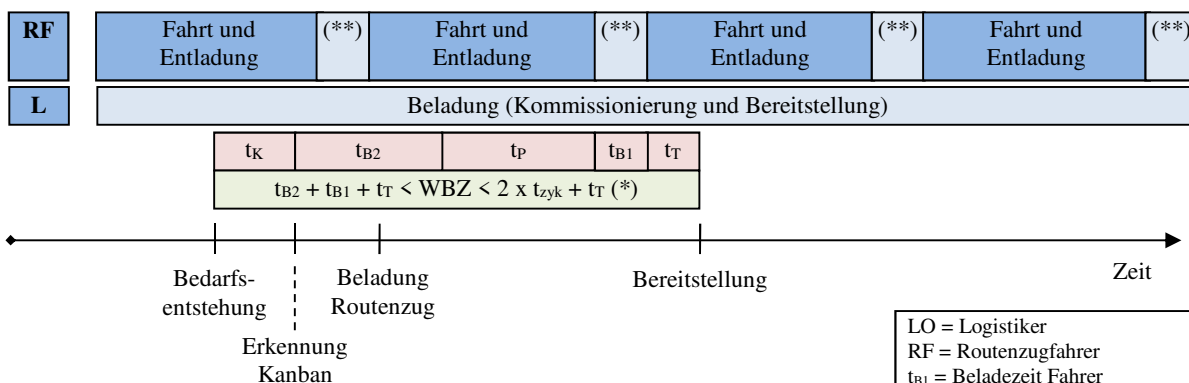
2. Integration der Beladung & e-Kanban



3. Entkopplung der Beladung & Karten-Kanban



4. Entkopplung der Beladung & e-Kanban



Legende:

(*) Gilt nur, wenn Transportbedarf pro Tour < Routenzugkapazität
 (**) Beladung Routenzugfahrer (Routenzug/Anhängers wechseln)

LO = Logistiker
 RF = Routenzugfahrer
 tb1 = Beladezeit Fahrer
 tb2 = Beladezeit Logistiker
 tk = Erkennungszeit
 tp = Pufferzeit
 tT = Transportzeit
 tÜ = Übermittlungszeit
 tzyk = Zykluszeit
 WBZ = Wiederbeschaffungszeit

Abb. 18: Vergleich von Zyklus- und Wiederbeschaffungszeiten bei der Integration oder Entkopplung der Beladung mit unterschiedlichen Verbrauchssignalen

Von **integrierter Entladung** spricht man, in Analogie zu den obigen Ausführungen, wenn der Entladeprozess vollständig der Tour zugeordnet ist, d. h. die gesamte Entladezeit in die Zykluszeit eingeht. Die Entladezeit beinhaltet dabei auch den Zeitbedarf für nachgelagerte Separierungsprozesse inkl. der notwendigen Nebenzeiten (z. B. Suche von freien Lagerplätzen oder Umsetzen auf Transporthilfsmittel). Die Integration der Entladung liegt zum Beispiel vor, wenn der Routenzugfahrer Fertigprodukte abtransportiert und diese am Ende seiner Tour in einem Lagerbereich selbst ablädt und separiert.⁹¹

Bei der **entkoppelten Entladung** werden der Routenzug bzw. die Anhänger am Ende der Tour durch den Fahrer bereitgestellt und von einem Logistiker entladen. Der Zeitbedarf für die Entladung und etwaige Separierungsprozesse gehen somit nicht in die Zykluszeit ein, dafür hingegen der Zeitbedarf für die Übernahme eines bereitgestellten, leeren Routenzugs bzw. leerer Anhänger.⁹² Die Entkopplung der Entladung liegt beispielsweise vor, wenn der Routenzugfahrer die mit Fertigwaren beladenen Anhänger im Versandbereich abkuppelt und bereitstellt, wohingegen ein Logistiker anschließend die Anhänger entlädt und die Fertigwaren separiert, während der Fahrer bereits die nächste Tour beginnt. Bei der Verwendung von Schleppzügen reduziert sich der Zeitbedarf für die Übergabe, wenn der Fahrer den Schleppzug wechselt, anstatt den Anhängerverbund ab- und anzukuppeln.

Die Vor- und Nachteile der integrierten bzw. entkoppelten Entladung entsprechen in den Grundzügen denen der integrierten bzw. entkoppelten Beladung, weshalb im Folgenden auf die detaillierte Erläuterung verzichtet wird. Zu berücksichtigen ist, dass die „Wiederbeschaffungszeit“ aus Sicht des nachfolgenden Prozesses bei einer Entsorgung (z. B. Verpackung) oftmals nicht zeitkritisch ist, weil in der Regel ein entsprechendes Lager zwecks Entkopplung vorhanden ist.

5.2.7 Anzahl Ladungsträgergrößen je Route

Ein Routenzugsystem kann aus einer oder mehreren Routen bestehen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Auf jeder einzelnen dieser Routen können die in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Ladungsträgertypen verwendet werden. Dabei ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob je Route kein Ladungsträger verwendet wird, ob eine Ladungsträgergröße oder mehrere Ladungsträgergrößen zum Einsatz kommen (vgl. Tab. 25). Dieses Merkmal ist in Verbindung mit der jeweils zu transportierenden Anzahl der Ladungsträger je Größe einerseits relevant für die Berechnung des Ressourcenbedarfs im Rahmen der Dimensionierung von Routenzugsystemen (vgl. Abschnitt

⁹¹ Eine integrierte Entladung liegt ebenfalls vor, wenn die Entladung von einem Logistiker ausgeführt wird, während der Routenzugfahrer wartet bis er die nächste Tour beginnen kann [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104] oder wenn der Routenzugfahrer bei der Entladung von einem Logistiker unterstützt wird. Diese theoretisch realisierbaren Gestaltungsmöglichkeiten sind nicht sinnvoll umsetzbar und bleiben daher unberücksichtigt.

⁹² Die Mischform der beschriebenen Merkmalsausprägungen im Sinne einer integrierten Entladung des Routenzugs/der Anhänger, aber entkoppelten Separierung ist denkbar, aber nicht praxisrelevant, weswegen sie im weiteren Verlauf nicht separat betrachtet wird.

6.4.1.1). Andererseits beeinflusst es die Berechnung des tatsächlichen kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs [VDI 2016b, S. 6 f.].

Tab. 25: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Anzahl der Ladungsträgergrößen je Route

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Anzahl Ladungsträgergrößen je Route	kein Ladungsträger	eine Ladungsträgergröße	mehrere Ladungsträgergrößen

Erfolgt der Transport **ohne Ladungsträger**, ist im Rahmen der Durchsatzbetrachtung für jedes Transportgut der benötigte Flächen- bzw. Platzbedarf separat zu bestimmen. Dem Vorteil einer möglichst wertschöpfungsorientierten Materialbereitstellung für die Montage [SCHEDLBAUER 2008, S. 123; BOPPERT 2008, S. 70] steht hierbei der hohe Aufwand für die Erfassung der notwendigen Daten im Rahmen der Planung gegenüber.

In der Praxis ist die Verwendung von Ladungsträgern für den Materialtransport üblich [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39; VDI 2016b, S. 8]. Im einfachsten Fall erfolgt dabei der Transport lediglich **einer Ladungsträgergröße** (z. B. nur KLT des Typs 4329 [VDA 2013a, S. 8]) je Route. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Möglichkeit, die Technik (z. B. Anhängertyp) und die Prozesse (z. B. Entladung) für einen Ladungsträgertyp optimal gestalten zu können. Im Rahmen der Dimensionierung vereinfacht sich zudem die Berechnung des Ressourcenbedarfs, da lediglich die Anzahl der Stellplätze je Routenzug relevant ist, hingegen nicht deren Flächen- oder Platzbedarf bezogen auf eine Norm-Einheit (vgl. Abschnitt 6.4.1.1).

Werden **mehrere Ladungsträgergrößen** je Route transportiert, ist zu unterscheiden, ob es sich um Ladungsträger des gleichen Typs (KLT oder GLT) mit unterschiedlicher Größe handelt, oder ob es sich um unterschiedliche Ladungsträgertypen handelt. Der erste Fall tritt beispielsweise auf, wenn KLT mit unterschiedlicher Grundfläche gemeinsam transportiert werden. Hinsichtlich der Gestaltung von Technik und Prozessen ist dieser Fall meist unkritisch, weil die Anforderungen in der Regel gleich oder zumindest ähnlich sind. Bei der Dimensionierung und im Betrieb ist darauf zu achten, dass die Ladungsträger unterschiedliche Flächenbedarfe beanspruchen. Der Transport unterschiedlicher Ladungsträgertypen auf einer Route führt zu einem hohen Planungsaufwand, da sowohl bei der Gestaltung als auch bei der Dimensionierung Fallunterscheidungen getroffen werden müssen. Beispielsweise erfordern unterschiedliche Ladungsträgertypen in der Regel unterschiedliche Anhängertypen (vgl. Abschnitt 5.1.2.2), sodass sich die Frage stellt, wie viele Anhänger je Typ ein Routenzug umfassen soll.

Sowohl in der Theorie als auch in der Praxis wird grundsätzlich zwischen KLT- und GLT-Transporten⁹³ unterschieden [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39; MARTINI ET AL. 2015, S. 65; VDI 2016b, S. 8; WUSTMANN 2016, S. 10 ff.]. Der Transport lediglich eines Ladungsträgertyps kann dabei

⁹³ Sogenannte Sequenzwagen oder Set-Ladungsträger, die häufig in der Automobilindustrie zur sequenzgerechten Bereitstellung von Materialien eingesetzt werden, können aufgrund ihrer Eigenschaften und Anforderungen den GLT zugeordnet werden [HOMOLKA 2016, S. 16; VDI 2016b, S. 17].

5 Gestaltungsmöglichkeiten

als „sortenrein“ bezeichnet werden [DANIEL 2013, S. 218], der Transport beider Ladungsträgertypen als „gemischt“ [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 39]. Letzteres ist aufgrund der genannten Nachteile in der Regel nur sinnvoll, wenn der sortenreine Transport zur Minderauslastung führt und durch die Zusammenlegung mehrerer sortenreiner Routen zu einer oder mehreren gemischten Routen Einsparungen erzielt werden können [HOMOLKA 2016, S. 29].

5.2.8 Anzahl Anhängertypen je Routenzug

Wenn Schleppzüge als Transportmittel eingesetzt werden (vgl. Abschnitte 2.1 und 5.1.2), ist die Anzahl der Anhängertypen je Routenzug ein relevantes Unterscheidungsmerkmal. Dieses steht in engem Zusammenhang mit der Art der verwendeten Ladungsträger und der Anzahl der Ladungsträgergrößen je Route, weil sich die Anhängertypen in der Regel hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Transportgüter oder Ladungsträger unterscheiden (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Prinzipiell werden Routenzüge mit einem Anhängertyp von solchen mit mehreren Anhängertypen unterschieden (vgl. Tab. 26). Dabei hängt die Entscheidung, ob ein oder mehrere Anhängertypen verwendet werden, in der Regel davon ab, ob lediglich ein Ladungsträgertyp (z. B. nur KLT) oder mehrere Ladungsträgertypen (z. B. KLT und GLT) gemeinsam auf einem Routenzug transportiert werden (vgl. Abschnitt 5.2.7).

Tab. 26: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Anzahl der Anhängertypen je Routenzug

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>	
Anzahl Anhängertypen je Routenzug	ein Anhängertyp	mehrere Anhängertypen

Bei Routenzügen mit **einem Anhängertyp** (z. B. nur Regalwagen) entspricht die Anhängeranzahl je Typ der Anzahl der gesamten Anhänger des Routenzugs. Deren maximaler Wert wird in der Regel unternehmensseitig festgelegt oder durch die Vorgabe einer maximalen Schleppzuglänge begrenzt [HAUSMANN 2007b, S. 23; VDI 2016c, S. 5]. Zu berücksichtigende Aspekte sind dabei beispielsweise der minimale Kurvenradius auf dem Fahrweg und die Spurtreue der Anhänger bei Kurvenfahrten (vgl. Abschnitt 5.1.2.2).

Bei Routenzügen mit **mehreren Anhängertypen** (z. B. Regal- und Plattformwagen) muss die Anhängeranzahl je Typ separat bestimmt werden [VDI 2016b, S. 7]. Der jeweilige Anteil der Anhängertypen an der Gesamtanzahl der Anhänger beeinflusst dabei die Dimensionierung des Routenzugsystems, weil die Transportkapazität je Anhängertyp direkt die Anzahl der notwendigen Touren je Zeiteinheit bestimmt [VDI 2016c, S. 8]. In der Regel ist der Einfluss der Veränderung dieses Anteils maßgeblich, wie ein einfaches Beispiel zeigt: Beträgt die maximale Anzahl der Anhänger je Routenzug vier und ist der Anteil für zwei Anhängertypen gleich groß, werden pro Typ jeweils zwei Anhänger transportiert. Verändert man die Anzahl des ersten Anhängertyps auf Eins und den des zweiten Typs auf Drei, ist die verfügbare Kapazität des ersten Anhängertyps um 50 % reduziert, wodurch sich bezogen auf diesen Anhängertyp die Anzahl

der notwendigen Touren verdoppelt. Zudem ist die Reihenfolge der Anhängertypen im Anhängerverbund zu berücksichtigen, sofern Anhänger für die Bereitstellung an- und/oder abgekuppelt werden (vgl. Abschnitte 5.2.9 und 5.2.10).

5.2.9 Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess

Bei der Verwendung von Schleppzügen ist hinsichtlich der Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess zu differenzieren. Dieses Merkmal bestimmt die kleinsten Einheiten, die bei der Routenzugbereitstellung betrachtet werden und ist abhängig von der Prozessgestaltung bei der Be- und Entladung (z. B. Integration von Be- und Entladung (vgl. Abschnitt 5.2.6)) [VDI 2016b, S. 7]. Grundsätzlich werden die drei in der Tab. 27 aufgeführten Varianten unterschieden.

Tab. 27: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess	Fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhänger	Anhänger fix miteinander verbunden, An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes an/von Schlepper	An- und Abkuppeln der einzelnen Anhänger an/von Schlepper

Bei **fixer Verbindung zwischen Schlepper und Anhängern** bildet der Routenzug eine Einheit, die bei der Be- und Entladung bestehen bleibt, d. h. die Anhänger werden grundsätzlich nicht vom Schlepper abgekuppelt [VDI 2016b, S. 7]. Das ist beispielsweise der Fall, wenn der Fahrer den Routenzug selbst be- und entlädt (vgl. Abschnitt 5.2.6) [VDI 2016b, S. 7], was in der Regel bei der Bereitstellung von KLT der Fall ist [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 56]. Eine andere Möglichkeit ist der Tausch eines leeren Routenzugs gegen einen durch einen anderen Mitarbeiter vorbeladenen Routenzug [HOMOLKA 2016, S. 20]. Vorteilhaft bei der fixen Verbindung zwischen Schlepper und Anhängern ist die Tatsache, dass kein zusätzlicher Zeitaufwand für An- und Abkuppelvorgänge entsteht. Zudem können die Kupplungen aufgrund geringer Anforderungen hinsichtlich der Handhabbarkeit in einfacher Bauweise ausgeführt sein (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Ein weiterer Vorteil ist die einfache Laufleistungsüberwachung und die damit verbundene Möglichkeit zur vorsorglichen Wartung der Anhänger [SCHNEIDER 2016, S. 231]. Der Nachteil der fixen Verbindung zwischen Schlepper und Anhängern ist zum einen die unter Umständen hohe Zykluszeit aufgrund der Notwendigkeit die Be- und Entladung vom Fahrer durchführen zu lassen. Zum anderen sind beim Routenzugtausch weitere Routenzüge für die Vorbeladung erforderlich [HOMOLKA 2016, S. 20].

Sind die **Anhänger fix miteinander verbunden**, bilden diese neben dem Schlepper eine separate Einheit, d. h. der Anhängerverbund wird bei Bedarf vom Schlepper abgekuppelt und gegen einen anderen Anhängerverbund ausgetauscht [VDI 2016b, S. 7]. Das ist beispielsweise der Fall, wenn ein Logistikmitarbeiter die vorkommissionierten Anhänger im Verbund auf einer

5 Gestaltungsmöglichkeiten

Pufferfläche bereitstellt und der Routenzugfahrer zu Beginn einer Tour den Anhängerverbund an den Schlepper kuppelt [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 111 f.]. Das An-/Abkuppeln kann dabei manuell durch den Routenzugfahrer oder automatisiert durch entsprechende Kupplungssysteme erfolgen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) [VDI 2016b, S. 7]. Vorteilhaft ist die geringe erforderliche Schlepperanzahl gegenüber dem Routenzugtausch. Demgegenüber stehen die Nachteile, dass zusätzliche Anhänger für die Vorbeladung und Pufferung notwendig sind und der Zeitbedarf für die Zusammenstellung des Routenzugs durch den Fahrer größer ist als beim Routenzugtausch.

Eine weitere Merkmalsausprägung hinsichtlich der Verbindung von Schlepper und Anhängern ist das **An- und Abkuppeln einzelner Anhänger an den/vom Schlepper** [VDI 2016b, S. 7]. Dabei werden bei der Beladung einzelne Anhänger an den Schlepper angekuppelt bzw. bei der Entladung abgekuppelt [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 55]. Der erste Fall tritt beispielsweise auf, wenn Fertigwaren auf Anhängern eingesammelt werden (z. B. Spritzgießfertigung), der zweite Fall, wenn Materialien auf Anhängern bereitgestellt werden (z. B. Sequenzen in der Montage). Von Vorteil beim An- und Abkuppeln einzelner Anhänger ist die Tatsache, dass die Be- und Entladezeiten am Bereitstellort bei hohen Teileumfängen, wie sie beispielsweise bei der Set-Bildung vorkommen, gering sind, weil die Materialien nicht einzeln gehandhabt werden müssen. Ein weiterer Vorteil ist die Zeitersparnis bezüglich der Zykluszeit durch eine mögliche Vorbeladung (vgl. Abschnitt 5.2.6) [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 111]. Demgegenüber kann die manuelle Handhabung der Anhänger aufwendig sein, u. a. aufgrund des hohen Eigengewichts und der erforderlichen Losbrechkraft in Zusammenhang mit der Rollenausrichtung beim An-schieben [KEUNTJE 2016, S. 13]. Negativ zu beurteilen ist zudem die hohe Anzahl der erforderlichen Anhänger. In der Praxis kommt das An- und Abkuppeln einzelner Anhänger in der Regel nur in Verbindung mit GLT-Transporten vor [GÜNTNER ET AL. 2012a, S. 56].

5.2.10 Vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug

„Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal mit maßgeblichem Einfluss auf die Handhabungszeiten an den Bereitstellorten ist die Ordnung der Ladung auf dem Routenzug“ [VDI 2016b, S. 7]. Grundsätzlich wird unterschieden, ob die Ladung unsortiert ist oder ob die Ladung nach einer vorgegebenen Ordnung auf dem Routenzug transportiert wird (vgl. Tab. 28).

Tab. 28: Wesentliche Unterscheidungsmerkmale bei der Ordnung der Ladung auf dem Routenzug

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>	
Vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug	nein	ja

Gibt es **keine vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug**, hat dies den Vorteil, dass der Aufwand für dessen Beladung gering ist [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Demgegenüber steht der Nachteil, dass bei der Entladung des Routenzugs Suchzeiten auftreten können, weil der Routenzugfahrer die benötigten Transportgüter bzw. Ladungsträger je Bereitstellort zunächst suchen muss [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Ein weiterer Nachteil ist das hohe

Risiko für Entnahmefehler, d. h. die Entnahme und Bereitstellung des falschen Materials am Bereitstellort [GÜNTNER ET AL. 2012b, S. 22]. Wenn der Routenzugfahrer nicht auf alle Transportgüter bzw. Ladungsträger auf dem Routenzug direkt zugreifen kann, besteht zudem die Gefahr, dass er die Ladung umsortieren muss [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Die genannten Nachteile sind insbesondere beim Transport von vielen Gütern bzw. Ladungsträgern relevant [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Die unsortierte Ladung eignet sich in der Regel für Fälle, in denen der Routenzugfahrer seinen Routenzug selbst belädt [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104].

Eine **vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug** kann durch eine fixe Anordnung der Transportgüter bzw. Ladungsträger auf dem Routenzug oder eine Sortierung realisiert werden [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]. Eine fixe Anordnung liegt beispielsweise vor, wenn KLT für einen bestimmten Bereitstellort auf einer definierten Ebene eines Regalwagens platziert werden. Die Vorteile sind geringe Suchzeiten und ein geringes Fehlerrisiko [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Die Nachteile sind die unter Umständen geringe Kapazitätsauslastung und der Zuordnungsaufwand bei der Beladung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104].

Eine Sortierung liegt beispielsweise vor, wenn KLT einer Tour in der Auslieferreihenfolge auf einem Regalwagen angeordnet werden [GÜNTNER ET AL. 2012b, S. 22 ff.; GALKA ET AL. 2015, S. 58; HARRIS ET AL. 2003, S. 62] oder Anhänger mit GLT in der Auslieferreihenfolge an den Schlepper gekuppelt werden [ROTHER 2012, S. 43]. Die Vorteile der Sortierung sind geringe Such-, Geh- und Handhabungszeiten des Fahrers, woraus insbesondere beim KLT-Transport geringe Entladezeiten an den Bereitstellorten resultieren⁹⁴ [VDI 2016b, S. 7; HARRIS ET AL. 2003, S. 62]. Des Weiteren ist die Fehlerwahrscheinlichkeit gering im Vergleich zur unsortierten Ladung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 103]. Durch die Anordnung der Anhänger nach absteigendem Gewicht können ggf. die Fahreigenschaften des Routenzugs (z. B. bei Rampenfahrt) verbessert werden [VDI 2016b, S. 7]. Bei „gemischten“ Transporten (vgl. Abschnitte 5.2.7 und 5.2.8) ist es in der Regel sinnvoll, die mit vielen KLT beladenen Anhänger vorne anzukuppeln und die mit wenigen GLT beladenen Anhänger hinten, weil dadurch die Gehzeiten reduziert werden können [FIRLBECK ET AL. 2013, S. 92 f.]. Der wesentliche Nachteil einer vorgegebenen Ordnung der Ladung auf dem Routenzug ist der zusätzliche Zeitbedarf bei der Beladung [GÜNTNER ET AL. 2013a, S. 104]. Wenn der Routenzugfahrer die Beladung selbst übernimmt, geht die Beladezeit direkt in die Zykluszeit ein. Übernimmt der Routenzugfahrer stattdessen vorbeladene Anhänger oder einen kompletten Routenzug, führt die Ordnung in der Regel zu verkürzten Zykluszeiten. Daher ist die vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug in Verbindung mit der entkoppelten Beladung sinnvoll einsetzbar (vgl. Abschnitt 5.2.6). Durch automatisierte Beladekonzepte kann die Sequenzierung zudem bei deutlich reduzierter Vorlaufzeit realisiert werden [GALKA ET AL. 2013a, S. 131].

⁹⁴ „Beim Vollgut-/Leergut-Tausch von Anhängern an den Bereitstellorten (z. B. Bereitstellung von Paletten auf Anhängern) ist die Anordnung der Anhänger im Verbund und deren Bereitstellreihenfolge von nachrangiger Bedeutung, da letztlich jeder Anhänger (jede Position) im Verbund genau einmal auszutauschen ist.“ [VDI 2016b, S. 7]

5 Gestaltungsmöglichkeiten

5.3 Morphologien

Die zusammenfassende Darstellung der technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen erfolgt tabellarisch (vgl. Abb. 19 und Abb. 20) [VDI 2016b, S. 3]. Dies dient der Charakterisierung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen durch Hervorhebung der realisierten Gestaltungsalternativen (vgl. Abschnitt 6.6.1) und der Einfachheit und Nachvollziehbarkeit der Implementierung von Systemkonfigurationen im Excel-Tool durch Auswahlfelder (vgl. Abschnitt 6.6.2).

Merkmal		Gestaltungsmöglichkeiten					
Ladungsträger	kein Ladungsträger	Standard-KLT (modular auf die Grundflächen 800x1200 (Euro) und 1000x1200 (ISO) abgestimmt)	Spezial-KLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)	Standard-KLT (Grundfläche 800x1200/600x800 (Euro) oder 1000x1200 (ISO))	Spezial-KLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)		
Transportmittel							
Art des Fahrzeugs	Wagen mit fester Plattform	Schlepper mit Anhänger	Gabelstapler	Kommissionierer	Handwagen		
Art der Steuerung	fahrgeführt	fahrerlos					
Bauweise	Dreirad-Schlepper	Vierrad-Schlepper					
Antrieb	Elektroantrieb	Verbrennungsantrieb	Hybridantrieb				
Anhängelast	leicht (< 5 t)	mittel (5 - 25 t)	schwer (> 25 t)				
Bedienung	Steuerungsführung	Sitzausführung					
Typ	Plattformwagen	Trailer-Konzept	Rollenverschiebesystem (ggf. + Rahmen)	Taxi-Konzept	Einschub-Konzept	Achsschenkellenkung (2 Achsen)	
Anhänger	keine einseitig	Regalwagen	Pneumatik	Taxiwagen (+Trolley)	C-/E-/H-/U-Rahmen (+Trolley)		
Medienversorgung		Hydraulik	zweiseitig	Elektrik			
Be- und Entladeseite	ungelenkt (einachsrig)	(Beladeseite definiert Entladeseite)	zweiseitig				
Lenksystem		Lenkrollen-Lenkung (1 Achse)	Drehschemellenkung (1 Achse)	Drehschemellenkung (2 Achsen)	Achsschenkellenkung (1 Achse)	Achsschenkellenkung (2 Achsen)	
Be- und Entladetechnik							
Beladetechnik Routenzug	ohne Hilfsmittel	manuell	automatisch				
	ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)					
Beladetechnik Trolley	kein Trolleysatz	manuell	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	automatisch			
	kein Trolleysatz	ohne Hilfsmittel	manuell	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)			
Entladetechnik Routenzug	ohne Hilfsmittel	manuell	automatisch				
	kein Trolleysatz	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	manuell	automatisch			
Entladetechnik Trolley	kein Trolleysatz	ohne Hilfsmittel	manuell	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)			
Bereitelltechnik							
Bereitstellung Quelle	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Palettenregal, AKL, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln				
Bereitstellung Senke	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Fachbodenregal, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln				
Informationstechnik							
Technischer Informationsträger	keiner (Signal-Kanban)	Karte (Karten-Kanban)	Behälter (Behälter-Kanban)	Computer (e-Kanban)	Computer (Produktionsplan)		

Abb. 19: Technische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen

Merkmal	Gestaltungsmöglichkeiten			
	Versorgung	Entsorgung	Ver- und Entsorgung	
Primäre Transportaufgabe				
Materialflusssteuerungsprinzip	bedarfsorientiert (zentrales Steuerungssystem)	verbrauchsorientiert (selbststeuernde, dezentrale Regelkreise)		
Auslösung des Transportauftrags	EDV	Fahrer	Logistiker	Technisches Hilfsmittel
Route				
Anzahl der Routen	eine Route	mehrere Routen		
Festlegung Route (in Bezug auf bestimmten Betrachtungszeitraum)	statisch (gleichbleibende Route, unabhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)	dynamisch (Anpassung der Route, abhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)		
Zuordnung (Bereitstellungs-Haltepunkte)	1:1	m:1		
Zuordnung (Fahrer:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n
Zuordnung (Routenzug:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n
Steuerung Tourenstart				
	fester Fahrplan	auslastungsorientiert/ ereignisorientiert	permanent	
Integration von Be- und Entladung				
Integration Beladung	integriert	entkoppelt		
Integration Entladung	integriert	entkoppelt		
Anzahl Ladungsträgergrößen je Route	kein Ladungsträger	eine Ladungsträgergröße	mehrere Ladungsträgergrößen	
Anzahl Anhängertypen je Routenzug	ein Anhängertyp	mehrere Anhängertypen		
Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess	Fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhänger	Anhänger fix miteinander verbunden, An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes an/von Schlepper	An- und Abkuppeln der einzelnen Anhänger an/von Schlepper	
Vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug	nein	ja		

Abb. 20: Organisatorische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen

6 Bewertungsmodell

6.1 Modellbildung und -struktur

Das Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Modells, das den Anwender befähigt „ein Routenzugsystem auf der Basis von Ist-Aufnahmen und -Analysen (z. B. Prozesszeiten oder Transportmengen) abzubilden und hinsichtlich wirtschaftlicher, logistischer und qualitativer Kriterien zu bewerten“ (vgl. Abschnitt 4.1). Die Herausforderung bei der Modellbildung ist dabei, die Abhängigkeit der Modellstruktur von den Bewertungskriterien von Beginn an zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass bereits bei der Modellbildung darauf zu achten ist, welche Informationen für die Bewertung erforderlich sind und diese Informationen – und nur diese – als Eingangsdaten abzufragen. Damit wird die Erfüllung der im Abschnitt 4.3 gestellten Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Vollständigkeit* und *Genauigkeit* sichergestellt.

Zu Beginn der Modellbildung stellt sich die Frage nach dem Abstraktionsgrad des Modells [ADAM 1996, S. 81 ff.]. Diesbezüglich sind insbesondere die Kriterien *Änderungsverhalten des Modells* (statisch oder dynamisch) und *Vorhersagbarkeit der Eingangsdaten* (deterministisch oder stochastisch) von Bedeutung.

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen aus den Bewertungsergebnissen potentielle Optimierungsansätze abgeleitet und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten überprüft werden. Da die Umsetzung und Überprüfung der potentiellen Optimierungsansätze im realen System aufgrund des hohen Aufwands und der Unsicherheit hinsichtlich der Auswirkungen nicht sinnvoll ist, muss auf Planungsergebnisse zurückgegriffen werden. Die Entwicklung einer anwendungsbezogenen Methode zur Optimierung von Routenzugsystemen setzt somit voraus, dass der Stand der Technik hinsichtlich der Planung von Routenzugsystemen Berücksichtigung findet, weshalb der statische und auf deterministischen Eingangsdaten basierende Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 in das Modell integrierbar sein muss [VDI 2016c]. Daher ist es sinnvoll, ein statisches Modell mit deterministischen Eingangsdaten zu erstellen, d. h. es wird auf die Darstellung des Systems im Zeitablauf verzichtet und angenommen, dass die Eingangsdaten im Voraus bekannt sind. Ein sich daraus ergebender Vorteil ist es, den Anforderungen nach Einfachheit und Änderbarkeit des Modells (vgl. Abschnitt 4.3) gerecht zu werden, weil beispielsweise aufwendige dynamische Simulationen vermieden werden können [RITTER ET AL. 2016, S. 35].

Um den in Abschnitt 4.3 definierten Anforderungen nach der richtigen Genauigkeit des Bewertungsmodells bei möglichst einfachem und nachvollziehbarem Aufbau gerecht zu werden, bietet sich die hierarchische Modellbildung an. Dabei wird ein Gesamtsystem in mehrere Teilsysteme zerlegt, mit dem Ziel, diese einzeln und in sich geschlossen abbilden zu können [DÜRRSCHMIDT 2001, S. 78]. Der Vorteil der hierarchischen Modellbildung liegt in der Fähigkeit, komplexe Systeme modular und mit variablem Abstraktionsniveau abbilden zu können,

6 Bewertungsmodell

wodurch die Transparenz (*Einfachheit* und *Nachvollziehbarkeit*) erhöht wird [DÜRRSCHMIDT 2001, S. 78; SCHWARZER 2010, S. 43]. Da im Zuge der Bewertung auf Planungsergebnisse zurückgegriffen werden muss und die Planung von Routenzugsystemen (insbesondere die Dimensionierung) routenbasiert erfolgt [VDI 2016c, S. 6], bietet sich auf der ersten Ebene die Unterteilung des Gesamtsystems in routenbasierte Teilsysteme an, die auf der zweiten Ebene in ihre Systemelemente zerlegt werden. Diese wiederum stehen in Beziehung zu den Systemprozessen, wodurch letztlich die Wirkungszusammenhänge zwischen Struktur und Prozessen abgeleitet werden können. Die Abb. 21 zeigt schematisch die hierarchische Modellstruktur eines Routenzugsystems, die für die folgenden Ausführungen zugrunde gelegt wird.

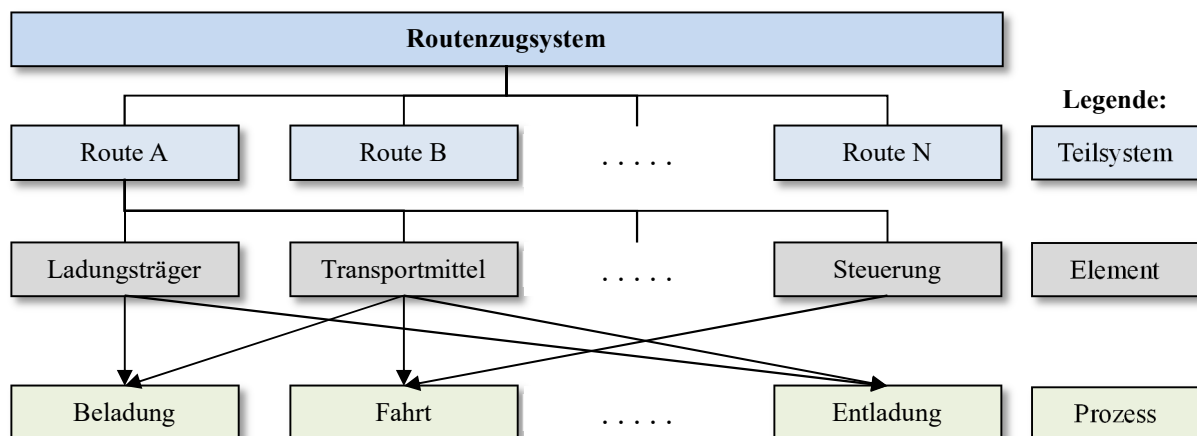


Abb. 21: Schematische Untergliederung eines Routenzugsystems in mehrere Routen mit Strukturelementen und deren Beziehungen zu Routenzugprozessen

6.2 Zielbildung

Ziele lassen sich in unterschiedliche Zielarten unterteilen, wobei diese in der Literatur nicht einheitlich benannt werden [REFA 1990, S. 100; WÖHE, DÖRING 2013, S. 67 ff.]. Da die Auswahl der Ziele die Wertvorstellungen des Entscheidungsträgers (bzw. einer Gruppe von Entscheidungsträgern) widerspiegelt, ist sie stets subjektiv und einzelfallabhängig [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 89]. Es bietet sich daher an, die Ziele einzelfallabhängig auszuwählen, zu strukturieren und in einem Zielsystem abzubilden [ADAM 1996, S. 113; KLEIN, SCHOLL 2004, S. 116 ff.; WÖHE, DÖRING 2013, S. 71]. Dies erfolgt in der Regel mit sogenannten hierarchischen Zielsystemen, die sich durch mehrere Ziele auf unterschiedlichen Hierarchieebenen auszeichnen [WÖHE, DÖRING 2013, S. 72]. Anhand der definierten Ziele gilt es, das Zielsystem durch Präzisieren bzw. Zerlegen weiter zu verfeinern und dadurch zu operationalisieren [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 88]. Gemeint ist damit die Identifizierung von Zielgrößen, die sich geeignet messen lassen.

Bei der Entwicklung eines Zielsystems wird grundsätzlich zwischen der induktiven und der deduktiven Vorgehensweise unterschieden. Die Induktion (vom Speziellen ins Allgemeine) leitet aus empirischen Beobachtungen allgemeingültige Aussagen ab, wohingegen die Deduktion

(vom Allgemeinen ins Spezielle) Aussagen aus Axiomen und Hypothesen logisch ableitet [SYSKA 1990, S. 35 f.]. Der Nachteil der Induktion ist, dass sie im Allgemeinen individuelle Zielsysteme generiert, weshalb sie für die Entwicklung eines allgemeingültigen Zielsystems nicht geeignet ist [SYSKA 1990, S. 35, 74]. Aus diesem Grund werden im Folgenden die übergeordneten Ziele deduktiv untergliedert.

Bereits in Abschnitt 2.2 wurden die mit der Routenzugnutzung verfolgten Ziele in wirtschaftliche, logistische und qualitative Ziele untergliedert. Diese Einteilung ist sinnvoll, weil sowohl die in der VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 „Logistikkennzahlen für die Produktion“ empfohlenen Oberziele *hohe Logistikleistung* und *geringe Logistikkosten* [VDI 2004] als auch qualitative Ziele, wie beispielsweise die *Reduzierung des Unfallrisikos* oder die *Verbesserung der Ergonomie*, berücksichtigt werden (vgl. Abb. 22).

Für die nachfolgende Entwicklung des Kennzahlensystems zum Zweck der Bewertung ist eine neutrale Formulierung der Kennzahlen anzustreben (vgl. Abschnitt 6.3). Um dies zu erreichen, werden bereits die Oberziele in die Kategorien *Logistikleistung*, *Wirtschaftlichkeit* und *Qualität* gegliedert, ohne dabei die Optimierungsrichtung anzugeben. Das ist insbesondere vor dem Hintergrund einer vorliegenden Zielkonkurrenz vorteilhaft. Zielkonkurrenz bedeutet, dass die Erreichung eines Ziels im Widerspruch zur Erreichung eines anderen Ziels steht. In Bezug auf die oben genannten Oberziele steht beispielsweise die Erreichung einer hohen Logistikleistung mit der Erreichung geringer Logistikkosten im Widerspruch. Zudem ist sogar die Zielsetzung in Bezug auf eine bestimmte Kennzahl nicht eindeutig zu formulieren. Als Beispiel dient die Zielgröße *zeitlicher Nutzungsgrad der Mitarbeiter*; deren Erhöhung bedeutet, dass die Mitarbeiter höher ausgelastet sind und die Arbeitszeiten in höherem Maße für die vorgesehenen Tätigkeiten genutzt werden. Demgegenüber reduziert sich die zeitliche Reserve der Mitarbeiter, d. h. die Fähigkeit flexibel auf z. B. Transportbedarfsschwankungen oder Störungen reagieren zu können, nimmt ab.

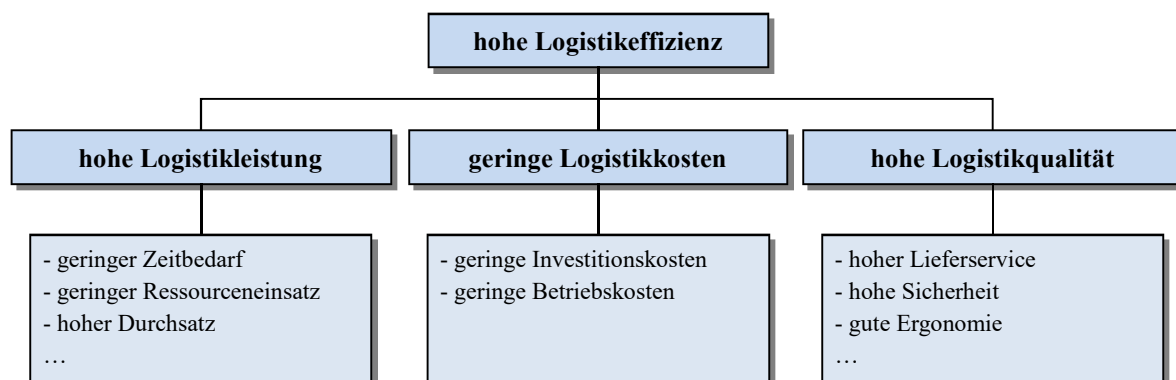


Abb. 22: Zielsystem von Routenzugsystemen in Anlehnung an FEIL [FEIL 2016, S. 52]

Auf Basis der definierten Zielkategorien werden die Zieldimensionen der darunterliegenden Ebene durch weitere Untergliederung bestimmt (vgl. Abb. 23). Die Logistikleistung umfasst die Zieldimensionen *Zeit*, *Ressourcen* und *Materialfluss*. Damit werden nicht nur die in der

6 Bewertungsmodell

Literatur häufig verwendeten Kriterien Zeit und Menge berücksichtigt [SYSKA 1990, S. 21], sondern auch die für die Logistik bedeutenden Anforderungen hinsichtlich Durchsatz und Ressourcenbeanspruchung bedacht. Die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt einerseits die *Investitionskosten*, d. h. diejenigen Kosten, die einmalig für die Beschaffung von Ressourcen entstehen, und die *Betriebskosten*, d. h. diejenigen Kosten, die durch die Nutzung der Ressourcen laufend entstehen [MARTIN 2016, S. 122]. Unter Qualität werden die Zieldimensionen *Lieferservice*, *Sicherheit*, *Ergonomie*, *Transparenz*, *Technikeigenschaften*, *Robustheit*, *Flexibilität* und *Wandlungsfähigkeit* [VDI 2004, S. 6; GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 143 ff.; KRAUSE ET AL. 2016, S. 46] zusammengefasst.

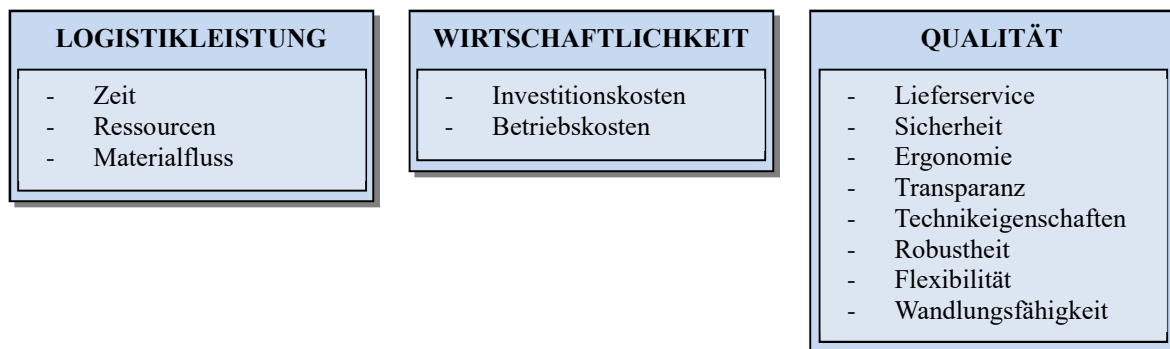


Abb. 23: Zieldimensionen zur Bewertung von Routenzugsystemen

6.3 Entwicklung eines Kennzahlensystems

6.3.1 Grundlagen

6.3.1.1 Kennzahlenbegriff

Kennzahlen sind Zahlen, „die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form erfassen“ [REICHMANN 2006, S. 19]. Sie haben die Aufgabe die komplexe Realität in verdichteter Form wiederzugeben, um Informationen für den Anwender interpretierbar zu machen [WEBER 1993a, S. 227; HORVÁTH 2009, S. 504]. Die wichtigsten Eigenschaften einer Kennzahl sind somit der Informationscharakter und die Quantifizierbarkeit [SCHWARZER 2010, S. 28]. Kennzahlen dienen der Planung, Steuerung, Kontrolle, Analyse und dem Vergleich [SYSKA 1990, S. 26]. In der vorliegenden Arbeit sind die Verwendungszwecke von Kennzahlen die Bewertung von Routenzugsystemen zur Informationsgewinnung sowie die Nutzung der Informationen für die anschließende Analyse und Optimierung. Vergleichende Betrachtungen (z. B. Soll-Ist-Vergleich) dienen dabei der Entscheidungsunterstützung und bilden somit nicht nur die Basis für Optimierungen (vgl. Abschnitt 8.4), sondern auch für zukünftige Planungen.

Kennzahlen lassen sich nach verschiedenen Merkmalen systematisieren, wobei die am häufigsten vorfindbare Unterscheidung von Kennzahlen die nach ihrer statistischen Form ist [WEBER

1993a, S. 229; REICHMANN 2006, S. 20 f.; HORVÁTH 2009, S. 505]. Hierbei werden grundsätzlich Absolutzahlen von Verhältniszahlen unterschieden, wobei gemäß der Abb. 24 jeweils weiter untergliedert wird. Eine Absolutzahl benennt den Wert einer bestimmten Kenngröße, ohne diese auf eine andere Kenngröße zu beziehen [SCHWARZER 2010, S. 27]. Ein Beispiel ist die Anzahl der Fahrer in einem Routenzugsystem. Verhältniszahlen setzen zwei Kenngrößen zueinander ins Verhältnis. Ein Beispiel ist der zeitliche Nutzungsgrad der Mitarbeiter, d. h. das Verhältnis aus Einsatzzeit der Mitarbeiter zum Zeitangebot.

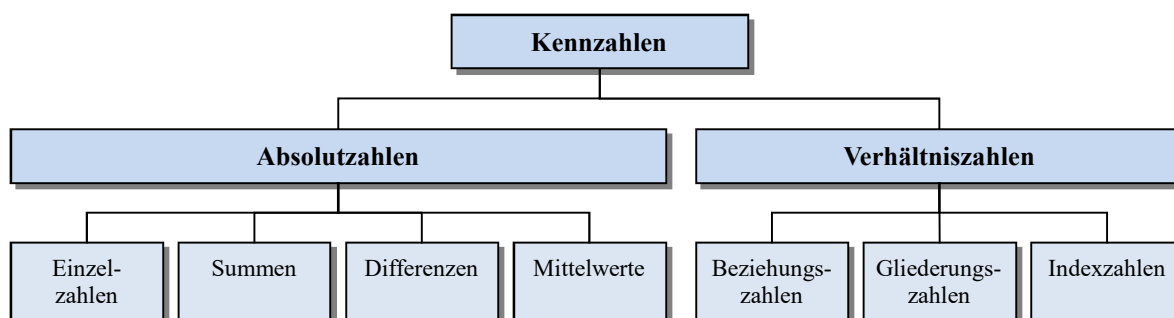


Abb. 24: Unterscheidung von Kennzahlen in Anlehnung an HORVÁTH [HORVÁTH 2009, S. 505]

Oftmals wird den Verhältniszahlen eine höhere Aussagefähigkeit zugesagt, weshalb diese in der Praxis bevorzugt werden [WEBER 1993a, S. 228 f.; HORVÁTH 2009, S. 505]. Diese Ansicht ist zum einen problematisch, weil Informationen verloren gehen, die nur mit Absolutzahlen zur Verfügung gestellt werden können. Andererseits bedürfen Absolutzahlen häufig der Angabe einer Einheit, sodass sie als Verhältniszahlen i. w. S. betrachtet werden können. Bei der Angabe der Anzahl der Fahrer in einem Routenzugsystem ist beispielsweise relevant, auf welchen Zeitraum sich diese Anzahl bezieht (z. B. Schicht oder Tag). Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Abgrenzung zwischen Absolutzahlen und Verhältniszahlen verzichtet.

6.3.1.2 Kennzahlensysteme

Nach HORVÁTH ist ein Kennzahlensystem die Gesamtheit von Kennzahlen zur vollständigen Information über einen Sachverhalt [HORVÁTH 2009, S. 507]. Es ist auf ein übergeordnetes Ziel ausgerichtet [REICHMANN 2006, S. 22]; in dieser Arbeit die Bewertung von Routenzugsystemen. Da einzelne Kennzahlen in der Regel eine geringe Aussagekraft haben und es zum Teil konkurrierende Ziele, wie niedrige Bestandskosten und hohe Materialverfügbarkeit gibt, setzen Kennzahlensysteme verschiedene Kennzahlen zueinander in Beziehung [WEBER 1993a, S. 230; SCHWARZER 2010, S. 29]. Abhängig von der Struktur lassen sich grundsätzlich Rechen- und Ordnungssysteme unterscheiden [HORVÁTH 2009, S. 507].

Rechensysteme beruhen auf der mathematischen Verknüpfung von Kennzahlen, wobei sich die erhobenen Kennzahlen in Form einer Pyramide darstellen lassen und in einer Spitzenkennzahl resultieren [HORVÁTH 2009, S. 507; SCHWARZER 2010, S. 29]. Ein bekanntes Beispiel für ein solches Kennzahlensystem ist das DuPont-System of Financial Control, bei dem der *Return on*

6 Bewertungsmodell

Investment (ROI) die Spitzenkennzahl darstellt [WEBER 1993a, S. 230]. Der Vorteil von Rechensystemen ist die hohe Operationalitat aufgrund der eindeutigen algorithmischen Beziehungen der Kennzahlen zueinander. Der Nachteil ist der begrenzte Anwendungsbereich, weil nicht alle relevanten Kennzahlen mathematisch miteinander verknupfut werden konnen [SYSKA 1990, S. 32].

Ordnungssysteme setzen Kennzahlen zueinander in Beziehung und teilen sie bestimmten Sachverhalten zu, um den Betrachtungsgegenstand systematisch und moglichst vollstandig zu erfassen [HORVATH 2009, S. 507; SCHWARZER 2010, S. 29]. Beispiele fur solche Kennzahlensysteme sind sogenannte KPI-Cockpits⁹⁵, in denen wichtige Kennzahlen, Grafiken und Auswertungen ausgerichtet auf das Informationsziel ubersichtlich dargestellt werden [SCHAFFNER, STURZ 2012, S. 22]. Der Vorteil von Ordnungssystemen ist die Moglichkeit, alle fur die Zielerreichung relevanten Kennzahlen erfassen zu konnen, da zwischen diesen nicht zwangslauufig eine mathematische Beziehung oder eine hierarchische Struktur bestehen muss [SCHWARZER 2010, S. 30]. Nachteilig ist die oftmals hohe Anzahl von Kennzahlen, um Sachverhalte moglichst vollstandig beschreiben zu konnen, sowie der damit verbundene hohe Aufwand fur die Datenbeschaffung [SYSKA 1990, S. 34].

Zielsysteme konnen als Erweiterung von Ordnungssystemen betrachtet werden [SCHWARZER 2010, S. 30]. Ausgehend von ubergeordneten Zielen bezogen auf einen Sachverhalt erfolgt die strukturierte Zerlegung in Teilziele, wobei diese zueinander in Beziehung stehen. Die Verknupfung muss aber nicht notwendigerweise quantifizierbar sein [SCHWARZER 2010, S. 30]. Ein Beispiel fur ein Zielsystem bietet die VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2, in der das Ziel einer hohen Logistikeffizienz in Teilziele und entsprechende Kennzahlen zerlegt wird [VDI 2004, S. 6]. Der Vorteil von Zielsystemen ist der zielgerichtete Einsatz von Kennzahlen, wodurch die Anzahl der zu erfassenden Kennzahlen sinnvoll eingegrenzt werden kann. Als nachteilig ist die eingeschrankte Operationalitat zu nennen [SYSKA 1990, S. 38].

6.3.1.3 Anforderungen an ein Kennzahlensystem

Die Anforderungen an ein Kennzahlensystem lassen sich aus den allgemeinen Anforderungen an Modelle (vgl. Abschnitt 4.3), die unabhangig vom zu bewertenden Sachverhalt gestellt werden, und die individuellen Anforderungen, die sich in dieser Arbeit aufgrund der Betrachtung von Routenzugsystemen ergeben, ableiten (vgl. Tab. 29).

6.3.1.4 Defizite existierender Kennzahlensysteme

In der Literatur finden sich verschiedene Logistik-Kennzahlensysteme [SCHWARZER 2010, S. 30 ff.], wobei dem **Logistik-Kennzahlen-System (LKS)** von SCHULTE aufgrund der hohen

⁹⁵ Key Performance Indicator (kurz: KPI).

Anzahl von Kennzahlen [SCHULTE 2009, S. 640 ff.] und dem Kennzahlensystem nach **Logi-BEST** aufgrund der Übernahme in die **VDI-Richtlinie 4400** [VDI 2001, S. 5 ff.; VDI 2002, S. 5 ff.; VDI 2004, S. 4 ff.] eine besonders hohe Bedeutung beigemessen werden können. Grundsätzlich besteht bei den vorhandenen Logistik-Kennzahlensystemen die Möglichkeit, die Unternehmenslogistik im Ganzen auf abstrakter Ebene bewerten zu können. Die Berücksichtigung spezifischer Gegebenheiten von Routenzugsystemen ist aufgrund der Abstraktion der Kennzahlen hingegen nicht möglich.

Tab. 29: Anforderungen an ein Kennzahlensystem

Zielorientierung	Ein Kennzahlensystem soll Aussagen über die Güte eines Routenzugsystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien ermöglichen. Die zu erfassenden Kennzahlen sollen relevant und auf den Benutzerkreis zugeschnitten sein.
Vollständigkeit	Ein Kennzahlensystem soll den zu bewertenden Sachverhalt vollständig wiedergeben, d. h. alle Elemente und Prozesse eines Routenzugsystems berücksichtigen.
Allgemeingültigkeit	Ein Kennzahlensystem soll bei unterschiedlichen in der Praxis vorkommenden Systemkonfigurationen anwendbar und vergleichbar sein.
Richtigkeit	Ein Kennzahlensystem soll die Zusammenhänge zwischen Eingangsgrößen und Kennzahlen in Abhängigkeit der Systemkonfiguration wirklichkeitsnah wiedergeben.
Objektivität	Die Kennzahlen sollen eindeutig und reproduzierbar sein.
Einfachheit	Ein Kennzahlensystem soll übersichtlich sein und die einfache Implementierung des Ist-Zustands erlauben. Es sollen möglichst wenige Kennzahlen erfasst werden, die nach Möglichkeit grafisch darstellbar und einfach zu interpretieren sind.
Genauigkeit	Ein Kennzahlensystem soll einen angemessenen Detaillierungsgrad der Abbildung und aussagekräftige Kennzahlen aufweisen.
Nachvollziehbarkeit	Die Berechnungen von Kennzahlenwerten sollen nachvollziehbar und verständlich sein. Die Beziehungen zwischen Kennzahlen sollen ersichtlich sein.
Änderbarkeit	Ein Kennzahlensystem soll an geänderte Randbedingungen und Zielsetzungen flexibel anpassbar und erweiterbar sein.

Den allgemeinen Logistik-Kennzahlensystemen stehen die routenzugspezifischen Kennzahlen aus der Literatur und der Software gemäß der Übersicht in der Tab. 9 (S. 36) gegenüber. Die jeweiligen Kennzahlen werden je nach Verwendungszweck situationsbezogen erhoben, weshalb sie oftmals weder vollständig noch sinnvoll auf andere Routenzugsysteme übertragbar sind. Anwendungsneutrale Kennzahlen, wie sie beispielsweise in der **VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2** [VDI 2016c] oder in der Software **RoutMan** [WUSTMANN 2014] zur Verfügung stehen, sind auf verschiedene Systeme übertragbar, decken allerdings nur einen kleinen Teil der in der Abb. 23 (S. 94) aufgeführten Zieldimensionen ab. Die bisher umfassendste Übersicht von Bewertungskriterien mit Berücksichtigung von monetären und nichtmonetären Kriterien bietet die im Projekt **IntegRoute** der TU München entwickelte Methodik zur ganzheitlichen Bewertung von Planungsvarianten [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 141 ff.]. Deren Fokus liegt allerdings auf dem relativen Vergleich unterschiedlicher Planungsvarianten, sodass eine absolute Bewertung eines geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystems nicht möglich ist [GÜNTNER,

KEUNTJE 2016, S. 142]. Dieser Umstand führt dazu, dass sich die Bewertung eines Routenzugsystems bei unterschiedlichen Vergleichssystemen ändert, was den in Abschnitt 6.3.1.3 formulierten Anforderungen nach *Verständlichkeit* und *Vergleichbarkeit* widerspricht.

Den existierenden Kennzahlensystemen ist gemein, dass die verwendeten Kennzahlen zwar benannt, aber oftmals unzureichend erläutert werden. Ist beispielsweise vom *zeitlichen Nutzungsgrad* die Rede, dessen Definition und Beschreibung bleibt hingegen aus, ist für den Anwender nicht ersichtlich, ob es sich um den *zeitlichen Nutzungsgrad des Mitarbeiters* oder den *zeitlichen Nutzungsgrad des Routenzugs* handelt. Des Weiteren sollte der Verwendungszweck einer Kennzahl formuliert werden, um den Anwender bei der Interpretation der Kennzahlen zu unterstützen. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, welche Faktoren eine Kennzahl beeinflussen und worauf sie selbst wiederum einen Einfluss hat. Erst damit können gezielt Optimierungsansätze identifiziert werden. Die betrachteten Kennzahlensysteme vernachlässigen diesen Aspekt, wodurch zwar Systemvergleiche möglich sind und Schwachstellen aufgedeckt werden können, die Verwendung im Sinne eines Steuerungsinstruments als Bindeglied zwischen Planung und Kontrolle ist hingegen nicht möglich [SCHWARZER 2010, S. 34].

6.3.2 Herleitung von Kennzahlen

Aufgrund der Defizite existierender Kennzahlensysteme ist die Herleitung und Definition von Kennzahlen notwendig. Ausgangspunkt dafür sind die in der Abb. 23 (S. 94) definierten Zieldimensionen, die es im Folgenden deduktiv zu konkretisieren gilt. Da routenzugspezifische Kennzahlen aufgrund unterschiedlicher Einheiten nicht durchgängig mathematisch miteinander verknüpft werden können (z. B. *Betriebskosten* und *zeitlicher Nutzungsgrad*), ist die Entwicklung eines Zielsystems nach Abschnitt 6.3.1.2 sinnvoll [SCHWARZER 2010, S. 30].

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es im Zuge der Bewertung unterschiedliche Möglichkeiten der Quantifizierung von Bewertungskriterien gibt. Am aussagekräftigsten sind diejenigen Bewertungskriterien, die auf direkt erfassbaren Größen, die gemessen oder berechnet werden können (z. B. Kosten oder Nutzungsgrade), basieren. Bei der Bewertung technischer Systeme sind hingegen oftmals Kriterien zu berücksichtigen, die nicht direkt messbar sind (z. B. Flexibilität⁹⁶) oder in unterschiedlichen Einheiten vorliegen [REFA 1990, S. 100 f.]. In diesem Fall ist eine indirekte Quantifizierung bzw. eine Normierung erforderlich [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 98]. Möglichkeiten dazu bieten beispielsweise die Bewertung nach der VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3 [VDI 1998] und die Nutzwertanalyse [ZANGEMEISTER 1976; ADAM 1996, S. 412 ff.; REFA 1990, S. 365] durch Zuordnung von Punktwerten entsprechend den Merkmalsausprägungen je Kriterium (vgl. Abschnitt 8.4.1.3). Eine weitere Möglichkeit der Quantifizierung bietet die multiattributive Nutzentheorie, bei der jeder Merkmalsausprägung

⁹⁶ Die Messung von Flexibilität erweist sich aufgrund ihrer Mehrdimensionalität und Situationsbezogenheit als schwierige Aufgabe [BELLMANN ET AL. 2009, S. 230]. In der Praxis erfolgt daher oft eine qualitative Bewertung.

entsprechend einer definierten Wertfunktion je Bewertungskriterium genau ein Teilnutzwert zwischen Null und Eins zugeordnet wird (vgl. Abschnitt 8.4.2) [ROTH 1998, S. 85 ff.].

Während die genannten Verfahren zum Zweck der Normierung als objektiv betrachtet werden können (insbesondere bei der Verwendung von Wertfunktionen), unterliegt die Quantifizierung qualitativer Kriterien oftmals subjektiven Einflüssen des Anwenders, z. B. aufgrund unterschiedlicher Beurteilung von Sachverhalten.⁹⁷ Für die Entwicklung einer allgemeinen Bewertungsmethodik zur individuellen Entscheidungsunterstützung ist dieses Vorgehen praktikabel. Im Zuge der Kennzahlenentwicklung und der darauf folgenden quantitativen Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschnitt 7.2.2) ist diese Vorgehensweise hingegen als kritisch zu beurteilen, da die Auswirkung einer Systemveränderung nicht durch die Dimensionierung des Routenzugsystems antizipiert werden kann (vgl. Abschnitt 6.4).

Eine weitere Möglichkeit zur Entwicklung einer Kennzahl für ein qualitatives Bewertungskriterium besteht durch die Berechnung des Erfüllungsgrades bezüglich eines Kriteriums [WEBER 1993a, S. 242]. Dies kann beispielsweise mithilfe von Checklisten erfolgen. Der Erfüllungsgrad entspricht dann dem Verhältnis der Anzahl der erfüllten Kriterien zur Gesamtanzahl der Kriterien (oder den erreichten Punkten im Verhältnis zur Gesamtpunktzahl, wenn für Merkmalsausprägungen Punkte vergeben werden [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 148 ff.]). Diese Vorgehensweise erlaubt zumindest in Grenzen die Antizipierung von Veränderungen, unterliegt nach WEBER aber dennoch erheblichen subjektiven Einflüssen des Anwenders und ist daher als kritisch anzusehen [WEBER 1993a, S. 243]. Als nachteilig ist weiterhin zu beurteilen, dass der Erfüllungsgrad eines Kriteriums z. B. von der Anzahl der Kriterien einer Checkliste abhängig ist. Zudem gehen alle Kriterien mit gleichem Anteil in die Bewertung ein (keine Präferenzbildung möglich) oder sie müssen vom Anwender vorab gewichtet werden, was bei umfangreichen Kriterienplänen nicht praktikabel ist [REFA 1990, S. 102; ADAM 1996, S. 417]).

Im Folgenden werden qualitative Bewertungskriterien benannt. Aufgrund der dargelegten Nachteile wird auf deren Quantifizierung hingegen weitestgehend verzichtet. Davon ausgenommen sind die qualitativen Kriterien *Ergonomie* sowie *zeitliche und kapazitive Flexibilität*, für die sich mittels definierter Berechnungsvorschriften Kennzahlen ableiten lassen (vgl. Abschnitt 6.3.2.2.4). Die damit einhergehende Eingrenzung der Anzahl der Kennzahlen wirkt sich positiv auf die Aussagefähigkeit und die Verständlichkeit des Kennzahlensystems aus (vgl. Abschnitt 6.3.1.3) und wirkt einer Kennzahleninflation [SCHULTE 2009, S. 668] entgegen.

Zu unterscheiden ist weiterhin zwischen messbaren Kennzahlen, die lediglich durch Beobachtungen erfasst werden können, und kalkulierbaren Kennzahlen, die mithilfe eines Dimensionie-

⁹⁷ Es ist zwischen der Subjektivität bei der Beurteilung eines Sachverhalts (z. B. Zuordnung eines Punktwerts zu einer Merkmalsausprägung) und der Subjektivität bei der Gewichtung von Kriterien (Präferenzbildung) zu unterscheiden. Während der erste Fall der Forderung nach *Vergleichbarkeit* (vgl. Abschnitt 6.3.1.3) widerspricht, ist der zweite Fall durchaus erwünscht, um individuelle Zielsetzungen berücksichtigen zu können.

rungsansatzes berechnet werden können. Zur ersten Kategorie zählt beispielsweise die Kennzahl *Unfallhäufigkeit*, die die Anzahl der Unfälle mit Ausfallzeit bezogen auf die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden vergangenheitsbezogen angibt. Die Auswirkung einer Systemveränderung auf das Systemverhalten kann bei diesen Kennzahlen zwar oftmals mit Blick auf die Wirkungsrichtung angegeben werden (z. B. Reduzierung der Anzahl der Unfälle bei Verkürzung der max. Routenzuglänge), ein funktioneller Zusammenhang besteht allerdings nicht bzw. ist in der Regel nicht bestimmbar. Zur Kategorie der kalkulierbaren Kennzahlen zählt beispielsweise der *zeitliche Nutzungsgrad der Mitarbeiter*, der das Verhältnis aus Einsatzzeit und des zur Verfügung stehenden Zeitangebots der Mitarbeiter angibt. Unter der Voraussetzung, dass ein Routenzugsystem planungskonform umgesetzt wird, ist die Einsatzzeit der Mitarbeiter anhand eines Dimensionierungsansatzes im Voraus kalkulierbar [VDI 2016c]. Die Abb. 25 zeigt die Kategorisierung von Bewertungskriterien und Kennzahlen im Kontext dieser Arbeit.

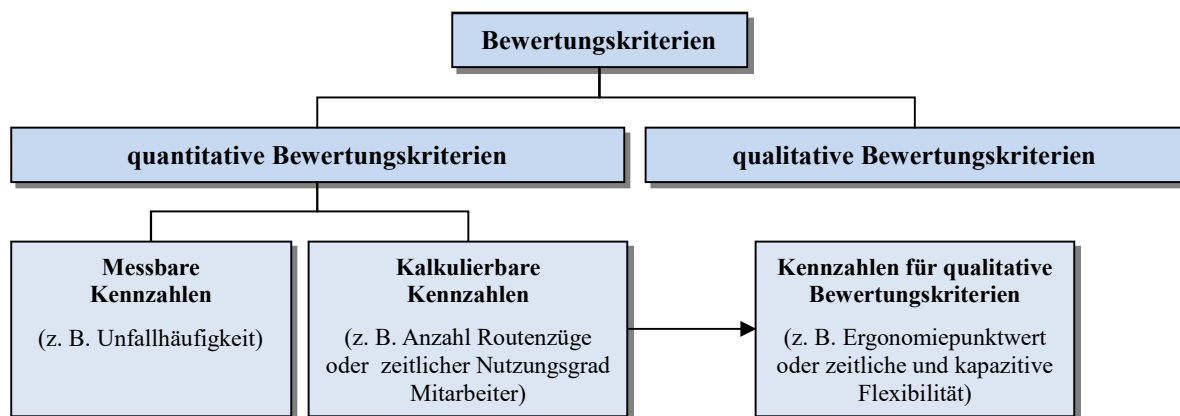


Abb. 25: Kategorisierung von Bewertungskriterien und Kennzahlen im Kontext der Arbeit

6.3.2.1 Identifizierung möglicher Bewertungskriterien

Die Identifizierung möglicher Bewertungskriterien erfolgt durch Literaturrecherche, Expertengespräche (z. B. Erfahrungsaustausch auf Konferenzen) und eigene Erfahrungen im Zuge der Planung und Bewertung von Routenzugsystemen. Dabei ist es das Ziel, die wesentlichen Bewertungskriterien bezogen auf eine Zieldimension zusammenzutragen.

6.3.2.1.1 Logistikleistung

Die Bewertungskriterien der Zieldimension *Zeit* umfassen u. a. die zeitlichen Größen, die bei der Dimensionierung von Routenzugsystemen von Relevanz sind. Diese sind der Tourenstartabstand bzw. die Routenfrequenz als dessen Kehrwert sowie die Zykluszeit⁹⁸ und deren Zeitanteile (vgl. Abschnitt 2.1) [VDI 2016c, S. 7 ff.]. Zudem ist die Wartezeit zwischen zwei Touren

⁹⁸ Die Bewertungen und Analysen in dieser Arbeit basieren auf durchschnittlichen Durchsätzen, Zeiten, usw. im Sinne des Grundmodells der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 6 ff.]. Demnach handelt es sich um „mittlere“ Durchsätze, Zeiten, usw., wobei auf die explizite Nennung dieses Zusatzes verzichtet wird.

zu berücksichtigen, die nicht der Zykluszeit zuzurechnen ist. Der bereits angesprochene zeitliche Nutzungsgrad (Verhältnis aus Einsatzzeit zu Zeitangebot) ist ein gängiges Kriterium zur Bewertung von Routenzugsystemen [VDI 2016c, S. 9], wobei zwischen dem zeitlichen Nutzungsgrad der Mitarbeiter und dem zeitlichen Nutzungsgrad des Routenzugs zu unterscheiden ist. Ein weiteres zeitliches Bewertungskriterium mit hoher praktischer Bedeutung ist die Wiederbeschaffungszeit, die die Zeitspanne zwischen der Signalisierung eines Transportbedarfs und der Bereitstellung des zugehörigen Transportguts am Bereitstellort angibt (vgl. Abschnitt 2.1). Sie spiegelt damit die Durchlaufzeit eines Transportauftrags in einem Routenzugsystem wider.

Die Bewertungskriterien der Zieldimension *Ressourcen* berücksichtigen u. a. die Anzahl der eingesetzten Ressourcen differenziert nach den technischen Systemelementen (Ladungsträger, Transportmittel, Be- und Entladetechnik, Bereitstelltechnik und Informationstechnik) sowie auch die Anzahl der im Routenzugsystem eingesetzten Mitarbeiter. Der Trend zur Automatisierung von Prozessen in Routenzugsystemen [MARTINI ET AL. 2014b; KRAUSE ET AL. 2015; KEUNTJE, GÜNTNER 2016a, S. 210; FISCHER 2016] erfordert zudem die Bewertung der Ressourcen bezüglich ihres Automatisierungsgrades und ihrer Verfügbarkeit.

Analog zur Zieldimension *Zeit* ist der auf die Ressourcennutzung bezogene kapazitive Nutzungsgrad (Verhältnis aus genutzter Kapazität zu maximal möglicher Kapazität) bedeutsam, wobei die Nutzungsgrade ressourcenspezifisch zu bestimmen sind. Für die Dimensionierung eines Routenzugsystems ist beispielsweise die Einbeziehung des kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs zwingend [VDI 2016c, S. 8], wohingegen der kapazitive Nutzungsgrad der Puffer an den Bereitstellorten in der Regel erst im Zuge der Bewertung relevant ist.

Die Zieldimension *Materialfluss* beinhaltet u. a. durchsatzbezogene Bewertungskriterien. Durchsätze bezeichnen transportierte Mengen je Zeiteinheit (Produktivität), wobei diese auf Systemelemente (z. B. Route) oder das Gesamtsystem bezogen werden können. Des Weiteren werden Kriterien zur Bewertung der Ressourcennutzung berücksichtigt, die nicht eindeutig den Zieldimensionen *Zeit* oder *Ressource* zuzuordnen sind. Dazu zählen beispielsweise zurückgelegte Wegstrecken, die Anzahl realisierter Touren, die Anzahl der Haltevorgänge je Tour oder das Verkehrsaufkommen. Der Gesamtnutzungsgrad als Kombination aus zeitlichem und kapazitivem Nutzungsgrad wird ebenfalls dem Materialfluss zugeordnet. Die Abb. 26 stellt die Bewertungskriterien der Zieldimensionen *Zeit*, *Ressource* und *Materialfluss* zusammenfassend dar.



Abb. 26: Übersicht logistikleistungsbezogener Bewertungskriterien für Routenzugsysteme

6.3.2.1.2 Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Routenzugsystems sind zum einen die einmalig anfallenden Investitionskosten sowie zum anderen die laufenden Betriebskosten relevant. Die Investitionskosten sind dabei in zweierlei Hinsicht zu beachten; zum einen muss das Budget für eine Investition vorhanden sein, zum anderen gehen die Investitionskosten über kalkulatorische Zinsen und Abschreibungen in die Betriebskosten ein [MARTIN 2016, S. 122]. Deshalb sind auch bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten zu berücksichtigen.

Die *Investitionskosten* werden sinnvollerweise nach den Systemelementen unterschieden, deren Anzahl multipliziert mit dem jeweiligen Kostensatz die Höhe der Investitionen bestimmt. Hinsichtlich der Systemelemente wird analog zum Abschnitt 5.1 zwischen

- Ladungsträger,
- Transportmittel,⁹⁹
- Be- und Entladetechnik,
- Bereitstelltechnik und
- Informationstechnik

differenziert. Darüber hinaus sind Investitionskosten zu berücksichtigen, die diesen Kategorien nicht direkt zuzuordnen sind, wie beispielsweise Schulungs- und Anlaufkosten.

Hinsichtlich der *Betriebskosten* wird zwischen fixen, nutzungsunabhängigen und variablen, nutzungsabhängigen Kosten unterschieden [MARTIN 2016, S. 122]. Zu den fixen Kosten zählen beispielsweise die Kapitalkosten, zu den variablen Kosten beispielsweise die Energiekosten.

⁹⁹ Unter dem Begriff Transportmittel werden sowohl Routenzüge als auch zusätzliche Zug-/Schiebehilfen oder Transporthilfsmittel (z. B. Trolleys) zusammengefasst. Kriterien bzw. Kennzahlen, die sich auf eine bestimmte Transportmittelart beziehen, werden entsprechend benannt.

Des Weiteren gibt es Kostenarten, die in fixe und variable Anteile zerlegt werden können. Ein Beispiel dafür sind Wartungs- und Reparaturkosten (z. B. nutzungsunabhängige Wartungsverträge und nutzungsabhängiger Reifenverschleiß). In der vorliegenden Arbeit werden die Kosten eindeutig den fixen oder variablen Kosten zugeordnet, da die Unterscheidung den Datenerfassungsaufwand ohne erkennbaren Mehrwert erhöhen würde.

Die fixen Kosten umfassen in dieser Arbeit die Kapitalkosten, Abschreibungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten (basierend auf den Investitionen), etwaige Lizenzkosten, die Bestandskosten¹⁰⁰ sowie die Flächenkosten¹⁰¹. Die variablen Kosten berücksichtigen Energie- und Personalkosten¹⁰². Die Abb. 27 stellt die Bewertungskriterien der Zieldimensionen *Investitionskosten* und *Betriebskosten* zusammenfassend dar.

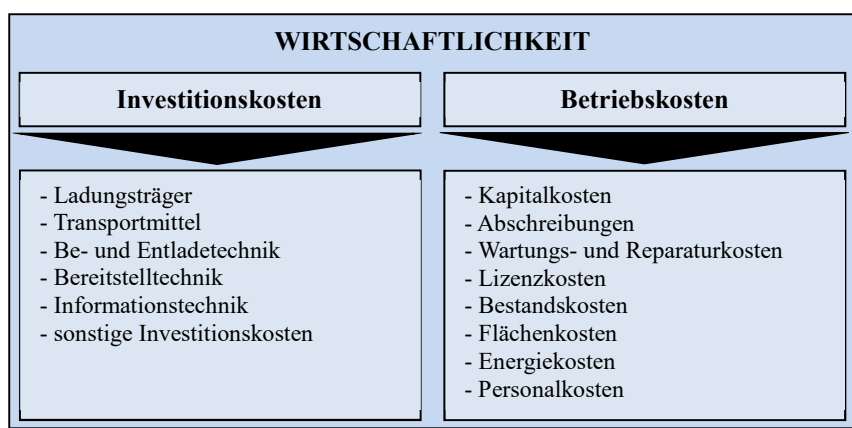


Abb. 27: Übersicht wirtschaftlicher Bewertungskriterien für Routenzugsysteme

6.3.2.1.3 Qualität

Die Zieldimension *Lieferservice* umfasst die qualitativen Bewertungskriterien zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines Routenzugsystems [KENNING, KRIEGER 2017]. Dazu zählt beispielsweise der Servicegrad des Systems, unterteilt in die Kriterien Liefertermintreue und -abweichung sowie die Liefermengentreue und -abweichung [VDI 2004, S. 6; SCHULTE 2009, S. 642 ff.].

¹⁰⁰ Die Bestandskosten werden in dieser Arbeit als Fixkosten betrachtet, weil davon auszugehen ist, dass die Höhe der Bestände innerhalb der Systemgrenzen nicht von der Nutzung des Routenzugsystems abhängt, sondern von den vor- und nachgelagerten Prozessen. Bei gleicher Materialzu- und -abflussrate ist demnach die Bestandsgröße innerhalb der Systemgrenzen fix, es findet lediglich eine „Verschiebung der Bestände“ statt.

¹⁰¹ Entgegen der Auffassung von GÜNTNER und KEUNTJE werden die Flächenkosten den Betriebskosten zugeordnet, da die in vielen Unternehmen übliche Bewertung mittels Flächenkostensätzen einer Anmietung von Fläche (laufende Kosten) gleichkommt [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 100].

¹⁰² Personalkosten können sowohl fixe als auch variable Kostenbestandteile enthalten [WÖHE, DÖRING 2013, S. 888 f.]. In dieser Arbeit werden die Personalkosten anhand des zeitlichen Nutzungsgrades der Mitarbeiter verursachungsgerecht ermittelt, weshalb die Zurechnung zu den variablen Kosten erfolgt.

6 Bewertungsmodell

In der Zieldimension *Sicherheit* werden Bewertungskriterien berücksichtigt, die dazu dienen das Gefährdungs- und Schadensrisiko von Menschen, technischen Systemelementen und Transportgütern zu beurteilen. Dazu zählen vergangenheitsbezogene Kriterien wie die Unfallhäufigkeit, die bezogen auf eine Bezugsgröße die Anzahl der Unfälle angibt [SCHULTE 2009, S. 648], sowie die Unfallschwere, die in der Regel durch die Zahl der Ausfalltage bei Personenschäden ausgedrückt wird [HAUFE 2017]. Des Weiteren ist die Technik im Hinblick auf das zu erwartende Gefährdungs- und Schadensrisiko bei der Bedienung zu berücksichtigen. Dies umfasst beispielsweise redundante Sicherheitseinrichtungen für die Fixierung von Ladungsträgern oder das Risiko unsachgemäßer Bedienung [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 149].

Unter *Ergonomie* werden Kriterien zusammengefasst, die eine Bewertung der Belastung von Mitarbeitern durch die Ausführung von Tätigkeiten ermöglicht [BULLINGER 1994, S. 30]. Hinsichtlich der Tätigkeiten in einem Routenzugsystem entstehen Belastungen insbesondere durch die Bedienung von Systemelementen und die Handhabung von Ladungsträgern. Des Weiteren sind die Arbeitsorganisation und die Arbeitsumgebung zu berücksichtigen [BULLINGER 1994, S. 30]. Während die Arbeitsorganisation die prozessbezogenen Ausführungsbedingungen, wie z. B. die Höhe für die Aufnahme und Abgabe von Ladungsträgern, intern definiert, umfasst die Arbeitsumgebung externe Umgebungseinflüsse, wie z. B. die Temperatur.

Die Zieldimension *Transparenz* enthält Kriterien zur Bewertung der Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit von Strukturen und Prozessen. Transparenz bei der Be- und Entladung (z. B. durch die Ordnung der Ladung auf dem Routenzug oder die Zuordnung fester Plätze an Bereitstellorten), der Steuerung der Tourenstarts (z. B. feste Fahrpläne) oder der Routenzuordnung (z. B. feste Zuordnung von Fahrern zu Routen) schafft Akzeptanz bei den Mitarbeitern. Weitere Kriterien umfassen den Materialfluss (z. B. Materialflusssteuerungsprinzip) und den Informationsfluss (z. B. technischer Informationsträger), deren Kombination insbesondere die Nachvollziehbarkeit der Transportauftragsauslösung beeinflusst. Die Prozessdurchgängigkeit berücksichtigt beispielsweise die Integration der Be- und Entladung.

Die Bewertungskriterien der Zieldimension *Technikeigenschaften* sind aufgrund zahlreicher technischer Gestaltungsmöglichkeiten und vielfältiger Einsatzbedingungen nur kategorisch den entsprechenden technischen Systemelementen zuzuordnen. Hinsichtlich der Ladungsträger sind insbesondere die Kriterien Abmessungen, Gewichte, Handhabbarkeit und Transportkapazität relevant (vgl. Abschnitt 5.1.1). Beispielhafte Kriterien bei der Transportmittelauswahl sind Abmessungen, Gewichte, Wendekreis, Spurtreue von Anhängern, zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Geräuschentwicklung oder Vibrationen (vgl. Abschnitt 5.1.2) [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 148]. Die Bewertung der Be- und Entladetechnik ist z. B. auf Basis des Flächenbedarfs, der Prozesszeiten oder der Notwendigkeit zum Einsatz weiterer Hilfsmittel möglich (vgl. Abschnitt 5.1.3). Die Bereitstelltechnik lässt sich z. B. anhand des Flächenbedarfs, der Höhenausnutzung oder der Umsetzbarkeit von verschiedenen Nachschubstrategien bewerten (vgl. Abschnitt 5.1.4). Gemäß Abschnitt 5.1.5 sind für die Bewertung der Informationstechnik u. a. die

Art des technischen Informationsträgers, die Informationsfülle und -qualität, die Informationsverarbeitungszeiten und die Fehleranfälligkeit relevant.

Die Bewertungskriterien der Zieldimension *Robustheit* erlauben die Beurteilung von Techniken und Prozessen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 148 ff.]. Technische Systemelemente sind dabei bezüglich ihres Risikos für technische Defekte bzw. Ausfälle zu bewerten. Die Robustheit des Prozesses umfasst den Vergleich von Ist- zu Soll-Prozess hinsichtlich der Stabilität von z. B. Prozesszeiten. Des Weiteren wird darunter die Fähigkeit des Gesamtsystems verstanden mit den vorhandenen oder geplanten Ressourcen auf Schwankungen des Transportbedarfs reagieren zu können.

Flexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Systems sich an wechselnde Umstände bei gegebenen Strukturen anzupassen [KNOF 1992, S. 67; SCHENK ET AL. 2014, S. 40]. Maßgebliche Bewertungskriterien dieser Zieldimension beziehen sich auf die Flexibilität von Systemelementen, z. B. die Fähigkeit mit Routenzügen in Außenbereichen oder rückwärts fahren zu können, die Fähigkeit zur zweiseitigen Be- und Entladung von Anhängern oder die Eignung der Technik für unterschiedliche Ladungsträgertypen (vgl. Abschnitt 5.1). Zudem ist die zeitliche und kapazitive Flexibilität im Sinne zeitlicher und kapazitiver Reserven des Routenzugsystems sowie deren Kombination zur Gesamtflexibilität relevant.

Wandlungsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Systems die Strukturen an wechselnde Umstände anzupassen und zu entwickeln [HARTMANN 1996, S. 25; SCHENK ET AL. 2014, S. 39 f.]. Häufig genannte Bewertungskriterien dieser Zieldimension sind die Modularität (z. B. standardisierte Systemelemente), die Skalierbarkeit (z. B. Erweiter- und Reduzierbarkeit), die Mobilität (z. B. örtlich uneingeschränkte Bewegbarkeit), die Universalität (z. B. Gestaltung nach Anforderungen) und die Kompatibilität (z. B. Vernetzungsfähigkeit) [SCHENK ET AL. 2014, S. 41; KRAUSE ET AL. 2016, S. 46]. Die Abb. 28 stellt die Bewertungskriterien der Zieldimension *Qualität* zusammenfassend dar.

6.3.2.2 Bestimmung und Darstellung relevanter Kennzahlen

Es ist sicherzustellen, dass die Bewertung auf der Basis eindeutig definierbarer und quantifizierbarer Sachverhalte erfolgt (vgl. Abschnitt 6.3.1.1). Das ist vor dem Hintergrund der angestrebten sensitivitätsanalytischen Betrachtung und der systematischen Identifizierung von Optimierungsansätzen zwingend erforderlich. Wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben, sind im Sinne der zielorientierten Kennzahlenbestimmung lediglich mess- und kalkulierbare Kennzahlen zu berücksichtigen, die der nachfolgenden Analyse dienen. Dazu werden zunächst die quantifizierbaren Kennzahlen deduktiv aus den vorgenannten Bewertungskriterien abgeleitet und einheitlich mithilfe von Definitionsblättern in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 [VDI 2004, S. 7 ff.] dargestellt (vgl. Tab. 30 und Anhang A.1 bis A.4).

6 Bewertungsmodell

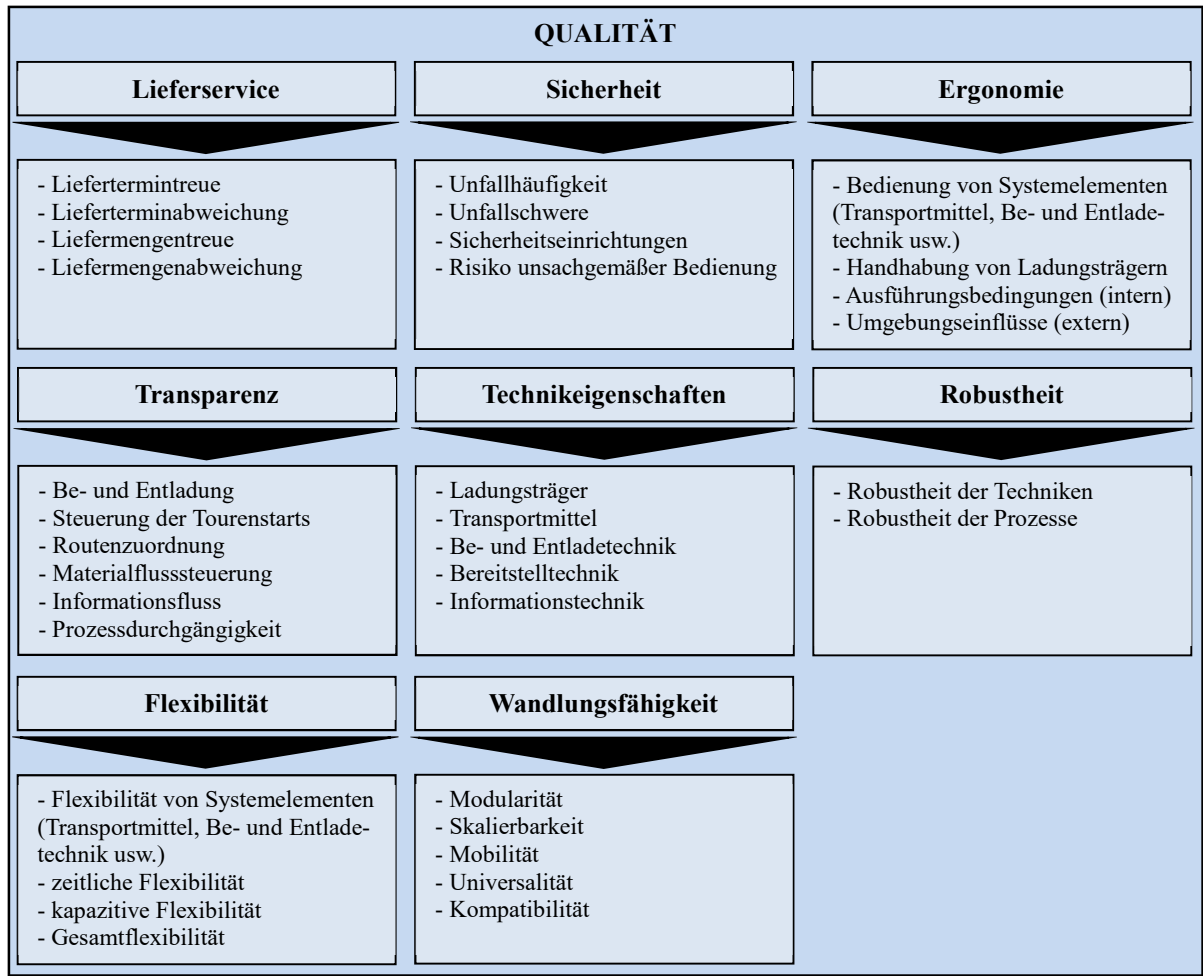


Abb. 28: Übersicht qualitätsbezogener Bewertungskriterien für Routenzugsysteme

Tab. 30: Aufbau der Definitionsblätter in Anlehnung an SYSKA und die VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 [SYSKA 1990, S. 46 ff.; VDI 2004]

Abkürzung	Bezeichnung der Kennzahl
Definition	Formel bzw. Vorschrift zur Berechnung des Kennzahlwerts.
Beschreibung	Beschreibt die Kennzahl sowie die Formelbestandteile und gibt Hinweise zur Erhebung.
Zweck	Beschreibt den Zweck, der mit der Kennzahl verfolgt wird und gibt Hinweise zur Interpretation.
Daten	Benennt Daten- und Informationsquellen, die für die Berechnung des Kennzahlwerts erforderlich sind.
Beeinflussung durch	Gibt an, durch welche Parameter und Sachverhalte die Kennzahl direkt beeinflusst wird.
Beeinflusst	Gibt an, welche Parameter und Sachverhalte durch die Kennzahl direkt beeinflusst werden.
Bemerkung (optional)	Ermöglicht die Angabe zusätzlicher Informationen.

Die Definitionsblätter beinhalten zum einen die Klassifizierung, Definitionen und Beschreibungen von Kennzahlen. Zum anderen sind Informationen über den mit der Kennzahl verfolgten Zweck, den Datenbedarf und zugehörige Einflussgrößen kompakt und übersichtlich darstellbar. Damit stellen sie nicht nur die Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Kennzahlen sicher, sondern dienen insbesondere als Grundlage für die Identifizierung des Informationsbedarfs (vgl. Abschnitt 6.5), der relevanten Einflussgrößen für die Analyse (vgl. Abschnitt 7.2.2.2) und der potentiellen Optimierungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 8.2).

Gemäß der zugrunde gelegten Modellstruktur können sich Kennzahlen auf unterschiedliche Systemelemente beziehen. Beispielsweise kann der *zeitliche Nutzungsgrad der Mitarbeiter* bezogen auf das Routenzugsystem oder bezogen auf einzelne Routen bestimmt werden. Im weiteren Verlauf erfolgt eine neutrale Definition der Kennzahlen, um das Kennzahlensystem möglichst überschaubar, aber trotzdem vollständig zu entwickeln.

Die verwendeten Abkürzungen ermöglichen dem Anwender die schnelle Einordnung von Kennzahlen bzw. das schnelle Auffinden von Kennzahlen in der Kennzahlenstruktur, z. B. in den Dropdown-Listen der Analyse-Tabellenblätter im Excel-Tool (vgl. Abschnitt 7.5.1.3). Die Buchstaben- und Ziffernkombination ist wie folgt aufgebaut:

Kategorie - Zieldimension - Nummer der Kennzahl

Beispielsweise steht die Abkürzung *L-Z-17* für die 17. *Kennzahl* in der Zieldimension *Zeit* der Kategorie *Logistikleistung*.

Die Auswahl der Kennzahlen orientiert sich im Wesentlichen an der gesichteten Literatur und gängigen Software-Produkten (vgl. Abschnitt 3.2), den allgemeinen Logistik-Kennzahlensystemen der VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 [VDI 2004, S. 6] und von SCHULTE [SCHULTE 2009, S. 642] sowie den routenzugspezifischen Kennzahlen aus der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 12]. Die Kennzahlen sollen u. a. den Vergleich unterschiedlicher Routenzugsysteme ermöglichen, weshalb es erforderlich ist, Strukturkennzahlen zu definieren [SCHULTE 2009, S. 640].

6.3.2.2.1 Strukturkennzahlen

Die Struktur eines Routenzugsystems und des verwendeten Bewertungsmodells ist in erster Linie bestimmt durch die Anzahl der Routen des Gesamtsystems (vgl. Abschnitt 6.1). Auf der darunterliegenden Ebene sind die Routen jeweils charakterisiert durch die Anzahl der Bereitstellorte (Quelle/n und Senke/n), die Anzahl der Haltepunkte und die Routenlänge. Diese strukturellen Parameter sind z. B. für die Berechnung der routenbezogenen Zykluszeiten erforderlich und im Rahmen des Bewertungsmodells vorzugeben [VDI 2016c, S. 8 ff.]. Die Tab. 31 zeigt die Übersicht der Strukturkennzahlen.

6 Bewertungsmodell

Tab. 31: Übersicht der Strukturkennzahlen

Strukturkennzahlen	
Abk.	Bezeichnung
S-1	Anzahl der Routen
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)
S-4	Anzahl der Haltepunkte
S-5	Routenlänge

Legende: S: Strukturkennzahl

Die Tab. 32 zeigt beispielhaft das Definitionsblatt der Strukturkennzahl *Anzahl der Routen*.¹⁰³ Die Definitionsblätter aller Strukturkennzahlen sind der Übersichtlichkeit halber im Anhang A.1 dargestellt.

Tab. 32: Definitionsblatt zur Kennzahl *Anzahl der Routen*

S-1	Anzahl der Routen
Definition	
$n_R = \text{Anzahl der Routen}$	
Beschreibung	
Die Kennzahl gibt an, wie viele Routen ein Routenzugsystem umfasst.	
Zweck	
Die Anzahl der Routen eines Routenzugsystems ist abhängig von der Routenplanung und dient u. a. als Indikator für die „Größe“ eines Routenzugsystems. Mit steigender Anzahl der Routen erhöht sich in der Regel die Komplexität des Gesamtsystems, weil die Abhängigkeiten der Routen untereinander zunehmen (z. B. durch gemeinsame und konkurrierende Nutzung von Verkehrsflächen). Die Anzahl der Routen ermöglicht die Bestimmung von routenbezogenen Durchschnittskennzahlen (z. B. mittlerer Durchsatz pro Route) zwecks internem (Abweichungsanalyse) oder externem Vergleich (Benchmarking).	
Daten	
Ergebnis der Routenplanung	
Beeinflussung durch	
Routenplanung	
Beeinflusst	
„Größe“ des Routenzugsystems / Transparenz / routenbezogene Kennzahlen	
Bemerkung	
Im Zuge des Bewertungsmodells dient die Angabe der Anzahl der Routen insbesondere der Abbildung der Systemstruktur im Excel-Tool durch die Erstellung der jeweiligen routenspezifischen Eingabe-, Berechnungs- und Ausgabefelder.	

6.3.2.2 Logistikleistungskennzahlen

Eine wesentliche zeitliche Größe bei der Planung und dem Betrieb von Routenzugsystemen ist der Tourenstartabstand, wobei zwischen dem maximal möglichen, dem mindestens erforderlichen und dem tatsächlichen Tourenstartabstand zu unterscheiden ist [FEIL 2016, S. 65]. Der maximal mögliche Tourenstartabstand gibt den zeitlichen Abstand zweier Tourenstarts an, bei dem der geforderte Durchsatz einer Route gerade noch erreicht wird (kapazitiver Nutzungsgrad

¹⁰³ Da die Strukturkennzahlen keine Zieldimension besitzen, sind die Abkürzungen lediglich anhand der Kategorie und der Kennzahlnummer definiert.

= 100 %) [VDI 2016c, S. 8]. Der mindestens erforderliche Tourenstartabstand gibt bezogen auf eine vorgegebene Routenzuganzahl den zeitlichen Abstand zweier Tourenstarts an, bei dem der Durchsatz einer Route gerade noch erreicht wird (zeitlicher Nutzungsgrad = 100 %). Der tatsächliche Tourenstartabstand liegt zwischen den beiden Grenzwerten im sogenannten Betriebsbereich des Routenzugsystems [DROSTE 2013, S. 135 ff.].

Die Kennzahlen der Zieldimension *Zeit* umfassen zudem die Zykluszeit, deren jeweilige Bestandteile gemäß Abschnitt 2.1 sowie wiederum deren prozentuale Anteile an der Zykluszeit. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 beinhaltet die Fahrzeit sowohl die Bewegung des Routenzugs mit konstanter Geschwindigkeit entlang des Fahrwegs als auch Zeitzuschläge, z. B. prozessbedingte Wartezeiten für das Passieren von Toren oder aufgrund von Blockaden an Kreuzungen [VDI 2016c, S. 8]. Abzugrenzen davon ist die Wartezeit des Routenzugs zwischen der Beendigung einer Tour und dem Start der nächsten Tour. Diese ergibt sich als Differenz zwischen dem tatsächlichen Tourenstartabstand und der Zykluszeit. Mithilfe der aufgeführten Zeitanteile lässt sich der zeitliche Nutzungsgrad für den Routenzug und die Mitarbeiter erfassen.

Die tatsächliche Wiederbeschaffungszeit variiert zwischen einem minimalen und maximalen Wert und kann daher nur einzelfallabhängig bestimmt werden. Die minimalen und maximalen Wiederbeschaffungszeiten können hingegen in Abhängigkeit von den relevanten Gestaltungsmöglichkeiten (z. B. Integration/Entkopplung von Be- und Entladung oder Art des technischen Informationsträgers) zumindest näherungsweise bestimmt werden (vgl. Abb. 18 auf S. 81) und sind daher als relevante Kennzahlen zu berücksichtigen.

Die Kennzahlen der Zieldimensionen *Ressourcen* und *Materialfluss* entsprechen weitestgehend den in Abschnitt 6.3.2.1.1 benannten Kriterien. Die Bestimmung des kapazitiven Nutzungsgrades erfolgt ressourcenbezogen für den Routenzug und den Puffer. In diesem Zuge sind jeweils die verfügbaren Kapazitäten sowie die mittlere Beladung des Routenzugs bzw. die mittlere Belegung des Puffers zu erfassen. Hinsichtlich der zurückgelegten Wegstrecke wird zwecks Vergleichbarkeit mit anderen Transportsystemen unterschieden zwischen der Länge des Fahrwegs pro Routenzug, der Länge des Fahrwegs pro Stunde sowie der Länge des Gehwegs pro Mitarbeiter. Die Verkehrsdichte gibt die Anzahl der Routenzüge an, die pro Zeiteinheit einen bestimmten Streckenabschnitt passieren und dient als Kennzahl für die Erfassung des Verkehrsaufkommens¹⁰⁴. Die Tab. 33 zeigt die Übersicht der Logistikleistungskennzahlen. Die Definitionsblätter sind im Anhang A.2 dargestellt.

¹⁰⁴ Untersuchungen mittels Simulationen haben gezeigt, dass ein hohes Verkehrsaufkommen nicht mit einer hohen Störanfälligkeit gleichzusetzen ist, weil diese maßgeblich von individuellen Gegebenheiten, wie z. B. der Lage von Haltepunkten, abhängig ist [STAAB ET AL. 2013, S. 174]. Das Verkehrsaufkommen kann allerdings als Indikator für das Risiko von Störungen und Blockaden angesehen werden [HOMOLKA 2016, S. 25 ff.].

6 Bewertungsmodell

Tab. 33: Übersicht der Logistikleistungskennzahlen

Logistikleistungskennzahlen	
Abk.	Bezeichnung
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand
L-Z-4	Zykluszeit
L-Z-5	Wartezeit
L-Z-6	Anteil Zykluszeit
L-Z-7	Anteil Wartezeit
L-Z-8	Beladezeit
L-Z-9	Fahrzeit
L-Z-10	Haltepunktzeit
L-Z-11	Entladezeit
L-Z-12	Anteil Beladezeit
L-Z-13	Anteil Fahrzeit
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit
L-Z-15	Anteil Entladezeit
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit
L-R-1	Anzahl Ladungsträger
L-R-2	Anzahl Transportmittel
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik
L-R-5	Anzahl Informationstechnik
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter
L-R-7	Automatisierungsgrad
L-R-8	Verfügbarkeit
L-R-9	Routenzugkapazität
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug
L-R-12	Pufferkapazität Bereitstellorte
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer
L-M-1	Durchsatz
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug
L-M-3	Länge Fahrweg pro Zeiteinheit
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter
L-M-5	Anzahl Touren
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour
L-M-7	Verkehrsdichte
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad

Legende: L: Logistikleistungskennzahl; Z: Zeit; R: Ressource; M: Materialfluss

6.3.2.2.3 Wirtschaftlichkeitskennzahlen

Die Wirtschaftlichkeitskennzahlen im Hinblick auf die *Investitionskosten* entsprechen den in Abschnitt 6.3.2.1.2 definierten Bewertungskriterien, ergänzt um die gesamten Investitionskosten als Summe der Investitionen in das Routenzugsystem. Bezogen auf diesen Wert können zudem die Investitionen in technische Systemelemente und sonstige Investitionen anteilig bestimmt werden, um die Zusammensetzung der Investitionskosten zu bestimmen.

Hinsichtlich der *Betriebskosten* entsprechen die relevanten Kennzahlen ebenfalls den identifizierten Bewertungskriterien, ergänzt um die Summe der Betriebskostenarten sowie die Kennzahlen zur Berechnung der anteiligen Betriebskosten. Des Weiteren können die fixen und variablen Kosten sowie deren Anteile an den Betriebskosten nach Abschnitt 6.3.2.1.2 berechnet werden, um beispielsweise Deckungsbeitragsrechnungen durchführen zu können [HORVÁTH 2009, S. 419].

Weitere gängige Logistikkosten-Kennzahlen betrachten die gesamten Betriebskosten in Relation zu verschiedenen Bezugsgrößen. Die Kosten pro Transporteinheit sind im Rahmen dieser Arbeit als relevant einzuschätzen, weil diese Kennzahl weit verbreitet ist [WEBER 1993a, S. 217; VDI 2001, S. 6; SCHULTE 2009, S. 642] und damit der direkte Vergleich eines Routenzugsystems mit anderen Transportsystemen möglich ist. Die Tab. 34 zeigt die Übersicht der Wirtschaftlichkeitskennzahlen, deren Definitionsblätter im Anhang A.3 dargestellt sind.

6.3.2.2.4 Qualitätskennzahlen

Die Bewertungskriterien der Zieldimension *Lieferservice* gemäß Abschnitt 6.3.2.1.3 können als Qualitätskennzahlen übernommen werden, da sie in dieser Form etabliert und zudem direkt messbar sind [VDI 2004, S. 6 ff.]. Für die Zieldimension *Sicherheit* trifft dies auf die Unfallhäufigkeit, die Unfallschwere sowie die Schadenhäufigkeit zu. Die Messung oder Kalkulation der Güte von Sicherheitseinrichtungen bzw. des Risikos für unsachgemäße Bedienung von Systemelementen ist hingegen nicht möglich.

Die Bewertung der Ergonomie in Unternehmen erfolgt in der Regel anhand von individuellen Belastungs- und Gefährdungsbeurteilungen bezüglich relevanter Kriterien und anschließender Transformation in entsprechende Bewertungsskalen, z. B. mithilfe des Belastungs-Dokumentations-Systems (BDS) [ASER 2017] oder dem Automotive Assembly Worksheet (AAWS) [SCHAUB 2004, S. 91 ff.]. Eine direkte Messung oder Kalkulation von Kennzahlenwerten ist damit allerdings nicht möglich. Für die Bewertung der physischen Belastung bei Lastenhandhabungen in Routenzugsystemen hat sich das Multiple-Lasten-Tool (MLT) etabliert [DROSTE 2013, S. 96; KELTERBORN ET AL. 2013, S. 848; GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 146]. Das Verfahren basiert auf den Leitmerkmalmethoden der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) [BAUA 2014] und erlaubt die systematische Berechnung eines Punktwerts, der im Folgenden als Kennzahl verwendet wird [IAD 2010a; IAD 2010b].

6 Bewertungsmodell

Tab. 34: Übersicht der Wirtschaftlichkeitskennzahlen

Wirtschaftlichkeitskennzahlen	
Abk.	Bezeichnung
W-I-1	Investitionskosten Gesamt
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik
W-I-7	Sonstige Investitionskosten
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten
W-B-1	Betriebskosten
W-B-2	Kapitalkosten
W-B-3	Abschreibungen
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten
W-B-5	Lizenzkosten
W-B-6	Bestandskosten
W-B-7	Flächenkosten
W-B-8	Energiekosten
W-B-9	Personalkosten
W-B-10	Anteil Kapitalkosten
W-B-11	Anteil Abschreibungen
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten
W-B-13	Anteil Lizenzkosten
W-B-14	Anteil Bestandskosten
W-B-15	Anteil Flächenkosten
W-B-16	Anteil Energiekosten
W-B-17	Anteil Personalkosten
W-B-18	Fixe Kosten
W-B-19	Variable Kosten
W-B-20	Anteil fixe Kosten
W-B-21	Anteil variable Kosten
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit

Legende: W: Wirtschaftlichkeitskennzahl; I: Investitionskosten; B: Betriebskosten

Die Überführung der qualitativen Bewertungskriterien der Zieldimensionen *Transparenz*, *Technikeigenschaften*, *Robustheit* und *Wandlungsfähigkeit* in quantitative Bewertungskriterien ist lediglich durch Quantifizierungsverfahren möglich (vgl. Abschnitt 6.3.2), weshalb keine Kennzahlen dieser Zieldimensionen definiert werden. Diese Argumentation gilt weitestgehend auch für die Zieldimension *Flexibilität*, wobei die zeitliche und kapazitive Flexibilität des Routenzugs und Mitarbeiters aus den jeweiligen Nutzungsgraden kalkulierbar ist. Die Definitionsblätter der in der Tab. 35 aufgeführten Qualitätskennzahlen sind im Anhang A.4 dargestellt.

Tab. 35: Übersicht der Qualitätskennzahlen

Qualitätskennzahlen	
Abk.	Bezeichnung
Q-L-1	Liefertermintreue
Q-L-2	Lieferterminabweichung
Q-L-3	Liefermengentreue
Q-L-4	Liefermengenabweichung
Q-S-1	Unfallhäufigkeit
Q-S-2	Unfallsschwere
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug

Legende: Q: Qualitätskennzahl; L: Lieferservice; S: Sicherheit; E: Ergonomie; F: Flexibilität

6.4 Bestimmung der Berechnungsweise von Kennzahlen

Die Kennzahlendefinition kann zwecks Sicherstellung der Allgemeingültigkeit und Übersichtlichkeit nur abstrakt erfolgen. Zum Verständnis der Zusammenhänge innerhalb des Kennzahlensystems und der Funktionsweise des Excel-Tools sind allerdings konkrete Berechnungsweisen für die Kennzahlen erforderlich. Die nachfolgende Untergliederung spiegelt dabei die Berechnungsreihenfolge entsprechend der Funktionalität des Excel-Tools wider. Da eine umfassende Darstellung der Berechnungsformeln an dieser Stelle nicht praktikabel ist, werden die Berechnungsweisen verbal beschrieben. Die Formeln können Schritt für Schritt anhand des Excel-Tools nachvollzogen werden (vgl. Datei „1_Routenzug-Tool Vorlage“ im Datenanhang).

6.4.1 Routenbezogene Kennzahlenberechnung

6.4.1.1 Dimensionierungsansatz

Im Rahmen der Analyse und Optimierung ist es erforderlich, Auswirkungen von Systemveränderungen (Parameterwertvariation und/oder Strukturveränderung) antizipieren zu können (vgl. Abschnitte 7.2 und 8.3). Aus diesem Grund ist der Kennzahlenberechnung ein Dimensionierungsansatz zugrunde zu legen, der basierend auf den in Kapitel 0 beschriebenen Gestaltungsmöglichkeiten den Ressourcenbedarf berechnet. Hierfür eignet sich die, dem Stand der Technik entsprechende und bereits in anderen Software-Tools¹⁰⁵ umgesetzte, routenbezogene Dimensionierung nach der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 6 ff.]. Im Vergleich dazu weist

¹⁰⁵ Hierzu zählt beispielsweise die Software RoutMan der Fa. LOGSOL [LOGSOL 2014] oder der Software-Demonstrator, der im Rahmen des Forschungsprojekts IntegRoute an der TU München entwickelt wurde [GÜNTHER, KEUNTJE 2016].

die in dieser Arbeit verwendete und im Excel-Tool umgesetzte Berechnungsweise aufgrund der Anforderungen nach Einfachheit und Nachvollziehbarkeit folgende Unterschiede auf:

- Es handelt sich stets um, hinsichtlich der Art des Ladungsträgers, sortenreine Routenzüge, da bei gemischten Routenzügen einerseits die auf Ladungsträger bezogenen Kennzahlen an Aussagekraft verlieren würden (z. B. Durchsatz oder Kosten pro Transporteinheit), andererseits der Aufbau des Tools redundant sein müsste. Da gemischte Routenzüge in der Praxis nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 5.2.7), stellt diese Annahme lediglich eine geringe Einschränkung der Anwendbarkeit dar.
- Durchsätze werden haltepunktbezogen betrachtet, weil die artikelbezogene Erfassung und Eingabe der Durchsätze je nach Anwendungsfall sehr umfangreich und langwierig sein kann und damit nicht praktikabel im Rahmen dieser Arbeit erscheint. Es handelt sich bei den Haltepunktdurchsätzen somit um aufsummierte Durchsätze über alle Artikel eines Haltepunkts. Demnach vereinfacht sich die Berechnung der Haltewahrscheinlichkeiten, da diese nicht durch die Aufsummierung artikelbezogener Wahrscheinlichkeiten erfolgt, sondern direkt aus den Haltepunktdurchsätzen bestimmbar ist. Die auf dieser Basis berechnete Anzahl der Haltevorgänge kann bei haltepunktbezogener Berechnung geringfügig von den Ergebnissen der artikelbezogenen Berechnung abweichen (vgl. Abschnitt 6.8). Aufgrund des in der Regel ohnehin geringen Einflusses der Anzahl der Haltevorgänge auf die Zykluszeit ist diese Abweichung vertretbar.
- Die Anzahl der Be- und Entladevorgänge wird in Abhängigkeit von der Systemkonfiguration (z. B. Versorgung oder Entsorgung, Be-/Entladung integriert oder entkoppelt usw.) automatisch berechnet. Dies bildet den Aufwand bei der Be- und Entladung verursachungsgerecht ab (vgl. Abschnitt 6.6.2.1).
- Der Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 erfordert die Festlegung eines Tourenstartabstands [VDI 2016c, S. 8], wobei lediglich der maximal mögliche Tourenstartabstand $t_{TA,max}$ als Obergrenze definiert wird. In dieser Arbeit wird zusätzlich der mindestens erforderliche Tourenstartabstand $t_{TA,min}$ berechnet, der einerseits dem Anwender als Hilfestellung bei der Festlegung des tatsächlichen Tourenstartabstands dient, andererseits die automatische Festlegung des Tourenstartabstands bei permanentem Tourenstart ermöglicht. Die iterative Berechnung erfolgt, indem der Tourenstartabstand solange um 30 s reduziert wird bis der zeitliche Nutzungsgrad der Routenzüge 100 % beträgt (vgl. Abschnitt 6.6.2.1).
- Der maximal mögliche Tourenstartabstand $t_{TA,max}$ ergibt sich als Kehrwert der mindestens erforderlichen Routenfrequenz $f_{R,min}$, die sich aus dem Verhältnis aus Durchsatz der Route und Transportkapazität eines Routenzugs berechnet [VDI 2016c, S. 8]. Im Rahmen dieser Arbeit wird zusätzlich berücksichtigt, dass die mindestens erforderliche Routenfrequenz auch von anderen Restriktionen abhängen kann (z. B. maximale Pufferreich-

weite am Bereitstellort). Das ist beispielsweise der Fall, wenn die Bestimmung der Anzahl der Pufferplätze an den Bereitstellorten vor der Routenzugdimensionierung erfolgt [HARRIS ET AL. 2003, S. 50].

- Die Verknüpfung des zeitlichen und kapazitiven Nutzungsgrades der Routenzüge erfolgt additiv (vgl. Kennzahl L-M-8 im Anhang A.2), weil damit zwischen den beiden Kennzahlen ein linearer Zusammenhang besteht, der es erlaubt, die beiden Kennzahlenwerte nicht nur routenbezogen, sondern auch systembezogen anhand des Gesamtnutzungsgrades ineinander überführen zu können (vgl. Abschnitt 6.6.2.6).
- Die Bestimmung der Anzahl der Pufferplätze an den Bereitstellorten ist nicht möglich, da dies die artikelbezogene Berechnung der Anzahl an Ladungsträgern pro Tour und Haltepunkt erfordert [VDI 2016c, S. 10].

6.4.1.2 Anzahl Ladungsträger und Transportmittel

Der Ressourcenbedarf hinsichtlich der Ladungsträger und Transportmittel ist abhängig von der technischen (z. B. Bereitstellung Quelle oder Senke) und der organisatorischen Systemgestaltung (z. B. Integration Beladung oder Verbindung von Schleppern und Anhängern im Routenzugprozess). In Abhängigkeit von der betrachteten Systemkonfiguration und dem Dimensionierungsergebnis erfolgt im ersten Schritt die Berechnung der Anzahl erforderlicher Fahrzeuge sowie darauf basierend die Bestimmung der Anzahl der Anhänger und Trolleys/Rahmen. Beispielsweise sind bei der Vorbeladung von Routenzügen mit fixer Verbindung zwischen Schlepper und Anhängern zusätzliche Schlepper und Anhänger und unter Umständen Trolleys/Rahmen erforderlich (vgl. Abschnitt 5.2.9). Werden demgegenüber lediglich vorbeladene Trolleys/Rahmen übernommen, erhöht sich deren Bedarf. Der Fahrzeug- und Anhängerbedarf entspricht hingegen dem des Dimensionierungsergebnisses. Sind zusätzliche Ressourcen erforderlich, wird der berechnete Ressourcenbedarf (Dimensionierung) verdoppelt.

Im zweiten Schritt wird die Anzahl erforderlicher Ladungsträger und Zug-/Schiebehilfen berechnet. Die Anzahl der Ladungsträger bezieht sich dabei lediglich auf diejenigen Ladungsträger, die sich maximal zeitgleich auf den Routenzügen befinden können. Die Anzahl der Zug-/Schiebehilfen ist, sofern diese eingesetzt werden, von der Fahrzeuganzahl abhängig.

6.4.1.3 Wiederbeschaffungszeiten

Die Wiederbeschaffungszeit besteht aus der Erkennungs-, Übermittlungs- und Transportzeit sowie der Zeit für vorgelagerte Prozesse (vgl. Kennzahlen L-Z-18 und L-Z-19 im Anhang A.2). Da die drei erstgenannten Zeitanteile vom Zeitpunkt der Bedarfsentstehung und -erkennung im Betrieb abhängen (vgl. Abb. 18 auf S. 81), erfolgt die Unterscheidung im Bewertungsmodell lediglich hinsichtlich der minimalen und maximalen Wiederbeschaffungszeit. Deren vereinfachte Berechnung erfolgt anhand ganzzahliger Vielfache der jeweiligen Zykluszeit in Abhängigkeit von der technischen (z. B. technischer Informationsträger) und der organisatorischen

6 Bewertungsmodell

Systemgestaltung (z. B. primäre Transportaufgabe oder Entkopplung Beladung). Beispielsweise entspricht die minimale Wiederbeschaffungszeit bei integrierter Beladung und Nachschubsteuerung mittels Karten-Kanban der Zykluszeit (Bedarf wird sofort bei dessen Entstehung erkannt; Routenzug befindet sich bei Bedarfsentstehung am Bereitstellort). Die maximale Wiederbeschaffungszeit entspricht dem Zweifachen der Zykluszeit (Bedarf wird erst nach einem kompletten Zyklus erkannt; Routenzug hat den Bereitstellort bei Bedarfsentstehung gerade verlassen). Die Zeit für vorgelagerte Prozesse ist durch den Anwender vorzugeben und wird als konstant angenommen.

6.4.1.4 Automatisierungsgrad

Der Automatisierungsgrad ist der prozentuale Anteil der automatisierten Prozesse an allen Prozessen eines Routenzugsystems. Er ist abhängig von der technischen Gestaltung der Routenzugprozesse Beladung, Fahrt/Halten und Entladung, wobei zusätzlich zwischen der Be- und Entladung von Routenzug und Trolley/Rahmen unterschieden wird. Die Berechnung erfolgt in drei Schritten:

1. Relevante Routenzugprozesse erfassen
2. Prüfung der Routenzugprozesse auf Automatisierung
3. Anteile automatisierter Routenzugprozesse bestimmen

6.4.1.5 Gehwegberechnung

Die Länge des Gehwegs, die ein Mitarbeiter im Mittel pro Schicht zurücklegt, setzt sich zusammen aus dem Gehweg entlang des Fahrzeugs sowie dem Gehweg zwischen Fahrzeug und Bereitstellort bei der Be- und Entladung. Der Gehweg entlang des Fahrzeugs ist abhängig von der Anzahl der Haltevorgänge je Mitarbeiter und Schicht (Ergebnis der Dimensionierung) sowie der Länge von Fahrzeug und ggf. Anhängern (Eingabeparameter). Der Gehweg zwischen Fahrzeug und Bereitstellort ist abhängig von der Anzahl der Be- und Entladevorgänge (Ergebnis der Dimensionierung) sowie der jeweiligen mittleren Entfernungen zwischen Haltepunkt und Bereitstellorten (Eingabeparameter).

6.4.1.6 Kosten

Die Investitionskosten sind u. a. bestimmt durch die Anzahl der jeweiligen Investitionsobjekte (vgl. Kennzahlen W-I-2 bis W-I-7 im Anhang A.3). Somit ist zu beachten, dass die Investitionskosten für Ladungsträger und Transportmittel in Abhängigkeit von der Systemkonfiguration und dem Dimensionierungsergebnis (vgl. Abschnitt 6.4.1.2) berechnet werden, wohingegen die weiteren Investitionen (z. B. Bereitstelltechnik oder Informationstechnik) auf der Basis vorzugebender Mengen bestimmt werden.

6.4 Bestimmung der Berechnungsweise von Kennzahlen

Basierend auf den Investitionen werden die Kapitalkosten, Abschreibungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten je Investition mithilfe des kalkulatorischen Zinssatzes, der Abschreibungszeiträume und der Wartungs- und Reparaturfaktoren (Eingabeparameter) berechnet (vgl. Kennzahlen W-B-2 bis W-B-4 im Anhang A.3).

Die Lizenz-, Bestands- und Flächenkosten können aufgrund des Abstraktionsgrades des Modells nicht sinnvoll antizipiert werden (z. B. aufgrund fehlendem Artikel- oder Stellflächenbezug). Daher werden diese Kostenbestandteile direkt erfasst und in die Betriebskostenberechnung einbezogen.

Die Energiekosten umfassen die von der Einsatzzeit pro Jahr (Dimensionierungsergebnis) und dem spezifischen Energieverbrauch abhängigen Energiekosten der Fahrzeuge sowie die vorzugebenden sonstigen Energiekosten (z. B. für Be- oder Entladestationen).

Die Personalkosten sind abhängig von der technischen (z. B. Art der Steuerung des Fahrzeugs oder Beladetechnik) und organisatorischen Systemgestaltung (z. B. Entkopplung Beladung). Zunächst wird die Anzahl der jeweils benötigten Mitarbeiter auf Basis der gesamten Prozesszeiten pro Schicht (Dimensionierungsergebnis) und des zur Verfügung stehenden Zeitangebots je Mitarbeiter und Schicht unter Einbeziehung eines vorzugebenden Verteilzeitfaktors berechnet. Im Gegensatz zur Berechnung des Transportmittelbedarfs, bei dem die Anzahl der erforderlichen Transportmittel auf ganzzahlige Werte aufgerundet wird, ist dabei der exakte Mitarbeiterbedarf zu berechnen, weil davon auszugehen ist, dass Mitarbeiter Wartezeiten für andere Tätigkeiten nutzen und die in diesen Zeiten entstehenden Kosten nicht dem Routenzugsystem zuzurechnen sind. Anschließend erfolgt die Multiplikation des Mitarbeiterbedarfs mit dem Lohnkostensatz, wobei zwecks Vereinfachung angenommen wird, dass dieser für alle Mitarbeitergruppen (z. B. Routenzugfahrer oder Logistiker für Vorbeladung) gleich ist.

6.4.1.7 Ergonomie

Die Bewertung der physischen Belastung erfolgt durch das auf den Leitmerkmalmethoden der BAuA basierende MLT (vgl. Abschnitt 6.3.2.2.4).¹⁰⁶ Die Belastungsbewertung erfolgt bei diesem Verfahren für alle vorkommenden Tätigkeiten und Lasten einzeln [IAD 2010b]. Diese Vorgehensweise ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zweckmäßig, da zum einen auf eine artikelbezogene Betrachtung verzichtet wird und zum anderen keine belastbaren Tätigkeitsbeschreibungen möglich sind. Stattdessen wird die Annahme getroffen, dass sich die Tätigkeiten, Lasten usw. je Routenzugprozess wiederholen, was den Vorteil hat, dass die Tätigkeiten aggregiert bewertet werden können. Die grundsätzliche Bewertungslogik bleibt davon unberührt und entspricht der des MLT [IAD 2010a; IAD 2010b]. Im Vergleich dazu weist die in dieser Arbeit

¹⁰⁶ Eine Excel-Vorlage des MLT wird vom Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt (IAD) zum Download zur Verfügung gestellt. URL: www.kobra-projekt.de/page/downloads (abgerufen am: 31.03.2017)

6 Bewertungsmo­dell

verwendete und im Excel-Tool umgesetzte Berechnungsweise aufgrund der Anforderungen nach Einfachheit und Nachvollziehbarkeit folgende Unterschiede auf:

- Es wird lediglich zwischen den Prozessen Beladung (Vollgut/Leergut) und Entladung (Vollgut/Leergut) unterschieden. Die entsprechende Zuordnung zu den Handhabungsarten „Umsetzen/Halten/Tragen“ (UHT) und „Ziehen/Schieben“ (ZS) erfolgt automatisch in Abhängigkeit von der technischen (z. B. Art des Ladungsträgers oder Anhängertyp) und organisatorischen Systemgestaltung (z. B. Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess).
- Das mittlere Lastgewicht wird je Prozess auf der Basis vorzugebender Durchschnittswerte berechnet (z. B. durchschnittliches Gewicht des Transportguts oder durchschnittliches Leergewicht des verwendeten Ladungsträgers).
- Die Zeitdauer wird je Prozess auf der Basis vorzugebender durchschnittlicher Prozesszeiten und der Häufigkeit der Prozessschritte (Dimensionierungsergebnis) berechnet.
- Die Wegstrecke wird je Prozess auf der Basis vorzugebender durchschnittlicher Entfernungen und der Häufigkeit der Prozessschritte (Dimensionierungsergebnis) berechnet.
- Bei der Bestimmung der Wichtungen für Körperhaltung, Ausführungsbedingungen und Anforderungen an die Positioniergenauigkeit je Prozess sind mittlere Werte entsprechend der Einstufungshilfe des MLT vorzugeben (vgl. Anhang B.3) [IAD 2010a].
- Da die Tätigkeiten je Prozess aggregiert werden, ist vom Anwender manuell auszuwählen, anhand welcher Kriterien die Belastungsbewertung erfolgen soll, wobei auch keine (keine Bewertung) oder mehrere Kriterien (multikriterielle Bewertung) auswählbar sind. Für die Handhabungsart UHT stehen die Kriterien *Anzahl der Vorgänge*, *Dauer der Vorgänge* und *Entfernung* zur Verfügung. Für die Handhabungsart ZS stehen die Kriterien *Anzahl der Vorgänge* und *Entfernung* zur Auswahl.
- Die Belastungsbewertung erfolgt gemäß MLT separat für jeden Mitarbeiter [IAD 2010a, S. 3 f.]. Da mit dem gewählten Dimensionierungsansatz die direkte Zuordnung der einzelnen Tätigkeiten zu den Mitarbeitern nicht möglich ist, werden zunächst die relevanten Tätigkeiten für das gesamte Routenzugsystem erfasst und anschließend anhand der Anzahl der erforderlichen Mitarbeiter (Dimensionierungsergebnis) gleichmäßig auf diese umgelegt. Dabei werden zwecks Übersichtlichkeit lediglich die der Zykluszeit zuzurechnenden Tätigkeiten und Mitarbeiter berücksichtigt.

6.4.2 Systembezogene Kennzahlenberechnung

Mehrrou­ten­systeme erfordern systembezogene Berechnungsweisen für Kennzahlen. Diese sind von der Zuordnung der Fahrer zu Routen und der Zuordnung der Routenzüge zu Routen abhängig (vgl. Abschnitt 5.2.4). Der routenübergreifende Einsatz von Fahrern und/oder Routenzügen wird „Poolung“ genannt [FISCHER 2016, S. 29]. Die Tab. 36 verdeutlicht diese Einsatzfälle. Die in der oberen Zeile aufgeführten Möglichkeiten der „Mitarbeiter-Poolung“ werden im Rahmen

6.4 Bestimmung der Berechnungsweise von Kennzahlen

dieser Arbeit nicht separat betrachtet, weil der routenbezogene Mitarbeiterbedarf mit dem „exakten“ Wert in die Kennzahlenberechnung eingeht (vgl. Abschnitt 6.4.1.6). Demzufolge sind die Kennzahlenwerte bei routen- und systembezogener Kennzahlenberechnung identisch.

Die in der unteren Zeile aufgeführten Möglichkeiten der „Fahrzeug-Poolung“ werden hingegen separat betrachtet, weil der routenbezogene Fahrzeugbedarf auf ganzzahlige Werte aufgerundet wird (vgl. Abschnitt 6.4.1.6). Folglich sind bei der systembezogenen Kennzahlenberechnung abweichende Ergebnisse zu erwarten. Zu beachten ist, dass eine Fahrzeug-Poolung nur realisierbar ist, wenn die Fahrzeugtechnik routenübergreifend einsetzbar ist.

Tab. 36: Darstellung der unter dem Begriff „Poolung“ zusammengefassten Merkmalsausprägungen (graue Markierung)

Unterscheidungsmerkmal	Merkmalsausprägungen			
Zuordnung (Fahrer:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n
Zuordnung (Routenzug:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n

6.4.2.1 Mehrroustensystem ohne Fahrzeug-Poolung

In diesem Fall werden die Kennzahlenwerte aller Routen zunächst vollständig routenbezogen berechnet und anschließend die systembezogenen Kennzahlenwerte durch routenübergreifende Mittelwertbildung bzw. Summation zusammengeführt (vgl. Abb. 29). Für jede relevante Kennzahl (individuell festzulegen) ist daraufhin zu entscheiden, ob einer oder beide Werte im Zuge der Ergebnisinterpretation betrachtet werden.

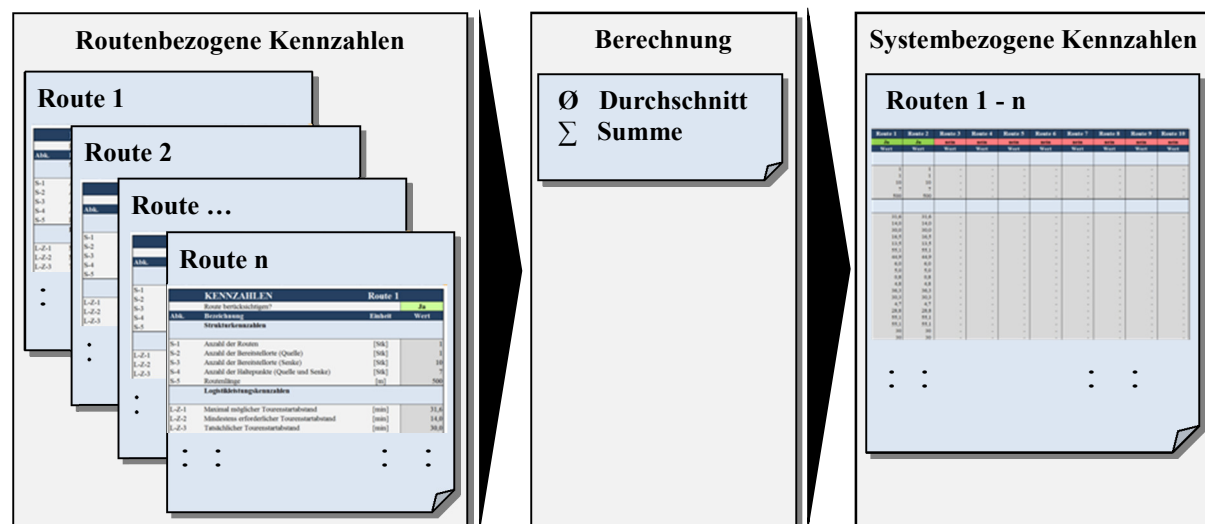


Abb. 29: Schematische Darstellung der Berechnungsweise eines Mehrroustensystems ohne Fahrzeug-Poolung

Hinsichtlich der Anzahl der Bereitstellorte oder Haltepunkte können beispielsweise sowohl die durchschnittliche Anzahl je Route als auch die Gesamtanzahl des Systems von Interesse sein. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Routenzugsystems erfolgt demgegenüber in der

Regel auf Basis der summierten Investitions- und Betriebskosten, wohingegen bei den in Prozent gemessenen Kennzahlen (z. B. Nutzungsgrade oder Anteile) nur die Durchschnittswerte aussagekräftig sind.

6.4.2.2 Mehrrountensystem mit Fahrzeug-Poolung

Ein Dimensionierungsansatz für Mehrrountensysteme mit Fahrzeug-Poolung existiert bisher nicht. Der Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 ist in der ursprünglichen Form nicht für Mehrrountensysteme mit Fahrzeug-Poolung geeignet, da die Anzahl der erforderlichen Routenzüge routenbezogen aufgerundet wird [VDI 2016c, S. 9]. Dies würde systembezogen zur Berechnung eines unnötig hohen Ressourcenbedarfs führen. Aus diesem Grund wird der Dimensionierungsansatz hinsichtlich der Bestimmung der Routenzuganzahl sowie die darauf aufbauenden Kennzahlenberechnungen den Anforderungen entsprechend angepasst. Im Vergleich zur routenbezogenen Berechnungsweise (vgl. Abschnitt 6.4.1) weist die Berechnungsweise für ein Mehrrountensystem mit Fahrzeug-Poolung folgende Unterschiede auf:

- Die exakten Werte hinsichtlich der Anzahl der erforderlichen Routenzüge je Route werden zunächst summiert und anschließend aufgerundet:

$$n_{RZ,gerundet,System} = \left\lceil \sum_{R=1}^{n_R} n_{RZ,exakt,Route} \right\rceil \quad (1)$$

mit n_R = Anzahl der Routen
 n_{RZ} = Anzahl erforderlicher Routenzüge
 R = Index der Route (z. B. Route 1, Route 2 usw.)

- Der zeitliche Nutzungsgrad der Routenzüge sowie der darauf basierende Gesamtnutzungsgrad und die Flexibilitätskennzahlen werden systembezogen für alle Routenzüge berechnet (Durchschnittswerte).
- Die Wartezeit wird systembezogen für alle Routenzüge berechnet (Durchschnittswert). Das ist erforderlich, weil durch die Poolung kein direkter Bezug zwischen Tourenstartabstand und Wartezeit besteht. Die Berechnung der Wartezeit erfolgt rekursiv anhand des zeitlichen Nutzungsgrades der Routenzüge.
- Der Ressourcenbedarf hinsichtlich der Ladungsträger und Transportmittel erfolgt auf Basis der Systemkennzahlen des Mehrrountensystems ohne Poolung, multipliziert mit dem Quotient aus der Anzahl erforderlicher Routenzüge mit Poolung und der Anzahl erforderlicher Routenzüge ohne Poolung (Pool-Faktor):

$$c_{Pool} = \frac{n_{RZ,gerundet,System \text{ mit Poolung}}}{n_{RZ,gerundet,System \text{ ohne Poolung}}} \quad (2)$$

$$n_{LT,mit Poolung} = n_{LT,ohne Poolung} \times c_{Pool} \quad (3)$$

$$n_{TM,mit\ Poolung} = n_{TM,ohne\ Poolung} \times C_{Pool} \tag{4}$$

mit C_{Pool} = Pool-Faktor
 n_{LT} = Anzahl erforderlicher Ladungsträger
 n_{RZ} = Anzahl erforderlicher Routenzüge
 n_{TM} = Anzahl erforderlicher Transportmittel

- Der Fahrweg pro Routenzug wird systembezogen für alle Routenzüge berechnet (Durchschnittswert).
- Die Berechnung der Investitionskosten für Ladungsträger und Transportmittel erfolgt analog zur oben beschriebenen Berechnung des Ressourcenbedarfs mittels des Pool-Faktors.
- Die Berechnung der Kapitalkosten, Abschreibungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten erfolgt analog zur oben beschriebenen Berechnung des Ressourcenbedarfs hinsichtlich der Ladungsträger und Transportmittel mittels des Pool-Faktors, wobei dieser lediglich auf die jeweiligen Ladungsträger- und Transportmittelanteile angewendet wird.
- Die aus den Investitions- und Betriebskosten abgeleiteten Kostenkennzahlen (z. B. Anteil Kapitalkosten oder Kosten pro Transporteinheit) werden systembezogen für alle Routenzüge berechnet (Durchschnittswert).

Die Abb. 30 verdeutlicht die Berechnungsweise eines Mehrroustensystems mit Poolung sowie die im Vergleich zu einem Mehrroustensystem ohne Poolung zusätzlichen Berechnungsumfänge (vgl. Abb. 29 auf S. 119).

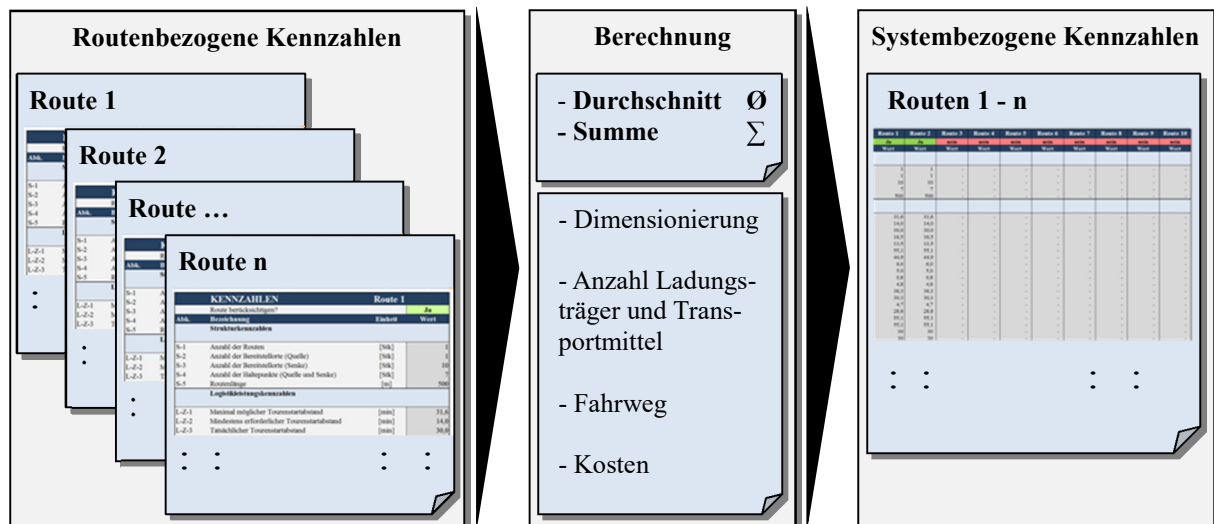


Abb. 30: Schematische Darstellung der Berechnungsweise eines Mehrroustensystems mit Fahrzeug-Poolung

6.5 Identifizierung des Informationsbedarfs

Nach der Zielbildung und Entwicklung des Kennzahlensystems (Modell-Output) und der Bestimmung der Berechnungsweisen von Kennzahlen (Modellverhalten) sind im dritten Schritt

6 Bewertungsmodell

die Identifizierung des Informationsbedarfs und die Konkretisierung der Eingangsgrößen (Modell-Input) erforderlich. Grundlage dafür sind einerseits die Definitionsblätter der Kennzahlen (vgl. Anhang A.1 bis A.4) und andererseits deren Berechnungsweisen (vgl. Abschnitt 6.4).

Die Definitionsblätter zeigen durch die Felder „Beeinflussung durch“ und „Beeinflusst“ die Beziehungen einer Kennzahl zu anderen Größen auf. Steht eine Kennzahl in Beziehung zu einer anderen Kennzahl, wird dies über die Angabe der jeweiligen Abkürzung im entsprechenden Feld deutlich. Das Kennzahlensystem kann damit als Netzwerk von Kennzahlen und deren Eingangsgrößen dargestellt werden. Da allerdings die Definitionsblätter die Kennzahlen zum Zweck der Allgemeingültigkeit abstrakt formulieren, sind die Berechnungsweisen der Kennzahlen hinzuziehen, um alle Beziehungen korrekt darzustellen. Beispielsweise ist anhand des Definitionsblatts zur *Anzahl Transportmittel* (L-R-2) nicht ersichtlich, welche Eingangsgrößen für deren Berechnung benötigt werden. Diese Information ergibt sich aus dem jeweiligen Dimensionierungsansatz in Abhängigkeit von der Systemgestaltung.

Die Abb. 31 zeigt vereinfacht die für ausgewählte Kennzahlen der Dimensionierung erforderlichen Eingangsgrößen sowie zusätzliche Berechnungsgrößen, die die Nachvollziehbarkeit des Modells gewährleisten. Die Identifizierung aller Beziehungen innerhalb des Kennzahlensystems ermöglicht die retrograde Ermittlung und Konkretisierung der Eingangsgrößen des Modells sowie dessen Detaillierung hinsichtlich der Struktur. Die insgesamt 155 Eingangsgrößen werden folgenden Kategorien zugeordnet (Anzahl in Klammern):

- **Systemgestaltung (21):** Technische und organisatorische Gestaltungsmöglichkeiten
- **Systemelemente (85):** Transportgut, Route usw.
- **Systemprozesse (7):** Beladung, Fahrt usw.
- **Weitere Eingabeparameter (42):** Arbeitszeit, Wiederbeschaffungszeit usw.

Die Übersicht der Eingangsgrößen ist beispielhaft im Anhang C.1 dargestellt bzw. kann dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“ des Excel-Tools entnommen werden (vgl. Datei „1_Routenzug-Tool Vorlage“ im Datenanhang).

Die Definitionsblätter der Kennzahlen beinhalten im Feld „Daten“ Hinweise zu möglichen Informationsquellen im Rahmen der Datenerhebung. Diese ist allerdings nicht Gegenstand der Arbeit, weshalb operative Aufgaben (z. B. Wahl der Erhebungsform, Häufigkeit der Erhebung oder Benennung von Verantwortlichen) situationsabhängig und in geeigneter Weise durchzuführen sind. Beispielsweise obliegt es dem Anwender, ob Prozesszeiten auf der Basis von Soll-Zeiten (z. B. MTM oder Zeitrichtwerte) oder Ist-Zeiten (z. B. Zeitmessungen oder Befragungen) erfasst werden. Dadurch ist gewährleistet, dass die entwickelte Methode und das Excel-Tool möglichst universell einsetzbar sind und Nachteile bestimmter Verfahren (z. B. hoher Aufwand und Scheingenauigkeit bei MTM) umgangen werden können.

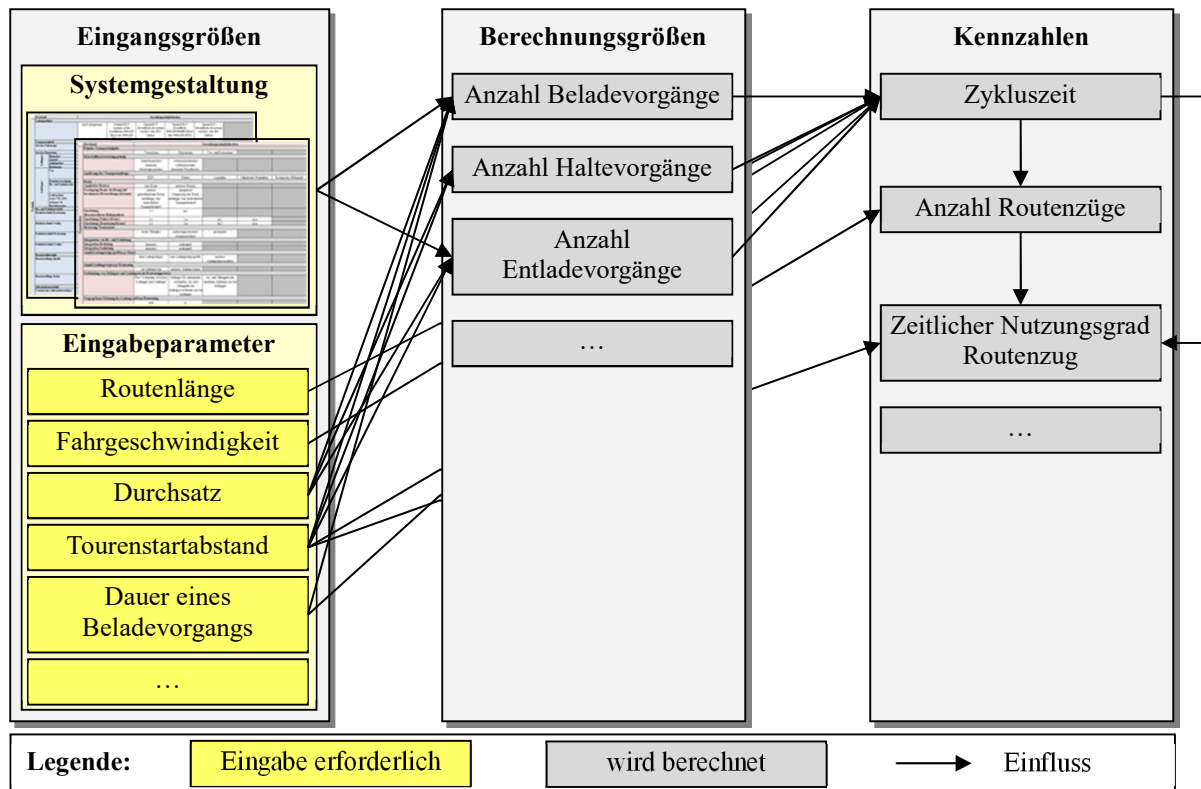


Abb. 31: Darstellung der Beziehungen zwischen Eingangsgrößen, Berechnungsgrößen und Kennzahlen

6.6 Umsetzung des Bewertungsmodells in MS Excel

Die softwaretechnische Umsetzung des Bewertungsmodells dient der Aufwandsreduzierung und Nachvollziehbarkeit (Automatisierung von Berechnungen), der Ergebnisdarstellung (numerisch und grafisch) sowie der Dokumentation (Speicherung von Eingabe- und Ausgabedaten). Dafür bietet sich u. a. aufgrund des hohen Verbreitungsgrades und der Funktionalität (z. B. Makro-Programmierung) das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel an (vgl. Abschnitt 4.2). Die Systemanforderungen für die Anwendung des nachfolgend beschriebenen Excel-Tools können dem Anhang B.1 entnommen werden.

Das Excel-Tool ermöglicht u. a. die Abbildung und Bewertung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen. Da den Kennzahlenberechnungen allerdings Dimensionierungsansätze zugrunde liegen, ist zu berücksichtigen, dass lediglich planungskonform umgesetzte Routenzugsysteme bewertet werden können. Wird ein Routenzugsystem beispielsweise mit drei Routenzügen betrieben, obwohl gemäß Dimensionierung nur zwei Routenzüge erforderlich wären, sind die Kennzahlen nicht belastbar.¹⁰⁷ Demzufolge ist bei bestehenden Routenzugsystemen

¹⁰⁷ Es sei erwähnt, dass in diesem Fall der erste Schritt zur Optimierung des betrachteten Routenzugsystems offensichtlich ist; die Umsetzung gemäß dem Dimensionierungsergebnis, d. h. der Betrieb mit zwei Routenzügen. Dient der dritte Routenzug hingegen nur als Reserve und beeinflusst den Routenzugprozess nicht, kann das System unter Vernachlässigung dieses Routenzugs im Excel-Tool bewertet werden.

vor der Interpretation der Kennzahlenwerte stets anhand des Dimensionierungsergebnisses zu prüfen, ob der Ist-Zustand mit dem Soll-Zustand übereinstimmt.

6.6.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Die Beschreibung der Modellumsetzung im Excel-Tool erfolgt anhand des Aufbaus und der Funktionsweise der Tabellenblätter. Diesbezüglich erhöht die beispielhafte Anwendung des Excel-Tools insbesondere die Nachvollziehbarkeit. Die Verwendung des in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 beschriebenen und dimensionierten Routenzugsystems [VDI 2016c, S. 10 ff.] unterstützt zudem die Verifikation und Validierung des Modells (vgl. Abschnitt 6.8).

Das betrachtete Routenzugsystem dient der Versorgung eines Produktionsbereichs mit GLT (z. B. Gitterboxpaletten) aus einem Lager. Mittels eines Schleppzugs sollen auf **einer Route** an den zehn Bereitstellorten der Senken über die sechs zugeordneten Haltepunkte Artikel nach festem Fahrplan bereitgestellt werden. Im Lager werden die Anhänger mit den Artikeln für die nächste Tour vorbeladen und bereitgestellt. Für den Routenzugfahrer beschränkt sich die Beladung auf das Ab- und Ankuppeln aller Anhänger. Die Tab. 37 fasst die Eingangsgrößen gemäß den Angaben im Blatt 2 der VDI-Richtlinie 5586 zusammen [VDI 2016c, S. 10 ff.]. Die Abb. 32 stellt das Anwendungsbeispiel schematisch dar.

Die Anwendung des Bewertungsmodells in vollem Umfang erfordert zusätzliche Angaben sowohl zur technischen und organisatorischen Systemgestaltung (z. B. technischer Informationsträger oder Materialflusssteuerungsprinzip) als auch zu weiteren Parametern (z. B. Investitionskosten oder Arbeitszeitmodell). Diesbezüglich sind entsprechende Annahmen zu treffen, die der morphologischen Darstellung des Anwendungsbeispiels in den Abb. 33 (S. 126) und Abb. 34 (S. 127) sowie der Übersicht der Eingabeparameter im Anhang C.1 entnommen werden können.

6.6.2 Aufbau und Funktionsweise

Das Excel-Tool besteht aus mehreren Tabellenblättern, die über Formeln und Makros miteinander verknüpft sind. Der Aufbau und die Verknüpfungen der Tabellenblätter sowie der Makro-Umfang des Excel-Tools sind angelehnt an die Struktur und Funktionsweise des Bewertungsmodells. Dementsprechend spiegelt sich im übergeordneten Aufbau des Excel-Tools die in der Abb. 31 veranschaulichte Unterscheidung von Eingabe, Berechnung und Kennzahlen wider (vgl. Abschnitt 6.5). Des Weiteren wird die Trennung von routenbezogener und systembezogener Kennzahlenberechnung berücksichtigt; im zweiten Fall zudem für Systeme mit und ohne Fahrzeug-Poolung. Dieser modulare Aufbau dient vorwiegend der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit das Excel-Tool Schritt für Schritt erweitern zu können (z. B. Hinzufügen weiterer Routen) oder die Nutzung lediglich einzelner Funktionen (z. B. Dimensionierung und Bewertung ohne Analyse).

Tab. 37: Eingangsgrößen des Anwendungsbeispiels gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 10]

Technik	Art des Ladungsträgers	Standard-GLT
	Art des Fahrzeugs	Schlepper mit Anhänger
	Art der Steuerung des Fahrzeugs	fahrergeführt
	Bereitstellung Quelle	Bereitstellung auf Anhängern
	Bereitstellung Senke	Bereitstellung auf Anhängern
Organisation	Primäre Transportaufgabe	Versorgung
	Steuerung Tourenstart	fester Fahrplan
	Integration Beladung	entkoppelt
	Integration Entladung	integriert
	Verbindung von Schlepper und Anhängern	Anhänger fix miteinander verbunden, An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes an/von Schlepper
Parameter	Anzahl Bereitstellorte (Quelle)	1
	Anzahl Bereitstellorte (Senke)	10
	Anzahl Haltepunkte	6
	Durchsatz Haltepunkt 1 2 3 4 5 6	0,50 1,45 0,60 1,20 4,25 1,50 GLT/h
	Routenlänge	500 m
	Mittlere Fahrgeschwindigkeit	6 km/h
	Anzahl Anhänger je Routenzug	5
	Transportkapazität pro Anhänger	1 GLT
	Beladezeit (integriert)	360 s/Routenzug
	Haltepunktzeit	10 s/Halt
	Entladezeit (integriert)	60 s/GLT

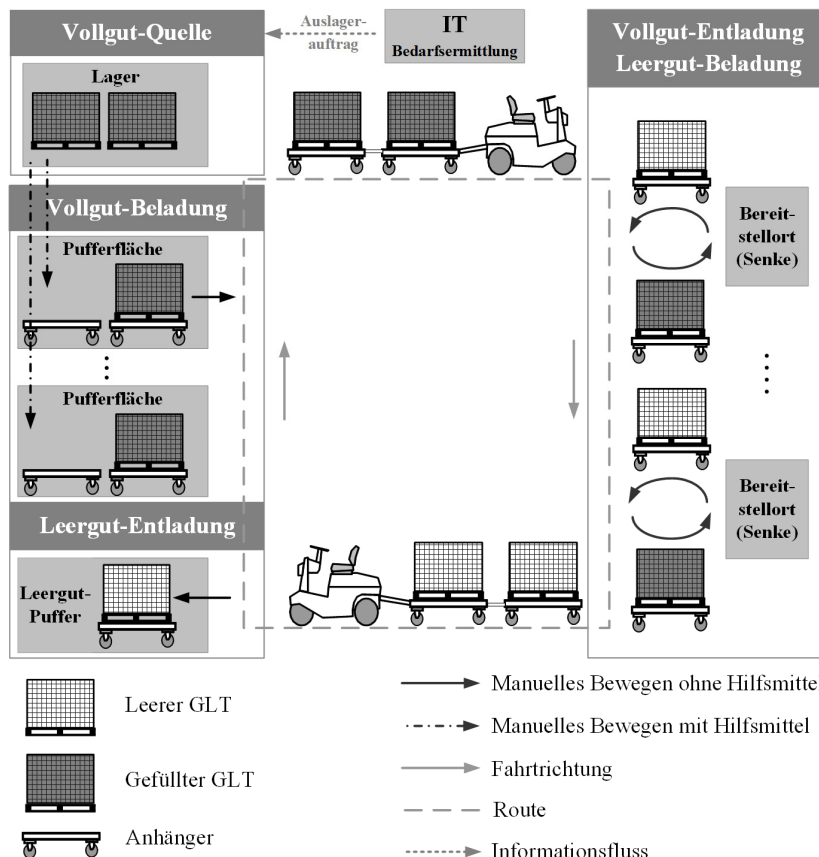


Abb. 32: Schematische Darstellung des Anwendungsbeispiels in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5586 [VDI 2016b; VDI 2016c]

Merkmal		Gestaltungsmöglichkeiten				
Ladungsträger	kein Ladungsträger	Standard-KLT (modular auf die Grundflächen 800x1200 (Euro) und 1000x1200 (ISO) abgestimmt)	Spezial-KLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)	Standard-GLT (Grundfläche 800x1200/600x800 (Euro) oder 1000x1200 (ISO))	Spezial-GLT (Grundfläche abweichend von Euro- oder ISO-Maßen)	
Transportmittel						
Art des Fahrzeugs	Wagen mit fester Plattform	Schlepper mit Anhänger	Gabelstapler	Kommissionierer	Handwagen	
Art der Steuerung	fahrgeführt	fahrerlos				
Bauweise	Dreirad-Schlepper	Vierrad-Schlepper				
Antrieb	Elektroantrieb	Verbrennungsantrieb	Hybridantrieb			
Anhängelast	leicht (< 5 t)	mittel (5 - 25 t)	schwer (> 25 t)			
Bedienung	Stehausführung	Sitzausführung				
Typ	Plattformwagen	Trailer-Konzept		Taxi-Konzept	Einschub-Konzept	
Anhänger		Regalwagen	Rollenverschiebesystem (ggf. + Rahmen)	Taxiwagen (+Trolley)	C-/E-/H-/U-Rahmen (+ Trolley)	
Medienversorgung	keine	Hydraulik	Pneumatik	Elektrik		
Be- und Entladeseite	einseitig	zweiseitig (Beladeseite definiert Entladeseite)	zweiseitig (Be- und Entladeseite unabhängig)			
Lenksystem	ungelenkt (einachsig)	Lenkrollen-Lenkung (1 Achse)	Drehschemellenkung (1 Achse)	Drehschemellenkung (2 Achsen)	Achsschenkellenkung (1 Achse)	Achsschenkellenkung (2 Achsen)
Be- und Entladetechnik						
Beladetechnik Routenzug	ohne Hilfsmittel	manuell mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	automatisch			
Beladetechnik Trolley	kein Trolleyeinsatz	manuell ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	automatisch		
Entladetechnik Routenzug	ohne Hilfsmittel	manuell mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	automatisch			
Entladetechnik Trolley	kein Trolleyeinsatz	manuell ohne Hilfsmittel	mit Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler)	automatisch		
Bereitstelltechnik						
Bereitstellung Quelle	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Palettenregal, AKL, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/ Transporthilfsmitteln	Computer (e-Kanban)	Computer (Produktionsplan)	
Bereitstellung Senke	Bodenbereitstellung (Blocklager, Zeilenlager)	Regalbereitstellung (z. B. Fachbodenregal, Durchlaufregal)	Bereitstellung auf Anhängern/ Transporthilfsmitteln			
Informationstechnik						
Technischer Informationsträger	keiner (Signal-Kanban)	Karte (Karten-Kanban)	Behälter (Behälter-Kanban)	Computer (e-Kanban)	Computer (Produktionsplan)	

Abb. 33: Morphologische Darstellung des Anwendungsbeispiels (Technik)

Merkmal		Gestaltungsmöglichkeiten			
Primäre Transportaufgabe	Versorgung	Entsorgung	Ver- und Entsorgung		
Materialflusssteuerungsprinzip	bedarfsorientiert (zentrales Steuerungssystem)	verbrauchsorientiert (selbststeuernde, dezentrale Regelkreise)			
Auflösung des Transportauftrags	EDV	Fahrer	Logistiker	Mitarbeiter	Technisches Hilfsmittel
Route					
Anzahl der Routen	eine Route	mehrere Routen			
Festlegung Route (in Bezug auf bestimmten Betrachtungszeitraum)	statisch (gleichbleibende Route, unabhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)	dynamisch (Anpassung der Route, abhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)			
Zuordnung (Bereitstellorte:Haltepunkte)	1:1	m:1			
Zuordnung (Fahrer:Route)	1:1	1:n	m:1	m:n	
Zuordnung (Routenzug:Route) Steuerung Tourenstart	1:1	1:n	m:1	m:n	
Integration von Be- und Entladung	fester Fahrplan	auslastungsorientiert/ ereignisorientiert	permanent		
Integration Beladung	integriert	entkoppelt			
Integration Entladung	integriert	entkoppelt			
Anzahl Ladungsträgergrößen je Route	kein Ladungsträger	eine Ladungsträgergröße	mehrere Ladungsträgergrößen		
Anzahl Anhängertypen je Routenzug	ein Anhängertyp	mehrere Anhängertypen			
Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess	Fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhänger	Anhänger fix miteinander verbunden, An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes an/von Schlepper	An- und Abkuppeln der einzelnen Anhänger an/von Schlepper		
Vorgegebene Ordnung der Ladung auf dem Routenzug	nein	ja			

ORGANISATION

Abb. 34: Morphologische Darstellung des Anwendungsbeispiels (Organisation)¹⁰⁸

¹⁰⁸ Hinsichtlich des Merkmals *Zuordnung (Routenzug:Route)* kann zu diesem Zeitpunkt noch keine eindeutige Aussage getroffen werden, weil es sich um ein Planungsbeispiel handelt und somit die Anzahl der Routenzüge erst im Rahmen der Dimensionierung des Routenzugsystems bestimmt wird. Deshalb sind die Merkmalsausprägungen „1:1“ und „m:1“ hervorgehoben (hier: eine Route).

6 Bewertungsmodell

Die Tab. 38 listet die Tabellenblätter des Bewertungsmodells nach ihrer Reihenfolge in der Tabellenblattleiste des Excel-Tools auf, wobei die routenbezogenen Tabellenblätter (für zehn Routen¹⁰⁹) jeweils nacheinander angeordnet sind. Entsprechend den Hauptfunktionen der jeweiligen Tabellenblätter wird folgendes Farbschema verwendet:

- Eingabe: gelb
- Berechnung: rot
- Ergebnisdarstellung Route: grün
- Ergebnisdarstellung System: blau
- Datensicherung: schwarz

Tab. 38: Farbschema, Funktionen und Kurzbeschreibungen der Tabellenblätter des Bewertungsmodells¹¹⁰

<i>Tabellenblatt</i>	<i>Funktion</i>	<i>Kurzbeschreibung</i>
System-Kennzahlen ohne Poolung	- Berechnung - Ergebnisdarstellung	Numerische und grafische Darstellung systembezogener Kennzahlenwerte bei routenbezogener Dimensionierung und Kennzahlenberechnung
System-Kennzahlen mit Poolung	- Berechnung - Ergebnisdarstellung	Numerische und grafische Darstellung systembezogener Kennzahlenwerte bei systembezogener Dimensionierung und Kennzahlenberechnung
R_X Eingabe¹¹¹	- Eingabe - Berechnung	Auswahl technischer und organisatorischer Gestaltungsalternativen sowie Eingabe von Parameterwerten der Route X
R_X Berechnung	- Berechnung	Routenbezogene Dimensionierung und Kennzahlenberechnung der Route X
R_X Kennzahlen	- Berechnung - Ergebnisdarstellung	Numerische und grafische Darstellung routenbezogener Kennzahlenwerte bei routenbezogener Dimensionierung und Kennzahlenberechnung der Route X
Berechnung mit Poolung	- Berechnung	Systembezogene Dimensionierung und Kennzahlenberechnung
Beispiele	- Datensicherung	Sicherung von Eingabedaten (Systemkonfigurationen)

Im Excel-Tool sind den routenbezogenen Tabellenblättern die Tabellenblätter mit systembezogenen Kennzahlen vorangestellt, weil diese übersichtliche Darstellungen berücksichtigter Routen – und somit relevanter Tabellenblätter – beinhalten. Zum Zweck der Übersichtlichkeit sind zudem die routenbezogenen Tabellenblätter je Route nebeneinander platziert. Für ein besseres Verständnis der Beschreibungen von Aufbau und Funktionsweise des Excel-Tools folgt hingegen die Untergliederung der nachfolgenden Abschnitte den funktionalen Zusammenhängen im Modell (Route → System). Ergänzend zu den verhältnismäßig umfangreichen funktionalen Beschreibungen des Excel-Tools in den Abschnitten 6.6 und 7.5, findet sich im Anhang B.1 eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Bedienung des Excel-Tools.

¹⁰⁹ Die Anzahl der in die Berechnungen einbezogenen Tabellenblätter beeinflusst maßgeblich die Rechengeschwindigkeit des Excel-Tools. Aus diesem Grund ist die Anzahl der darstellbaren Routen auf zehn limitiert. Erfahrungsgemäß ist damit ein Großteil der in der Praxis vorkommenden Systeme abbildbar.

¹¹⁰ Die Tabellenblätter des Analysemodells werden im Abschnitt 7.5 erläutert.

¹¹¹ X: Platzhalter für die Routen-Nr. (im Excel-Tool „1“ bis „10“).

6.6.2.1 Tabellenblatt „R_X Eingabe“

Das Tabellenblatt „R_X Eingabe“ dient der tabellarischen Erfassung der Systemkonfiguration und der für die Kennzahlenberechnung erforderlichen Parameterwerte. Im Zellbereich B1:C2 befinden sich drei Makros¹¹² [1] mit den in der Tab. 39 aufgeführten Funktionsumfängen.¹¹³ Der Zellbereich E1:F2 beinhaltet die Legende [2] bezüglich der Eingabe- und Berechnungsfelder im Zellbereich E3:E220 (vgl. Bereich [5] in der Abb. 35).

Tab. 39: Makros und Funktionsumfänge im Tabellenblatt „R_X Eingabe“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Gespeichertes Beispiel Nr. ... einsetzen	Gespeicherte Eingabedaten des Beispiels Nr. ... aus dem Tabellenblatt „Beispiele“ in die Eingabefelder (Zellbereich E3:E220) kopieren (vgl. Abschnitt 6.6.2.7).
Eingabedaten als Beispiel Nr. ... speichern	Aktuelle Eingabedaten in den Eingabefeldern (Zellbereich E3:E220) im Tabellenblatt „Beispiele“ als Beispiel Nr. ... speichern (vgl. Abschnitt 6.6.2.7).
Eingabefelder zurücksetzen	Inhalte der Eingabefelder (Zellbereich E3:E220) löschen und ursprüngliche Formeln einsetzen.

Die Tabelle enthält in den Kopfzeilen [3] Felder zur Angabe der Beispiel-Nr. und der Bezeichnung der Route (Zellen E3 und E4) sowie ein Auswahlfeld zur Beantwortung der Frage, ob die Route im Rahmen der Kennzahlenberechnung berücksichtigt werden soll oder nicht (Zelle E5). Zwecks Übersichtlichkeit sind die Zeilen eins bis sechs des Tabellenblatts fixiert und werden stets angezeigt.

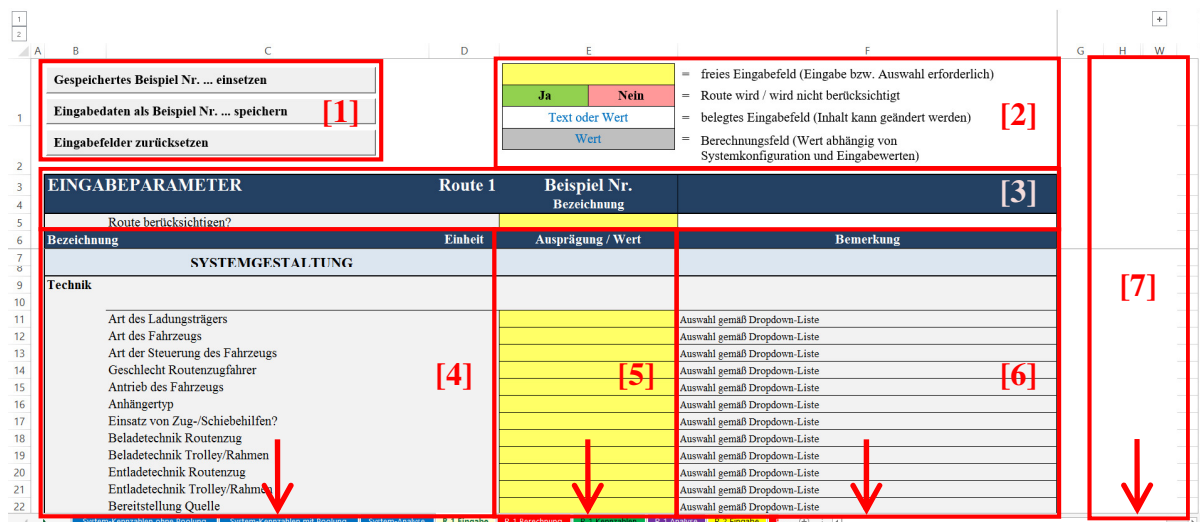


Abb. 35: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Eingabe“¹¹⁴

¹¹² Genau genommen handelt es sich um Makro-Schaltflächen, denen Makros zugewiesen sind, die aufgrund ihrer Vielfältigkeit allerdings einer anderen Bezeichnungssystematik folgen. Aufgrund besserer Nachvollziehbarkeit werden die Makros im Folgenden analog zu den Makro-Schaltflächen bezeichnet.

¹¹³ Die Nummerierung in eckigen Klammern dient im Folgenden der Kennzeichnung der verschiedenen Tabellenbereiche in den zugehörigen Abbildungen (Screenshots).

¹¹⁴ Die Pfeile zeigen an, dass sich Bereiche in entsprechender Richtung über den markierten Tabellenausschnitt hinaus erstrecken.

6 Bewertungsmodell

Der Zellbereich B6:F220 dient der Eingabe der für die Kennzahlenberechnung erforderlichen Eingangsdaten und beinhaltet folgende Teilbereiche:

- Zellbereich B6:D220: Kategorie, Bezeichnung und Einheiten der Merkmale [4]
- Zellbereich E6:E220: Eingabefelder (gelb = frei / weiß = belegt) und Berechnungsfelder (grau) für die Merkmalsausprägungen [5]
- Zellbereich F6:F220: Bemerkungen (Hilfestellung zum Ausfüllen der Eingabefelder) [6]

In den ausgeblendeten Spalten I bis V [7] befinden sich die hinterlegten Dropdown-Listen sowie die Formeln für das Zurücksetzen der Eingabe- und Berechnungsfelder. Mittels des darüberliegenden „+“-Symbols in der Steuerungsleiste können diese Spalten eingeblendet werden.

Hinsichtlich der Abfrage der Eingangsgrößen wird mit Blick auf die Morphologie der Gestaltungsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 5.3) und den Informationsbedarf des Bewertungsmodells (vgl. Abschnitt 6.5) zwischen Systemgestaltung, Systemelementen, Systemprozessen und weiteren Eingabeparametern unterschieden. Die Eingabe der jeweiligen Daten ist in dieser Reihenfolge vorzunehmen, da zum Teil Abhängigkeiten zwischen den Eingabefeldern der Bereiche bestehen (vgl. nachfolgende Ausführungen).

Im Bereich **Systemgestaltung** wird das Routenzugsystem durch die Auswahl von Gestaltungsmöglichkeiten aus Dropdown-Listen charakterisiert (vgl. Abb. 36). Die für diesen Zweck hinterlegten Tabellen entsprechen weitestgehend den Morphologien in Abschnitt 5.3, sind allerdings hinsichtlich des Abstraktionsgrades dem Informationsbedarf des Modells (vgl. Abschnitt 6.5) angepasst. Beispielsweise ist bezüglich der Ladungsträger relevant, wie diese gehandhabt werden (manuell oder mit Hilfsmitteln) oder wie viele Ladungsträger eines Typs auf dem Routenzug platziert werden können (Transportkapazität). Die Unterscheidung von Standard- und Spezial-Ladungsträgern ist hingegen nicht erforderlich. Andere Merkmale wiederum werden über Eingabeparameter berücksichtigt. Dazu zählt beispielsweise die Bedienung des Schleppers (stehend oder sitzend), die sich in der Haltepunktzeit widerspiegelt. Das Merkmal *Zuordnung (Routenzug:Route)* ist ein Sonderfall und wird aufgrund unterschiedlicher Dimensionierungsansätze in Abhängigkeit von der jeweiligen Merkmalsausprägung (vgl. Abschnitt 6.4) durch unterschiedliche Tabellenblätter berücksichtigt (vgl. Tab. 38 auf S. 128).

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung
SYSTEMGESTALTUNG			
Technik			
Art des Ladungsträgers		GLT	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Art des Fahrzeugs		Schlepper mit Anhänger	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Art der Steuerung des Fahrzeugs		fahrergeführt	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Geschlecht Routenzugfahrer		männlich	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Antrieb des Fahrzeugs		Elektroantrieb	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Anhängertyp			Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Einsatz von Zug-/Schiebehilfen?		kein Anhänger	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Beladetechnik Routenzug		Plattformwagen	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Beladetechnik Trolley/Rahmen		Regalwagen	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Entladetechnik Routenzug		Rollenverschiebesystem	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
		Taxiwagen	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
		C-/E-/H-/U-Rahmen	Auswahl gemäß Dropdown-Liste

Abb. 36: Beispielhafte Auswahl von Gestaltungsmöglichkeiten

Einige organisatorische Merkmalausprägungen können aufgrund des gewählten Dimensionierungsansatzes bzw. der dem Modell zugrunde liegenden Annahmen (vgl. Abschnitt 6.4) im Excel-Tool nicht abgebildet werden (vgl. Tab. 40). Da diese Merkmalsausprägungen in der Praxis eine geringe Rolle spielen (vgl. entsprechende Beschreibungen im Abschnitt 5.2), ist die Einschränkung der Anwendbarkeit des Excel-Tools als gering einzuschätzen.

Tab. 40: Unberücksichtigte Merkmalsausprägungen im Excel-Tool (gelbe Markierung)

<i>Unterscheidungsmerkmal</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>		
Primäre Transportaufgabe	Versorgung	Entsorgung	Ver- und Entsorgung
Festlegung Route (in Bezug auf bestimmten Betrachtungszeitraum)	statisch (gleichbleibende Route, unabhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)		dynamisch (Anpassung der Route, abhängig vom tatsächlichen Transportbedarf)
Anzahl Ladungsträgergrößen je Route	kein Ladungsträger	eine Ladungsträgergröße	mehrere Ladungsträgergrößen
Anzahl Anhängertypen je Routenzug	ein Anhängertyp		mehrere Anhängertypen

Die Auswahlfelder zur Systemgestaltung werden durchgehend einer Konsistenzprüfung unterzogen, indem die gewählten Merkmalsausprägungen auf Kombinierbarkeit geprüft und widersprüchliche Auswahlfelder zwecks Nachvollziehbarkeit hervorgehoben werden. Beispielsweise widerspricht die Auswahl „Regalwagen“ als Anhängertyp dem Ladungsträgertyp „GLT“ (vgl. Abschnitt 5.1.2.2), sodass diese beiden Felder rot markiert werden (vgl. Abb. 37). Die softwaretechnische Umsetzung der Konsistenzprüfung erfolgt durch bedingte Formatierungen. Vor der Eingabe von Parameterwerten müssen alle Widersprüche vom Anwender beseitigt worden sein, da die Werte der nachfolgenden Eingabefelder zum Teil durch die Systemgestaltung beeinflusst werden (vgl. nachfolgende Ausführungen).

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung
SYSTEMGESTALTUNG			
Technik			
Art des Ladungsträgers		GLT	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Art des Fahrzeugs		Schlepper mit Anhänger	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Art der Steuerung des Fahrzeugs		fahrergeführt	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Geschlecht Routenzugfahrer		männlich	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Antrieb des Fahrzeugs		Elektroantrieb	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Anhängertyp		Regalwagen	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Einsatz von Zug-/Schiebehilfen?		Nein	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Beladetechnik Routenzug		manuell mit Hilfsmittel	Auswahl gemäß Dropdown-Liste
Beladetechnik Trolley/Rahmen		kein Trolley-/Rahmeneinsatz	Auswahl gemäß Dropdown-Liste

Abb. 37: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung der Systemgestaltung

Die **Systemelemente** (z. B. Transportgut, Route usw.) sind vom Anwender durch Parameterwerteingaben zu charakterisieren (vgl. Abb. 38). Entsprechende Hinweise bezüglich des Wertebereichs und der Abhängigkeiten je Eingabefeld finden sich in der Spalte „Bemerkung“. Die Werte der Eingabefelder werden zum Teil auf Basis der Auswahl im Bereich Systemgestaltung vorgegeben. Wird beispielsweise im Auswahlfeld des Merkmals *Primäre Transportaufgabe* die Ausprägung „Versorgung“ gewählt, setzt das Excel-Tool die *Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)* automatisch auf Eins. Dies dient einerseits der Unterstützung des Anwenders beim Ausfüllen

6 Bewertungsmodell

der Eingabefelder und andererseits der Sicherstellung konsistenter Eingabedaten für die nachfolgende Bewertung. Entsprechende „abhängige“ Eingabefelder sind durch die Angabe „abhängig von ...“ in der Spalte „Bemerkung“ gekennzeichnet. Die softwaretechnische Umsetzung der automatischen Eingabe erfolgt durch hinterlegte Formeln in den jeweiligen Eingabefeldern. Die Erläuterung aller Merkmale sowie ihrer Abhängigkeiten untereinander bzw. der Einflüsse auf die Berechnungsweisen ist nicht zweckmäßig, weshalb an dieser Stelle auf die Excel-Funktionen „Spur zum Vorgänger“ und „Spur zum Nachfolger“ verwiesen wird, um Formeln nachzuziehen.

Bezeichnung	Einheit	Ansprägung / Wert	Bemerkung
SYSTEMELEMENTE			
Transportgut			
Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	[kg]	200,0	Werte ≥ 0
Route			
Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1	ganzzahlige Werte ≥ 1 ; abhängig von primärer Transportaufgabe
Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10	ganzzahlige Werte ≥ 1 ; abhängig von primärer Transportaufgabe
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	[m]	10	Werte ≥ 0
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	[m]	4	Werte ≥ 0
Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	[1/h]	1,5	Werte ≥ 0 ; Eingabe, sofern minimale Routenfrequenz vorgegeben (z. B. aufgrund von maximaler Pufferreichweite)
Routenlänge	[m]	500	Werte > 0

Abb. 38: Beispielhafte Eingabe von Parameterwerten zu den Systemelementen „Transportgut“ und „Route“

Das Merkmal *Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)* in der Kategorie „Route“ ermöglicht die Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich der Routenfrequenz, die nicht durch den Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 erfasst werden (z. B. vorgegebene Pufferkapazität am Bereitstellort (vgl. Abschnitt 6.4.1.1)). Soll keine Vorgabe erfolgen, ist dieses Feld freizulassen oder eine Null einzusetzen.

In der Kategorie „Haltepunkte“ sind die mittleren Durchsätze je Haltepunkt (vgl. Abschnitt 6.4.1.1) für bis zu 30 Haltepunkte einzugeben.¹¹⁵ Dabei ist zu beachten, dass bei der Dimensionierung von Routenzugsystemen Schwankungen des Transportbedarfs zu berücksichtigen sind [LIEBETRUTH 2016, S. 114 ff.]. Dies geschieht im Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 (Steuerung der Tourenstarts nach festem Fahrplan) durch die Vorgabe eines geplanten kapazitiven Nutzungsgrades (Kapazitätsreserve) [VDI 2016c, S. 8]. Bei den im Excel-Tool zusätzlich implementierten Steuerungsarten „auslastungsorientiert/ereignisorientiert“ und „permanent“ ist hingegen diese Vorgehensweise nicht zweckmäßig, weil keine Schwankungen berücksichtigt werden könnten. Deshalb ist es in diesen Fällen empfehlenswert, Schwankungen des Transportbedarfs über die Erhöhung des Durchsatzes abzubilden. Dabei können die Durchsätze je Haltepunkt jeweils um den gleichen Prozentsatz erhöht werden. Die Eingabefelder nicht benötigter Haltepunkte sind freizulassen bzw. mit einer Null auszufüllen.

¹¹⁵ Die gewählte Begrenzung der Anzahl der Haltepunkte beruht auf der durchgeführten Literaturrecherche und den Erfahrungen des Autors.

Die Eingabe der Parameterwerte in der Kategorie „Transportmittel“ basiert nicht, wie in anderen Software-Tools (z. B. RoutMan der Fa. LOGSOL oder Software-Demonstrator der TU München), auf einer hinterlegten Datenbasis (z. B. Datenbank). Gründe dafür sind einerseits die Vielzahl unterschiedlicher technischer Gestaltungsmöglichkeiten und entsprechender Anbieter [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 177] sowie andererseits die Notwendigkeit zur Pflege der Datenbasis [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 99]. Die Vollständigkeit und Aktualität der Datenbasis (und demzufolge die universelle Anwendbarkeit des Excel-Tools) könnte nicht gewährleistet werden. Stattdessen erfolgt die manuelle Eingabe der Parameterwerte technik- und anbieterunabhängig durch den Anwender.

Hinsichtlich der Eingabe der Transportkapazitäten der jeweiligen Transportmittel ist zu beachten, dass die Transportkapazität bei der Dimensionierung in Abhängigkeit von der technischen Systemgestaltung transportmittelübergreifend berechnet wird. Bei einem Schleppzug ist beispielsweise die *Transportkapazität pro Fahrzeug* gleich Null, da der Schlepper keine Transporteinheiten aufnimmt. In diesem Fall ist das Produkt aus *Anzahl Anhänger je Fahrzeug* und *Transportkapazität pro Anhänger* entscheidend. Werden zudem Rahmen oder Trolleys eingesetzt, ist die *Transportkapazität pro Anhänger* gleich Null; die Transportkapazität ergibt sich als Produkt aus *Anzahl Anhänger je Fahrzeug*, *Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger* und *Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley*. Auf Basis der technischen Systemgestaltung setzt das Excel-Tool automatisch die jeweils irrelevanten Eingabefelder gleich Null.

Die Kategorien „Be- und Entladetechnik“, „Bereitstelltechnik“ und „Informationstechnik“ beeinflussen die Dimensionierung des Routenzugsystems nicht. Entsprechende Angaben sind daher nur zu machen, wenn die Investitions- oder Betriebskosten dem Routenzugsystem zugeordnet und in den Wirtschaftlichkeitskennzahlen berücksichtigt werden sollen.

Die **Systemprozesse** (z. B. Beladung, Fahrt usw.) sind vom Anwender durch Parameterwerteingaben hinsichtlich der jeweiligen Zeitbedarfe zu charakterisieren. Diese beziehen sich für die „Beladung“, den „Halt“ und die „Entladung“ auf die Anzahl der jeweiligen Vorgänge auf einer Tour bei mittlerer Beladung [VDI 2016c, S. 8]. Der Zeitzuschlag für die „Fahrt“ bezieht sich auf eine Tour.

Die Anzahl der Be- und Entladevorgänge wird im Excel-Tool in Abhängigkeit von

- der primären Transportaufgabe,
- der Entkopplung von Beladung/Entladung,
- der Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess,
- dem Einsatz von Trolleys/Rahmen sowie
- den jeweiligen Prozesszeiten

6 Bewertungsmodell

automatisch berechnet. Es wird dabei zwischen „integrierten“ und „entkoppelten“ Be- und Entladevorgängen unterschieden (vgl. Abschnitt 5.2.6). Integrierte Vorgänge werden dem Routenzug direkt zugeordnet und gehen in die Zykluszeitberechnung ein, wohingegen entkoppelte Vorgänge der Berechnung des zusätzlichen Mitarbeiterbedarfs dienen. Sonstige Vor- oder nachgelagerte Prozesse (z. B. Transport vom Bereitstellort zum Arbeitsplatz) werden nicht berücksichtigt.

Die Abb. 39 zeigt die Anzahl der Beladevorgänge für das Anwendungsbeispiel. Die *Anzahl der Beladevorgänge (integriert)* beträgt Eins, weil der Routenzugfahrer lediglich den Anhängerverbund ankuppelt (vgl. Abschnitt 6.6.1). Die *Anzahl der Beladevorgänge (entkoppelt)* beträgt „4,75“, weil die (im Mittel) 4,75 Anhänger pro Tour von einem zusätzlichen Mitarbeiter einzeln beladen werden.¹¹⁶ In Analogie dazu werden vom Routenzugfahrer im Mittel 4,75 Anhänger pro Tour entladen; entkoppelte Entladevorgänge gibt es nicht (vgl. Abb. 40). Die entsprechenden Felder sind grau markiert und dürfen nicht überschrieben werden, da im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschnitt 7.5) auf die hinterlegten Formeln zurückgegriffen wird.

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung
SYSTEMPROZESSE			
(bezogen auf eine Tour bei mittlerer Beladung)			
Beladung			
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	[Stk]	1	wird berechnet, abhängig von primärer Transportaufgabe, Entkopplung Beladung, Verbindung von Schlepper und Anhänger, Einsatz von Trolley/Rahmen
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	[s]	360	
Anzahl Beladevorgänge (entkoppelt)	[Stk]	4,75	wird berechnet, abhängig von primärer Transportaufgabe, Entkopplung Beladung, Verbindung von Schlepper und Anhänger, Einsatz von Trolley/Rahmen
Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	[s]	120	
Fahrt			
Zeitzuschlag	[s]	-	Werte ≥ 0
Halt			
Dauer eines Haltevorgangs	[s]	10	Werte ≥ 0

Abb. 39: Beispielhafte Eingabe und Berechnung von Prozessparameterwerten

Der *realisierte bzw. festgelegte Tourenstartabstand* ist im Fall der Steuerung der Tourenstarts nach festem Fahrplan vom Anwender einzugeben. Als Hilfestellung werden der mindestens erforderliche Tourenstartabstand $t_{TA,min}$ und der maximal mögliche Tourenstartabstand $t_{TA,max}$ als Unter- und Obergrenze einzusetzender Werte sowie der sich ergebende geplante kapazitive Nutzungsgrad des Routenzugs angezeigt (vgl. Abb. 40). Hierbei ist zu beachten, dass die Überschreitung der Obergrenze dazu führt, dass der geforderte Durchsatz nicht erreicht wird, wohingegen die Unterschreitung der Untergrenze „lediglich“ zur Folge hat, dass die Anzahl der berechneten Routenzüge größer ist als die Anzahl der tatsächlich benötigten Routenzüge.

Im Fall der auslastungsorientierten/ereignisorientierten Steuerung der Tourenstarts wird der Tourenstartabstand automatisch auf den Wert von $t_{TA,max}$ gesetzt, d. h. der geplante kapazitive

¹¹⁶ Die *Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)* beruht auf Annahmen (vgl. Abschnitt 6.6.1), da in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 keine Angaben zum entsprechenden Zeitbedarf gemacht werden [VDI 2016c, S. 10].

Nutzungsgrad des Routenzugs beträgt 100 %. Im Fall permanenter Tourenstarts wird der Tourenstartabstand auf den Wert von $t_{TA,min}$ gesetzt, wobei zu berücksichtigen ist, dass dieser iterativ berechnet wird (vgl. Abschnitt 6.4.1.1) und der zeitliche Nutzungsgrad des Routenzugs somit in der Regel etwas weniger als 100 % beträgt. Des Weiteren ist zu beachten, dass $t_{TA,min}$ von den Prozesszeiten abhängig ist, weshalb diese zwingend vor der Festlegung des Tourenstartabstands einzugeben sind.

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung	
Entladung				
Anzahl Entladevorgänge (integriert)	[Stk]	4,75	wird berechnet, abhängig von primärer Transportaufgabe, Entkopplung Entladung, Verbindung von Schlepper und Anhänger, Einsatz von Trolley/Rahmen	
Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	[s]	60	Werte > 0	
Anzahl Entladevorgänge (entkoppelt)	[Stk]	0	wird berechnet, abhängig von primärer Transportaufgabe, Entkopplung Entladung, Verbindung von Schlepper und Anhänger, Einsatz von Trolley/Rahmen	
Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	[s]	0	Werte ≥ 0	
Routenfrequenz/Tourenstartabstand				
Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	[min]	30,0	wird berechnet, abhängig von Steuerung Tourenstart, Werte zwischen $t_{TA,min}$ und $t_{TA,max}$; siehe Felder H160 und H161;	$t_{TA,min} = 14,0$
bzw. Geplanter kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0	wird berechnet, dient als Orientierung für geplanten kapazitiven Nutzungsgrad des Routenzugs	$t_{TA,max} = 31,6$

Abb. 40: Beispielhafte Eingabe des Tourenstartabstands

Weitere Eingabeparameter sind für die Berechnung von Kennzahlen erforderlich, die über die Dimensionierung i. e. S. hinausgehen.¹¹⁷ Die Kategorie „Arbeitszeit“ erfasst beispielsweise die *Anzahl der Schichten* und deren Stundenumfang zwecks Berechnung des Mitarbeiterbedarfs bzw. der Zahl der Arbeitsstunden pro Jahr. Für die Bestimmung der Wiederbeschaffungszeit ist die Angabe des *Zeitbedarfs für vorgelagerte Prozesse* (z. B. Auslagerung aus AKL) notwendig.

Die Kategorie „Kostendaten“ dient zum einen der Eingabe des *kalkulatorischen Zinssatzes pro Jahr* zur Berechnung der Kapitalkosten. Zum anderen hat der Anwender die Möglichkeit *sonstige Investitionen* und Betriebskosten (z. B. *Lizenzkosten* oder *Bestandskosten*) anzugeben, die durch die Systemelemente nicht erfasst werden, aber dem Routenzugsystem zuzurechnen sind.

Die „Qualitätsdaten“ umfassen Eingabegrößen, die direkt in die Kennzahlen zum Lieferservice (Kennzahlen Q-L-1 bis Q-L-4) und zur Sicherheit (Kennzahlen Q-S-1 und Q-S-2) eingehen. Als Hilfestellung werden die berechneten Werte der Parameter *Anzahl der Transportaufträge*¹¹⁸ und *Anzahl der geleisteten Arbeitsstunden* angegeben (vgl. Abb. 41).

Die Eingabegrößen der Kategorie „Ergonomie“ werden für Be- und Entladevorgänge separat erfasst, wobei beide Bereiche gleich aufgebaut sind. Es wird jeweils zwischen den Handhabungsarten „Umsetzen/Halten/Tragen“ (UHT) und „Ziehen/Schieben“ (ZS) unterschieden, wobei in Abhängigkeit von der technischen (z. B. Art des Ladungsträgers oder Anhängertyp) und

¹¹⁷ Die Eingabe dieser Parameterwerte kann ausbleiben, wenn das Excel-Tool lediglich der Dimensionierung und Kennzahlenberechnung gemäß der VDI-Richtlinie 5586 dienen soll [VDI 2016c]. Die nicht oder fehlerhaft berechneten Kennzahlenwerte (z. B. Mitarbeiterbedarf oder Betriebskosten) dürfen dann im Rahmen der Kennzahleninterpretation nicht berücksichtigt werden.

¹¹⁸ Annahme: Die Anzahl der Transportaufträge entspricht der Anzahl der Transporteinheiten.

6 Bewertungsmodell

organisatorischen Systemgestaltung (z. B. Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess) die nicht zutreffenden Eingabefelder automatisch gleich Null gesetzt werden und somit nicht in die Bewertung einfließen.

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung
Qualitätsdaten (jeweils bezogen auf ein Jahr)			
Anzahl Transportaufträge	[LT]	36.480	wird berechnet; abhängig vom Durchsatz
Anzahl termintreuer Transportaufträge	[LT]	35.320	ganzzahlige Werte ≥ 0
Summe Lieferterminabweichung	[min]	6.400	Werte ≥ 0
Anzahl mengentreuer Transportaufträge	[LT]	36.450	ganzzahlige Werte ≥ 0
Summe Liefermengenabweichung	[Stk]	35	ganzzahlige Werte ≥ 0
Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit	[Stk]	1	ganzzahlige Werte ≥ 0
Zahl der geleisteten Arbeitsstunden	[h]	7.327	wird berechnet; abhängig vom Mitarbeiterbedarf
Anzahl der Ausfalltage	[Tage]	3	ganzzahlige Werte ≥ 0

Abb. 41: Beispielhafte Eingabe und Berechnung der Parameterwerte zur Bewertung der Qualität

Die Wichtungen für Körperhaltung, Ausführungsbedingungen und Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sind in den angegebenen Wertebereichen entsprechend den Handhabungsanleitungen der BAuA bzw. der Einstufungshilfe des MLT vorzunehmen (vgl. Anhang B.3) [IAD 2010a]. Dabei sind Mittelwerte zu bilden, d. h. es können entsprechende Dezimalwerte in die Eingabefelder eingetragen werden. Die restlichen Merkmalsausprägungen sind über Dropdown-Listen auswählbar. Vom Anwender ist manuell auszuwählen, anhand welcher Kriterien die Belastungsbewertung erfolgen soll, wobei auch kein Kriterium oder mehrere Kriterien auswählbar sind (vgl. Abschnitt 6.4.1.7). Für die Handhabungsart UHT stehen die Kriterien *Anzahl der Vorgänge*, *Dauer der Vorgänge* und *Entfernung* zur Verfügung. Für die Handhabungsart ZS stehen die Kriterien *Anzahl der Vorgänge* und *Entfernung* zur Auswahl.

Die Abb. 42 zeigt die Eingabefelder für die Ergonomiebewertung der Entladevorgänge des Anwendungsbeispiels. Die Bewertung erfolgt anhand der Handhabungsart ZS, weil der Routenzugfahrer Anhänger am Bereitstellort abkuppelt und bereitstellt. Dabei wird angenommen, dass es sich um Anhänger handelt, die Lenk- und Bockrollen aufweisen. Aufgrund der *mittleren Entfernung Haltepunkt - Senke* (< 5 m) wird die Anzahl der Vorgänge als Bewertungskriterium ausgewählt [IAD 2010a, S. 5]. Beladevorgänge sind in diesem Fall nicht zu berücksichtigen, weil sich die Beladung für den Routenzugfahrer auf das An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes beschränkt. Diese Tätigkeiten sind über das MLT nicht abbildbar.

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Bemerkung
Ergonomie Entladevorgänge			
Umsetzen/Halten/Tragen - einhändig/zweihändig		0	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Umsetzen/Halten/Tragen - Körperhaltung		-	Werte ≥ 1 und ≤ 8 ; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Umsetzen/Halten/Tragen - Ausführungsbedingungen		-	Werte ≥ 0 und ≤ 8 ; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Kriterium - Anzahl Vorgänge (Umsetzen)		0	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; mehrere Kriterien auswählbar
Kriterium - Dauer Vorgänge (Halten)		0	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; mehrere Kriterien auswählbar
Kriterium - Entfernung (Tragen)		0	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; mehrere Kriterien auswählbar
Ziehen/Schieben - Körperhaltung		2,0	Werte ≥ 1 und ≤ 8 ; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Ziehen/Schieben - Ausführungsbedingungen		1,0	Werte ≥ 0 und ≤ 8 ; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Ziehen/Schieben - Positioniergenauigkeit		1,5	Werte ≥ 1 und ≤ 4 ; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Trolley/Anhänger NUR Lenkrollen		Nein	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; siehe auch Einstufungshilfen MLT
Kriterium - Anzahl Vorgänge (≤ 5 m)		Ja	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; ein Kriterium auswählbar
Kriterium - Entfernung (> 5 m)		Nein	Auswahl gemäß Dropdown-Liste; ein Kriterium auswählbar

Abb. 42: Beispielhafte Eingabe/Auswahl der Parameterwerte/-ausprägungen zur Bewertung der Ergonomie

Alle Eingabedaten im Zellbereich E3:E220 [5] können abschließend mit dem Makro „Eingabedaten als Beispiel Nr. ... speichern“ [1] im Tabellenblatt „Beispiele“ (vgl. Abschnitt 6.6.2.7) unter einer vom Anwender anzugebenden Nummer und Bezeichnung gespeichert werden (vgl. Anhang B.2). Mittels des Makros „Gespeichertes Beispiel Nr. ... einsetzen“ können diese oder andere gespeicherte Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „Beispiele“ in die Eingabefelder im Zellbereich E3:E220 [5] kopiert werden, wobei sichergestellt sein muss, dass die Eingabefelder zuvor durch Ausführung des Makros „Eingabefelder zurücksetzen“ gelöscht wurden.

6.6.2.2 Tabellenblatt „R_X Berechnung“

Das Tabellenblatt „R_X Kennzahlen“ ist für den Anwender nur von Bedeutung, wenn Kennzahlenberechnungen bzw. Zwischenergebnisse überprüft werden sollen. Es sind prinzipiell keine Eingaben vorzunehmen und es werden keine aufbereiteten Ergebnisse dargestellt. Deshalb wird im Folgenden lediglich der prinzipielle Aufbau erläutert (vgl. Abb. 43) und auf die entsprechenden Berechnungsgrundlagen verwiesen.

Dimensionierung nach VDI 5586		Route 1	
(festgelegter Tourenstartabstand)			
Bezeichnung		Einheit	Wert
Routenfrequenz/Tourenstartabstand			
Minimale Routenfrequenz/Anzahl benötigter Touren			
$f_{R,min}$	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	[1/h]	1,5
λ_R	Durchsatz	[L/T/h]	9,5
K_{RZ}	Kapazität Routenzug	[L/T]	5
$n_{Tour,min}$	Anzahl benötigter Touren (berechnet)	[1/h]	1,9
Maximaler Tourenstartabstand [8]			
$t_{TA,max,Vorgabe}$	Maximal möglicher Tourenstartabstand (Vorgabe)	[min]	40
$t_{TA,max,berechnet}$	Maximal möglicher Tourenstartabstand (berechnet)	[min]	31,6
$t_{TA,max}$	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
Tatsächlicher Tourenstartabstand [9]			
η_{KZ}	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
$t_{TA,max}$	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
t_{TA}	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
Mittlere Beladung Routenzug pro Tour			

Abb. 43: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Berechnung“

Der Zellbereich B2:F313 umfasst Kennzahlenberechnungen [8] basierend auf den Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“ (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Vorangestellt ist die angepasste Dimensionierung nach der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Darauf folgen die Berechnungen der Kategorien

- Anzahl Ladungsträger und Transportmittel,
- Wiederbeschaffungszeiten,
- Automatisierungsgrad,
- Fahrwegberechnung,
- Gehwegberechnung,
- Kosten und

6 Bewertungsmodell

- Ergonomie

gemäß den Abschnitten 6.4.1.2 bis 6.4.1.7.

In den ausgeblendeten Spalten H bis BS [9] befinden sich die Berechnungen von mindestens erforderlichem und maximal möglichem Tourenstartabstand (vgl. Abschnitte 6.4.1.1 und 6.6.2.1) sowie die Ergonomieberechnungen des hinterlegten MLT (Zellbereich N273:BS335). Mittels des „+“-Symbols in der Steuerungsleiste oberhalb der Spalte BT können diese Berechnungen eingeblendet werden.

6.6.2.3 Tabellenblatt „R_X Kennzahlen“

Das Tabellenblatt „R_X Kennzahlen“ dient der numerischen und grafischen Darstellung der routenbezogenen Kennzahlenwerte basierend auf den Eingaben im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ (vgl. Abb. 44). Der Zellbereich B2:E3 der Tabelle gibt an, auf welche Route sich die Kennzahlen beziehen und ob die Route im Rahmen der Kennzahlenberechnung des Systems berücksichtigt wird [10]. Die Felder werden aus dem Tabellenblatt „R_X Eingaben“ übernommen. Der darunterliegende Teil der Tabelle (Zellbereich B4:E111) umfasst die numerische Darstellung der insgesamt 99 routenbezogenen Kennzahlenwerte [11] gemäß den im Abschnitt 6.3.2.2 definierten Kategorien (Anzahl in Klammern)

- **Strukturkennzahlen (5),**
- **Logistikleistungskennzahlen (48),**
- **Wirtschaftlichkeitskennzahlen (35) und**
- **Qualitätskennzahlen (11).**

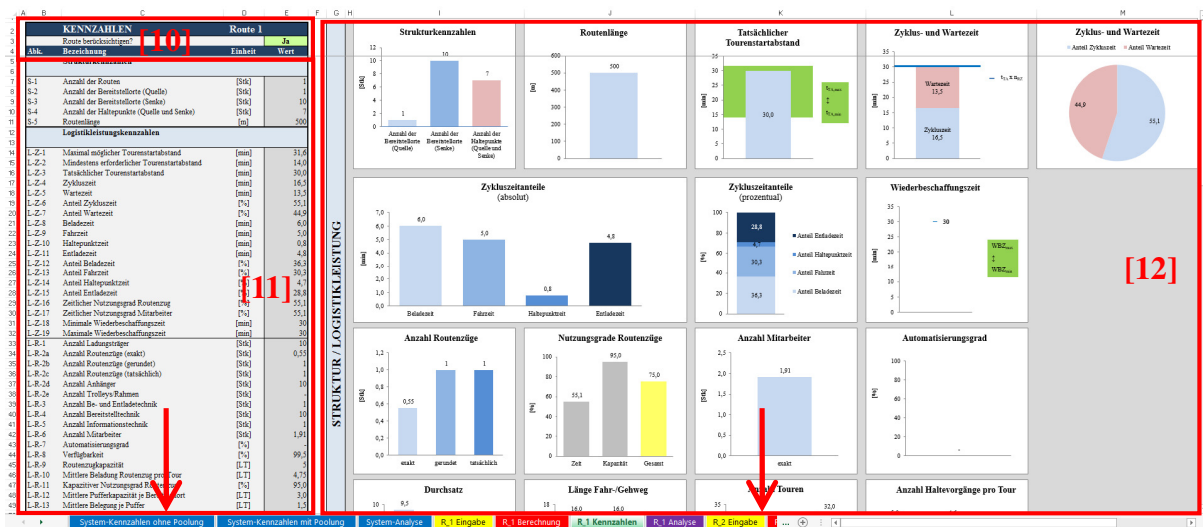


Abb. 44: Bereiche des Tabellenblatts „R_X Kennzahlen“

Die Kennzahlenwerte werden einer Konsistenzprüfung unterzogen, indem prozentual angegebene Kennzahlenwerte, Tourenstartabstand und Wiederbeschaffungszeiten hinsichtlich ihres Wertebereichs überprüft werden. Beispielsweise widerspricht die Festlegung eines Tourenstartabstands von 40 min im Anwendungsbeispiel dem maximal möglichen Tourenstartabstand und führt zu ungünstigen Werten beim Nutzungsgrad und der Flexibilität des Routenzugs. Die softwaretechnische Umsetzung der Konsistenzprüfung erfolgt durch bedingte Formatierungen (vgl. Abb. 45). Vor der Interpretation der Bewertungsergebnisse müssen die Ursachen von Widersprüchen vom Anwender identifiziert und beseitigt worden sein.

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	40,0

Abb. 45: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung von Kennzahlen

Zu beachten ist, dass bei der Kennzahl *Anzahl Transportmittel* (L-R-2) zwischen Routenzug, Anhänger und Trolleys/Rahmen unterschieden wird. Da zudem der *Anzahl der Routenzüge* im Rahmen der Dimensionierung eine besondere Bedeutung zukommt, wird der exakte, der gerundete und der tatsächliche Wert angegeben (vgl. Abb. 46). Der tatsächliche Wert berücksichtigt beispielsweise, dass weitere Routenzüge erforderlich sind, wenn diese vorbeladen werden (vgl. Abschnitte 5.2.6 und 5.2.9). Im Anwendungsbeispiel sind zusätzliche Anhänger, aber kein zusätzlicher Schlepper erforderlich, weil der Anhängerverbund getauscht wird.

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-

Abb. 46: Differenzierung der Kennzahl *Anzahl Transportmittel*

Der Zellbereich G2:M120 [12] beinhaltet die grafische Ergebnisdarstellung ausgewählter Kennzahlenwerte in Form von Diagrammen zwecks Unterstützung der Interpretation von Bewertungsergebnissen durch den Anwender (vgl. Abschnitt 6.7).

6.6.2.4 Tabellenblatt „System-Kennzahlen ohne Poolung“

Das Tabellenblatt „System-Kennzahlen ohne Poolung“ dient der numerischen und grafischen Darstellung der systembezogenen Kennzahlenwerte basierend auf den Eingaben in den Tabellenblättern „R_X Eingabe“ (vgl. Abb. 47). Der Aufbau entspricht in den Grundzügen dem des Tabellenblatts „R_X Kennzahlen“, mit dem Unterschied, dass die Kennzahlenwerte aller Routen sowie des Systems numerisch dargestellt werden und die grafische Ergebnisdarstellung systembezogen erfolgt.

6 Bewertungsmodell

KENNZAHLEN			SYSTEM		Route 1	Route 2	Route 3	Route 4	Route 5	Route 6	Route 7	Route 8	Route 9	Route 10
Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert 0	Wert 1	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
Strukturkennzahlen														
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-5	Routenlänge	[m]	500	500	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Logistikleistungskennzahlen														
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6	31,6	31,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0	14,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0	30,0	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5	16,5	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-5	Wartezent	[min]	13,5	13,5	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	55,1	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-7	Anteil Wartezent	[%]	44,9	44,9	44,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-8	Belastcent	[min]	6,0	6,0	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-9	Fahrzent	[min]	5,0	5,0	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-10	Haltepunktzent	[min]	0,8	0,8	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-11	Entlastcent	[min]	4,8	4,8	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-12	Anteil Belastcent	[%]	36,3	36,3	36,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-13	Anteil Fahrzent	[%]	30,3	30,3	30,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-14	Anteil Haltepunktzent	[%]	4,7	4,7	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-15	Anteil Entlastcent	[%]	28,8	28,8	28,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	55,1	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-18	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55	0,55	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2e	Anzahl Trolley-Rahmen	[Stk]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entlastcent	[Stk]	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-4	Anzahl Bereitstellcent	[Stk]	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-5	Anzahl Informationstechn.	[Stk]	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 47: Bereiche des Tabellenblatts „System-Kennzahlen ohne Poolung“

Der Zellbereich B2:P3 der Tabelle gibt an, welche Routen im Rahmen der Kennzahlenberechnung des Systems berücksichtigt werden [13]. Der Zellbereich B4:D111 listet die Kennzahlenabkürzungen, -bezeichnungen und -einheiten auf [14]. Die Kennzahlenwerte je Route werden automatisch aus den Tabellenblättern „R_X Kennzahlen“ übernommen und im Zellbereich G4:P111 aufgeführt [16]. Basierend auf diesen routenbezogenen Kennzahlenwerten erfolgt die Berechnung der systembezogenen Kennzahlenwerte im Zellbereich E4:F111 gemäß Abschnitt 6.4.2.1 [15]. Der Zellbereich R7:W111 des Tabellenblatts beinhaltet die grafische Ergebnisdarstellung in Form von Diagrammen, wobei diese, je nach Kennzahl, auf durchschnittlichen oder summierten Werten basieren [18]. Für Einroutensysteme sind die systembezogenen Kennzahlenwerte mit den routenbezogenen Kennzahlenwerten identisch.

6.6.2.5 Tabellenblatt „Berechnung mit Poolung“

Das Tabellenblatt „Berechnung mit Poolung“ ist für den Anwender nur von Bedeutung, wenn Kennzahlenberechnungen bzw. Zwischenergebnisse überprüft werden sollen. Es sind prinzipiell keine Eingaben vorzunehmen und es werden keine aufbereiteten Ergebnisse dargestellt. Der Zellbereich B2:F115 umfasst systembezogene Kennzahlenberechnungen [18] basierend auf den routenbezogenen Dimensionierungsergebnissen und Kennzahlenwerten, für den Fall, dass die Routenzüge im betrachteten Routenzugsystem routenübergreifend (Poolung) genutzt werden (vgl. Abb. 48). Die Berechnungen umfassen nach Abschnitt 6.4.2.2 die Kategorien

- Dimensionierung,
- Anzahl Ladungsträger und Transportmittel,
- Fahrweg und
- Kosten.

6.6 Umsetzung des Bewertungsmodells in MS Excel

Dimensionierung Poolung		Routen 1-10	
Bezeichnung		Einheit	Wert
Anzahl erforderlicher Routenzüge			
RRZ_exakt, R_1	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 1	[Stk]	0,55
RRZ_exakt, R_2	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 2	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_3	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 3	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_4	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 4	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_5	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 5	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_6	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 6	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_7	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 7	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_8	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 8	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_9	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 9	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, R_10	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt) Route 10	[Stk]	0,00
RRZ_exakt, System	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55
RRZ_gerundet, System	Anzahl erforderlicher Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug			
RRZ_exakt, System	Anzahl erforderlicher Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55
RRZ_gerundet, System	Anzahl erforderlicher Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
TR_Z, System	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1
Gesamtzahl Routenzüge			
TR_Z, System	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1

Abb. 48: Bereich des Tabellenblatts „Berechnung mit Poolung“

6.6.2.6 Tabellenblatt „System-Kennzahlen mit Poolung“

Der Aufbau und die Funktionsweise stimmen mit dem des Tabellenblatts „System-Kennzahlen ohne Poolung“ überein, mit dem Unterschied, dass im Zellbereich G4:P111 [19] diejenigen routenbezogenen Kennzahlenwerte eliminiert sind, die nach Abschnitt 6.4.2.2 systembezogen berechnet werden (vgl. Abb. 49). Für Einroutensysteme sind die systembezogenen Kennzahlenwerte mit den routenbezogenen Kennzahlenwerten identisch.

KENNZAHLEN SYSTEM		Route 1	Route 2	Route 3	Route 4	Route 5	Route 6	Route 7	Route 8	Route 9	Route 10
Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert 0	Wert 1	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
Strukturkennzahlen											
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1	1	-	-	-	-	-	-	-
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1	1	-	-	-	-	-	-	-
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10	10	-	-	-	-	-	-	-
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7	7	-	-	-	-	-	-	-
S-5	Routenlänge	[m]	500	500	-	-	-	-	-	-	-
Logistikleistungskennzahlen											
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6	31,6	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0	30,0	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5	16,5	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-5	Wartzeit	[min]	13,5	13,5	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-7	Anteil Wartzeit	[%]	44,9	44,9	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-8	Reisezeit	[min]	6,0	6,0	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0	5,0	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8	0,8	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8	4,8	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-12	Anteil Entladezeit	[%]	36,3	36,3	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	30,3	30,3	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	4,7	4,7	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	28,8	28,8	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	55,1	55,1	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30	30	-	-	-	-	-	-	-
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30	30	-	-	-	-	-	-	-
L-R-1	Anzahl Ladungsrouten	[Stk]	10	10	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55	0,55	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2d	Anzahl Leitungen	[Stk]	10	10	-	-	-	-	-	-	-
L-R-2e	Anzahl Treilley-Rahmen	[Stk]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1	1	-	-	-	-	-	-	-
L-R-4	Anzahl Bereitstellorte	[Stk]	10	10	-	-	-	-	-	-	-
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1	1	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 49: Darstellung routenbezogener Kennzahlenwerte im Tabellenblatt „System-Kennzahlen mit Poolung“

6.6.2.7 Tabellenblatt „Beispiele“

Das Tabellenblatt „Beispiele“ dient der Sicherung von Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“, um diese beispielsweise dokumentieren oder als Vorlagen wiederverwenden zu können. Es sind keine manuellen Eingaben vorzunehmen, weil die Daten mittels der Makros

6 Bewertungsmodell

im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ (vgl. Abschnitt 6.6.2.1) gespeichert und abgerufen werden (vgl. Anhang B.2). Die beiden Makros im Zellbereich B2:C2 [20] besitzen die in der Tab. 41 aufgeführten Funktionsumfänge.

Tab. 41: Makros und Funktionsumfänge im Tabellenblatt „Beispiele“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Beispiel Nr. ... löschen	Gespeicherte Eingabedaten des Beispiels Nr. ... im Tabellenblatt „Beispiele“ löschen.
Alle Beispiele löschen	Gespeicherte Eingabedaten aller Beispiele im Tabellenblatt „Beispiele“ löschen.

Der Zellbereich B3:D220 (vgl. Abb. 50) umfasst die Kategorie, Bezeichnung und Einheiten der abgefragten Merkmale [21] entsprechend dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“ (vgl. Nr. [4] in der Abb. 35 auf S. 129). Der Zellbereich E3:AR220 [22] enthält spaltenweise die Merkmalsausprägungen der jeweiligen Ein- und Auswahlfelder (vgl. Nr. [5] in der Abb. 35 auf S. 129) von bis zu 40 Beispielen. Im Excel-Tool sind das Dimensionierungsbeispiel (Beispiel 1) sowie die Praxisbeispiele (Beispiele 2 bis 7)¹¹⁹ der VDI-Richtlinie 5586 [VDI 2016c, S. 10 ff.; VDI 2016b, S. 8 ff.] bereits hinterlegt.

EINGABEPARAMETER - BEISPIELE		Beispiel 1 VDI 5586 (Dimensionierung)	Beispiel 2 KLT aus Supermarkt	Beispiel 3 KLT aus AKL	Beispiel 4 GLT mit Trolleys	Beispiel 5 KLT mit Trolleys
Route berücksichtigen?		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert	Ausprägung / Wert	Ausprägung / Wert	Ausprägung / Wert	Ausprägung / Wert
SYSTEMGESTALTUNG						
Technik						
Art des Ladungsträgers		GLT	KLT	KLT	GLT	KLT
Art des Fahrzeugs		Schlepper mit Anhänger	Schlepper mit Anhänger	Schlepper mit Anhänger	Schlepper mit Anhänger	Schlepper mit Anhänger
Art der Steuerung des Fahrzeugs		fahrgeführt	fahrgeführt	fahrgeführt	fahrgeführt	fahrgeführt
Geschlecht Routenzugfahrer		männlich	weiblich	männlich	männlich	männlich
Antrieb des Fahrzeugs		Elektroantrieb	Elektroantrieb	Elektroantrieb	Elektroantrieb	Elektroantrieb
Anhängertyp		Plattformwagen	Regalwagen	Regalwagen	C-E-H-U-Rahmen	C-E-H-U-Rahmen
Einsatz von Zug-/Schiebehilfen?		Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Beladetechnik Routenzug		manuell mit Hilfsmittel	manuell (ohne Hilfsmittel)	automatisch	manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)
Beladetechnik Trolley/Rahmen		kein Trolley-/Rahmeneinsatz	kein Trolley-/Rahmeneinsatz	kein Trolley-/Rahmeneinsatz	manuell (mit Hilfsmittel)	manuell (mit Hilfsmittel)
Entladetechnik Routenzug		manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)
Entladetechnik Trolley/Rahmen		kein Trolley-/Rahmeneinsatz	kein Trolley-/Rahmeneinsatz	kein Trolley-/Rahmeneinsatz	manuell (ohne Hilfsmittel)	manuell (ohne Hilfsmittel)
Bereitstellung Quelle		Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmittel	Regalbereitstellung	Regalbereitstellung	Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmittel	Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmittel
Bereitstellung Senke		Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmittel	Regalbereitstellung	Regalbereitstellung	Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmittel	Regalbereitstellung
Technischer Informationsträger		Rechner (Produktionsplan)	Karte (Karten-Kanban)	Rechner (Produktionsplan)	Rechner (Produktionsplan)	Rechner (Produktionsplan)
Organisation						

Abb. 50: Bereiche des Tabellenblatts „Beispiele“

6.7 Beispielhafte Anwendung des Bewertungsmodells

Im Rahmen der Bewertung sind die für den Anwender relevanten Kennzahlen zu erfassen und zu interpretieren. Für das Anwendungsbeispiel sind zum einen diejenigen Kennzahlen von Interesse, die in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 ausgewiesen sind [VDI 2016c, S. 12], da sie im Folgenden der Verifikation und Validierung des Modells dienen (vgl. Abschnitt 6.8). Zum an-

¹¹⁹ Für in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 nicht angegebene Eingangsgrößen wurden sinnvolle Merkmalsausprägungen gewählt. Das Praxisbeispiel „Versorgung von Montagelinien mit in einem Puffer zusammengeführten Ladungsträgern [...]“ [VDI 2016b, S. 17 ff.] entspricht den Beispielen 5 und 6 im Excel-Tool, da KLT- und GLT-Transporte über separate Routen abgebildet werden müssen.

6.7 Beispielhafte Anwendung des Bewertungsmodells

deren sind solche Kennzahlen von Bedeutung, die der Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen dienen (vgl. Abschnitte 7.6 und 8.4). Das vollständige numerische und grafische Bewertungsergebnis findet sich im Anhang C.2 bzw. in der Datei „2_Routenzug-Tool Beispiel“ im Datenanhang, wobei zu berücksichtigen ist, dass lediglich die routenbezogenen Kennzahlenwerte dargestellt werden, da es sich um ein Einroutensystem handelt (vgl. Abschnitt 6.6.2.4).

Gemäß den Kennzahlenwerten in der Tab. 42 ist es möglich, alle Bereitstellorte durch den Einsatz **eines** Routenzugs mit den benötigten Gütern zu versorgen [VDI 2016c, S. 12]. Bei dem gewählten Tourenstartabstand von 30 min dauert eine Tour im Mittel 16,5 min, was einem zeitlichen Nutzungsgrad des Routenzugs von 55,1 % entspricht. Die mittlere Beladung des Routenzugs pro Tour beträgt 4,75 LT und entspricht einem kapazitiven Nutzungsgrad von 95 %. Somit ergibt sich ein Gesamtnutzungsgrad von 75 %.

Tab. 42: Numerische Darstellung ausgewählter Kennzahlenwerte für das Anwendungsbeispiel

<i>Abk.</i>	<i>Kennzahl</i>	<i>Einheit</i>	<i>Wert</i>
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	75,0

Das geplante Routenzugsystem bietet kaum Kapazitätsreserven, weil der festgelegte Tourenstartabstand nahezu dem maximal möglichen Tourenstartabstand entspricht (vgl. Abb. 51). Ist es das Ziel, den Routenzug kapazitiv möglichst niedrig auszulasten, um beispielsweise Schwankungen des Transportbedarfs abdecken zu können, sollte der Routenzug häufiger fahren. Unter Berücksichtigung des mindestens erforderlichen Tourenstartabstands von 14 min (bei **einem** Routenzug) und des geringen zeitlichen Nutzungsgrades von ca. 55 % sind kürzere Tourenstartabstände prinzipiell realisierbar. Dies hat zudem den Vorteil, dass sich die Transportbedarfe auf eine höhere Anzahl Touren pro Zeiteinheit verteilen, wodurch die Anzahl der auf spätere Touren zurückgestellten Transportaufträge in der Regel abnimmt [VDI 2016c, S. 13]. Demgegenüber erhöht sich allerdings der zeitliche Nutzungsgrad des Routenzugs sowie der Mitarbeiterbedarf, was sich in höheren Betriebskosten widerspiegelt (vgl. Abschnitt 8.5).

Anhand dieses einfachen Beispiels wird deutlich, dass die Güte eines Routenzugsystems maßgeblich von individuellen Zielsetzungen abhängt, weshalb diese zwingend im Rahmen der Analyse und Optimierung zu berücksichtigen sind.

Die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 zielt im Rahmen der Dimensionierung auf die Berechnung der Zykluszeit ab, betrachtet deren Zeitanteile allerdings nicht näher [VDI 2016c, S. 11]. Das entwickelte Excel-Tool stellt hingegen die Zykluszeitanteile numerisch und grafisch dar, um Prozesse hinsichtlich ihres Zeitbedarfs gezielt bewerten zu können. Hinsichtlich des Beispiels fällt auf, dass die Beladezeit mit 6 min verhältnismäßig hoch ist und mit ca. 36 % über ein Drittel

6 Bewertungsmodell

der Zykluszeit ausmacht (vgl. Abb. 52). Das ist insbesondere vor dem Hintergrund der bereits realisierten Entkopplung (Vorbeladung der Anhänger) als negativ zu beurteilen, da für diesen Prozess im Mittel zusätzlich 9,5 min je Routenzug erforderlich sind (vgl. Abb. 39 auf S. 134).

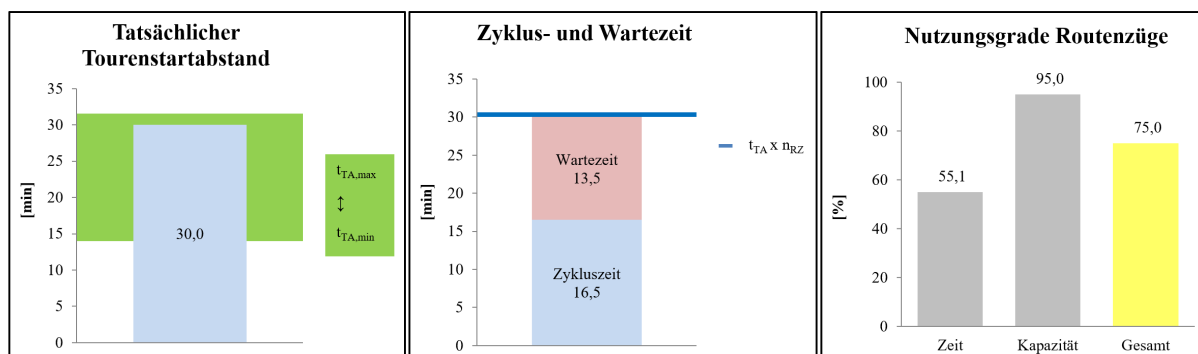


Abb. 51: Grafische Darstellung von *Tourenstartabstand*, *Zyklus- und Wartezeit* sowie *Nutzungsgraden*

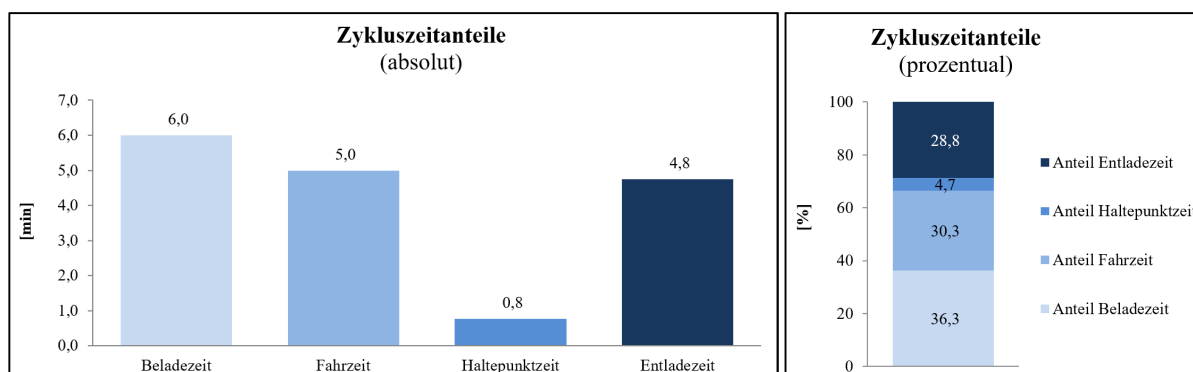


Abb. 52: Grafische Darstellung der *Zykluszeitanteile*

Der zusätzliche Zeitbedarf für die entkoppelte Beladung der Anhänger spiegelt sich auch im hohen Mitarbeiterbedarf wider, von dem ca. 60 % auf die Beladung der Anhänger und das Ab- und Ankuppeln im Lager zurückzuführen sind. Daraus resultieren jährliche Personalkosten in Höhe von ca. 95.000 €, die mit knapp 85 % wiederum den Großteil der Betriebskosten pro Jahr ausmachen (vgl. Abb. 53). Somit sollten im Hinblick auf die Betriebskosten als Zielgröße beispielsweise die Beladeprozesse effizienter gestaltet werden (vgl. Abschnitt 8.2).

Auf der anderen Seite führt die Entkopplung der Beladung im Beispiel dazu, dass die physische Belastung des Routenzugfahrers trotz der hohen Last (420 kg) vergleichsweise gering ist (vgl. Abb. 54). Das liegt daran, dass die Anhänger bei der Beladung nicht manuell gezogen/geschoben werden müssen, wie es beispielsweise beim Ab- und Ankuppeln einzelner Anhänger erforderlich wäre. Der Ergonomiepunktwert ist somit nur durch die Anzahl der Entladevorgänge pro Tour bestimmt. Aus ergonomischer Sicht ist das Routenzugsystem demzufolge sinnvoll gestaltet.

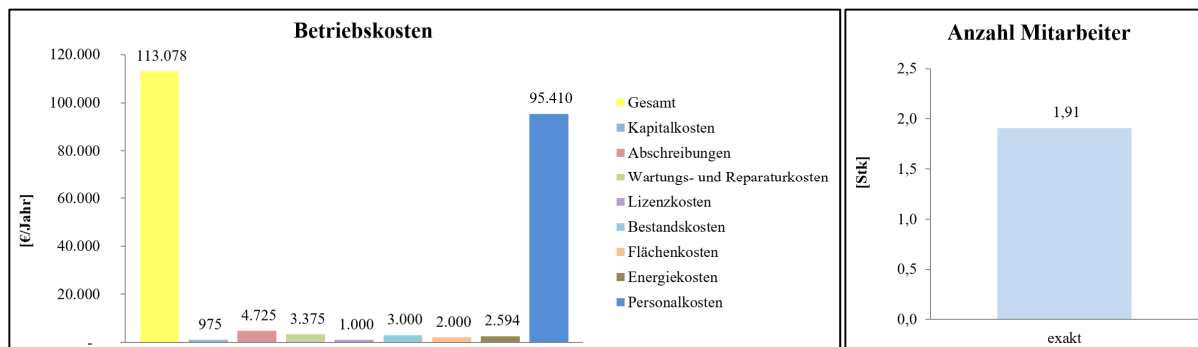


Abb. 53: Grafische Darstellung der *Betriebskosten* und *Anzahl erforderlicher Mitarbeiter*

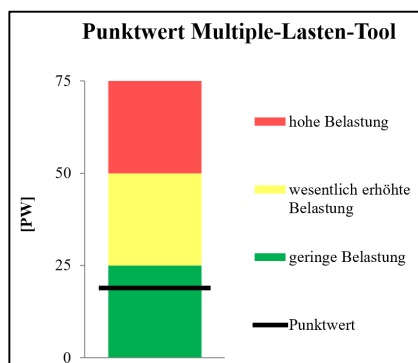


Abb. 54: Grafische Darstellung der Bewertung der physischen Belastung des Routenzugfahrers

In der Gesamtschau wird deutlich, dass sowohl die Bewertung des Routenzugsystems (Interpretation von Kennzahlenwerten) als auch dessen Optimierung (Wirkung von Optimierungsmaßnahmen) von der individuellen Zielsetzung des Betrachters abhängen.

6.8 Verifikation und Validierung

Das Ziel der Verifikation und Validierung (V&V) ist es, zu verhindern, dass aus dem Modell bzw. aus der Anwendung des Modells fehlerhafte Aussagen getroffen werden [RABE ET AL. 2008, S. 2]. Verifikation bedeutet in diesem Zusammenhang die Überprüfung der Korrektheit des Modells bzw. der Transformation aus einem anderen Modell, wohingegen Validierung die Überprüfung der Eignung des Modells in Bezug auf den Einsatzzweck bezeichnet [GERBERICH 2011, S. 359]. Im Rahmen dieser Arbeit bietet sich die getrennte V&V der Bewertungs-, Analyse- und Optimierungsmodelle an, da diese separat entwickelt werden und aufeinander aufbauen (vgl. Abschnitte 6.1, 7.1 und 8.1).

In der Regel ist die Korrektheit und Eignung von Modellen nicht vollständig nachweisbar [RABE ET AL. 2008, S. 1]. Das ist in der Komplexität der Modelle begründet, wodurch Tests, bei denen jede denkbare Systemkonfiguration und jeder Systemzustand getestet werden, praktisch nicht umsetzbar sind. Aus den technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten der Systemgestaltung im Bewertungsmodell (vgl. Abschnitt 6.6.2.1) resultieren beispielsweise über

6 Bewertungsmodell

33 Mrd. Kombinationsmöglichkeiten¹²⁰, die hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit überprüft werden müssten. Hinzu kommt die nicht eindeutig quantifizierbare Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten hinsichtlich der weiteren 134 Eingabeparameter mit meist kontinuierlichem Wertebereich.

Dies führt zu der Erkenntnis, dass die Fehlerhaftigkeit eines Modells durch ein einziges Beispiel beweisbar ist, wohingegen die Fehlerfreiheit nicht gewährleistet werden kann [RABE ET AL. 2008, S. 93]. Die Bestätigung der Glaubwürdigkeit der Modelle erfolgt in dieser Arbeit durch die Anwendung mehrerer V&V-Techniken, weil dadurch beispielsweise unterschiedliche Fehlertypen (z. B. Syntax- oder Logikfehler) im Rahmen struktureller und funktionaler Tests identifizierbar sind [SARGENT 2007, S. 128].¹²¹

Die softwaretechnische Umsetzung der Modelle setzt voraus, dass nicht nur die Modelle selbst, sondern auch die Programmierung einer V&V unterzogen wird. Dies erfolgt bereits während der Implementierung in MS Excel durch Begutachtung und systematische Überprüfung von Formeln und Makros (Code-Inspektionen) hinsichtlich Syntax- und Semantikfehlern. Das Debugging der Formeln und Makros zum Zweck der Erkennung von Logikfehlern erfolgt durch Testläufe mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen sowie das bewusste hervorrufen von Fehlern (vgl. Abschnitt 6.6.2.3).

Die Struktur des Modells lässt sich mittels der Excel-Funktionen zur Formelüberwachung zweckmäßig testen. Damit wird beispielweise sichergestellt, dass alle Zellen mit Eingabeparameterwerten mindestens eine „Spur zum Nachfolger“ aufweisen. Demgegenüber müssen alle Zellen mit Kennzahlwerten mindestens eine „Spur zum Vorgänger“ besitzen. Des Weiteren wird geprüft, ob die Beziehungen zwischen Zellen und/oder Tabellenblättern mit den Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Definitionsblätter übereinstimmen (vgl. Anhang A.1 bis A.4). Die Tests erfolgen aufgrund des modularen Aufbaus der Tabellenblätter zunächst für Teilmodelle (z. B. routenbezogene Kennzahlwerte), anschließend für das gesamte Excel-Tool (z. B. systembezogene Kennzahlwerte).

Konsistenzprüfungen dienen dazu, unzulässige Kombinationen von Auswahlfeldern sowie widersprüchliche Werte in zwei oder mehr Zellen zu identifizieren. Beispiele dafür sind die Auswahl nicht verträglicher Techniken im Rahmen der Systemgestaltung (vgl. Abschnitt 6.6.2.1) oder die Festlegung eines ungültigen Tourenstartabstands (vgl. Abschnitt 6.6.2.3). Die Konsistenzprüfungen sind mittels bedingter Formatierungen im Excel-Tool integriert und erfolgen somit permanent.

¹²⁰ Es sind genau 33.592.320.000 Kombinationsmöglichkeiten.

¹²¹ Gängige V&V-Techniken sowie deren Beschreibungen finden sich u. a. in [BALCI 2003, S. 155 f.; SARGENT 2007, S. 128 ff.; RABE ET AL. 2008, S. 93 ff.].

Die V&V der Diagramme zur Kennzahlendarstellung erfolgt durch den Vergleich der numerischen mit den grafischen Ergebnissen. Durch systematische und schrittweise Variation aller numerischen Kennzahlenwerte wird sichergestellt, dass numerische und grafische Bewertungsergebnisse übereinstimmen.

Die Anwendung der genannten Techniken stellt sicher, dass das Modell im Excel-Tool formallogisch korrekt umgesetzt ist und dass die Eingabedaten, Berechnungen und Kennzahlenwerte konsistent und widerspruchsfrei sind. Aufbauend darauf ist zu prüfen, ob die Bewertungsergebnisse erklärbar und für die Bewertung von Routenzugsystemen geeignet sind. Hierfür eignet sich im ersten Schritt der Vergleich mit einem anderen (einfacheren) Modell, für das Ergebnisse mit bestimmten Eingabedaten vorliegen [RABE ET AL. 2008, S. 110; SARGENT 2007, S. 128]. Es bietet sich daher an, das Bewertungsergebnis des Anwendungsbeispiels mit dem Ergebnis des Dimensionierungsbeispiels der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 zu vergleichen, um den angepassten Dimensionierungsansatz zu validieren. Stellt man die Werte derjenigen Kennzahlen gegenüber, die auch in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 ausgewiesen sind [VDI 2016c, S. 11 f.], ergibt sich die Tab. 43, in der die voneinander abweichenden Kennzahlenwerte rot hinterlegt sind.

Tab. 43: Vergleich von Kennzahlenwerten (Bewertungsmodell und VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 9 ff.])

<i>Abk.</i>	<i>Kennzahl</i>	<i>Einheit</i>	<i>Wert Bewertungsmodell</i>	<i>Wert VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2</i>
L-Z-4	Zykluszeit	[s]	991	889
L-Z-8	Beladezeit	[s]	360	360
L-Z-9	Fahrzeit	[s]	300	300
L-Z-10	Haltepunktzeit	[s]	46	44
L-Z-11	Entladezeit	[s]	285	285
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1	55,0
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1	1
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0	95,0
L-M-2	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0	16,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk]	4,6	4,4
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	75,0	52,3

Legende: nicht übereinstimmende Kennzahlenwerte

Hinsichtlich der Zykluszeit sind zwei Sekunden Abweichung erkennbar, die aus der im Vergleich zur VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 längeren Haltepunktzeit resultiert. Das ist dem Umstand geschuldet, dass das Bewertungsmodell auf haltepunktbezogenen Durchsätzen basiert, wohingegen die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 artikelbezogene Durchsätze berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.4.1.1) [VDI 2016c, S. 10 ff.]. Aufgrund unterschiedlicher Haltewahrscheinlichkeiten beträgt die Anzahl der Haltevorgänge damit 4,6 bzw. 4,4. Da die Abweichungen erklärbar und bezogen auf die Zykluszeit in der Regel sehr gering sind (hier: ca. 0,23 %), ist der Einfluss im

6 Bewertungsmodell

Rahmen der Dimensionierung als gering einzustufen. Die geringe Abweichung des zeitlichen Nutzungsgrades des Routenzugs (ca. 0,18 %) bestätigt diese Einschätzung.

Die Abweichung hinsichtlich des Gesamtnutzungsgrades beträgt 23,3 %, wobei dies auf unterschiedliche Berechnungslogiken zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Die im Rahmen dieser Arbeit gewählte additive Verknüpfung von zeitlichem und kapazitivem Nutzungsgrad führt dabei stets zu höheren Werten als die in der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 gewählte multiplikative Verknüpfung [VDI 2016c, S. 10].¹²² Da die Abweichung nicht auf einen Fehler zurückzuführen ist, sondern auf einen methodischen Unterschied, ist die Gültigkeit des Bewertungsmodells nicht eingeschränkt.

In gleicher Weise werden weitere Systemkonfigurationen hinsichtlich der Erklärbarkeit von Bewertungsergebnissen untersucht, z. B. in Anlehnung an die im Tabellenblatt „Beispiele“ (vgl. Abschnitt 6.6.2.7) hinterlegten Praxisbeispiele der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 1 [VDI 2016b, S. 8 ff.]. Die Überprüfung der Berechnungen und Ergebnisse erfolgt anhand von Teilmodellen und ausgewählten Kombinationen von Gestaltungsmöglichkeiten, wobei sichergestellt ist, dass jedes Merkmal zumindest einmal enthalten ist.

Mittels der Sensitivitätsanalyse lassen sich Wirkungszusammenhänge zwischen Ein- und Ausgabeparametern bestimmen [RABE ET AL. 2008, S. 102 f.]. Da die Anwendung der Sensitivitätsanalyse Teil des Analysemodells ist, wird an dieser Stelle auf dessen V&V verwiesen (vgl. Abschnitt 7.7). Trotzdem sind an dieser Stelle zumindest die Wirkungsrichtungen zu überprüfen (qualitative Sensitivitätsanalyse [SARGENT 2007, S. 128]) und sogenannte Grenzwerttests [RABE ET AL. 2008, S. 100 f.] durchzuführen, um das allgemeine Modellverhalten beurteilen zu können. Dabei werden die Eingabeparameterwerte so gewählt, dass bestimmte Kennzahlenwerte bzw. deren Veränderungen vorhersagbar sind.

Beispielsweise lässt die Verkürzung des Tourenstartabstands für das Anwendungsbeispiel eine Erhöhung des zeitlichen Nutzungsgrades des Routenzugs erwarten, weil mehr Touren pro Zeiteinheit absolviert werden müssen. Auf der anderen Seite sollte dadurch der kapazitive Nutzungsgrad abnehmen, weil pro Tour weniger Ladungsträger zu transportieren sind (vgl. Abschnitt 6.7). Für den Grenzwert des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands*, der im Beispiel 14 min entspricht ($= t_{TA,min}$), sollte der Routenzug zeitlich nahezu voll ausgelastet sein und die Wartezeit annähernd Null betragen.¹²³ Die weitere Verkürzung des Tourenstartabstands auf 13,5 min lässt erwarten, dass der Transportbedarf nur mit zwei Routenzügen gedeckt werden kann, deren zeitlicher Nutzungsgrad dann jeweils knapp über 50 % liegen sollte. Zudem

¹²² Bei der Interpretation des Gesamtnutzungsgrades ist zu beachten, dass lediglich Werte miteinander vergleichbar sind, die nach der gleichen Berechnungslogik erfasst wurden.

¹²³ Aufgrund der iterativen Berechnung des mindestens erforderlichen Tourenstartabstands in Schritten à 30 s sind Abweichungen der Zielwerte zu erwarten.

müssten in diesem Fall die Investitionskosten für Transportmittel sowie die Betriebskosten höher sein.

Die Überprüfung anhand des Modells führt zu den in der Tab. 44 gegenübergestellten Kennzahlenwerten und zu dem Ergebnis, dass das Modellverhalten in diesem Fall als erwartungskonform bezeichnet werden kann. In gleicher Weise werden weitere Grenzwerttests mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen durchgeführt. Die Untersuchung ausgewählter Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen lässt den Schluss zu, dass das Modellverhalten erklärbar ist und das Bewertungsmodell damit geeignet ist, um das reale Systemverhalten abzubilden.

Abschließend ist zu beurteilen, ob das Modell grundsätzlich für die Bewertung von Routenzugsystemen geeignet ist. Dies ist bereits durch die hierarchische Modellbildung und die zielorientierte Entwicklung des Kennzahlensystems auf Basis des Zielsystems unter Berücksichtigung der Anforderungen gewährleistet (vgl. Abschnitte 6.1 bis 6.3). Das Excel-Tool bietet durch die Berücksichtigung der Gestaltungsmöglichkeiten und Dimensionierungsansätze für Routenzugsysteme die Möglichkeit eine Vielzahl geplanter bzw. bestehender Routenzugsysteme mittels Kennzahlen zu bewerten, wobei der Anwender die für den Einsatzzweck relevanten Kennzahlen individuell auswählen kann. Das Bewertungsmodell ist somit validiert und für die Bewertung von Routenzugsystemen sowie den Einsatz im Rahmen des Analysemodells geeignet.

Tab. 44: Verifikation des Bewertungsmodells durch beispielhaften Grenzwerttest (*realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand*)

Abk.	Kennzahl	Einheit	Wert mit $t_{TA} = 14 \text{ min}$	Wert mit $t_{TA} = 13,5 \text{ min}$	Wirkung	Erklärung
L-Z-4	Zykluszeit	[s]	825	820	↓	Anzahl Halte- und Entladevorgänge reduziert
L-Z-5	Wartezeit	[s]	15	800	↑	Tourenstart je Routenzug erst nach 27 min
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	98,2	50,6	↓	Zwei Routenzüge erforderlich
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1	2	↑	Zykluszeit > Tourenstartabstand
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	17.000	34.000	↑	Investition für zweiten Routenzug erforderlich
W-B-1	Betriebskosten	[€]	162.200	170.237	↑	Umlage zusätzlicher Investitionskosten

Legende: ↑ Wert steigt
 ↓ Wert sinkt

7 Analysemodell

7.1 Modellbildung und -struktur

Das Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Modells, das die Analyse des im Bewertungsmodell abgebildeten Routenzugsystems dahingehend ermöglicht, „dass aufgezeigt wird, wie sich die Variation von Eingabeparameterwerten auf die Zielgrößen auswirkt und welche Eingabeparameter für die Optimierung relevant sind“ (vgl. Abschnitt 4.1). Die Herausforderung bei der Modellbildung besteht darin, die Abhängigkeit der Struktur sowohl vom Bewertungsmodell als auch vom Verwendungszweck der Analyseergebnisse von Beginn an zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass bereits bei der Modellbildung darauf zu achten ist, dass das Bewertungsmodell integriert wird und „die Identifizierung von vielversprechenden Optimierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung individueller Ziele“ (vgl. Abschnitt 4.1) möglich ist. Damit wird die Erfüllung der im Abschnitt 4.3 gestellten Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Vollständigkeit* und *Allgemeingültigkeit* des Modells sichergestellt.

Die Struktur sowie der Abstraktionsgrad des Analysemodells sind auf Systemebene (Elemente und Prozesse) aufgrund der Integration des Bewertungsmodells weitestgehend bestimmt und folgen der hierarchischen Modellbildung gemäß Abschnitt 6.1. Auf einer höheren Modellebene betrachtet, ist das Bewertungsmodell als Teil des Analysemodells zu verstehen. Es dient einerseits als Datenbasis für die Sensitivitätsanalyse (Ist-Zustand) und andererseits als Berechnungsinstrument (Kennzahlenberchnung). Zu beachten ist, dass dadurch der Abstraktionsgrad im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bereits definiert ist. Auf Basis der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse erfolgt die Auswertung mittels der Parameter- und Wirkungsanalyse (vgl. Abb. 55).

7.2 Identifizierung von Wirkungen

7.2.1 Grundlagen

7.2.1.1 Wirkungsbegriff

In der Literatur wird der Begriff Wirkung¹²⁴ in Abhängigkeit von der Wissenschaftsdisziplin und dem Verwendungszweck unterschiedlich definiert [VESTER 2002, S. 226; GRIENITZ, SCHMIDT 2010, S. 2; KOPPENLEITNER ET AL. 2012, S. 19; ROZMAN ET AL. 2014, S. 99 ff.]. Im Rahmen dieser Arbeit ist unter Wirkung die Veränderung einer Ausgangsgröße eines Modells bei Veränderung einer Eingangsgröße zu verstehen. Damit wird eine 1:1-Beziehung zwischen Eingabeparameter- und Kennzahlwert des Bewertungsmodells unterstellt. In engem Zusammenhang dazu stehen Wechselwirkungen, die Beziehungen zwischen mehreren Eingangs-, Be-

¹²⁴ Synonym verwandter Begriff: Einfluss [VESTER 2002, S. 226].

7 Analysemodell

rechnungs- und Ausgangsgrößen bezeichnen, sodass die Wirkung nicht nur von einer Eingangsgröße, sondern auch von mehreren Eingangsgrößen abhängt [VESTER 2002, S. 226; SIEBERTZ ET AL. 2010, S. 15].

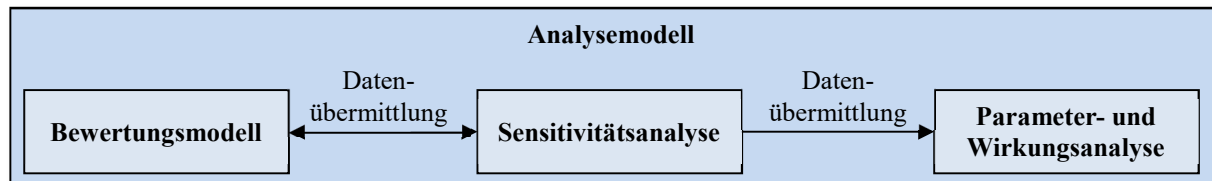


Abb. 55: Struktur und Zusammenhang der Teilmodelle des Analysemodells

Die Abb. 56 verdeutlicht beispielhaft die Wechselwirkungen in einem Routenzugsystem, die es im Rahmen der Analyse zu berücksichtigen gilt. Beispielsweise wirkt die technische Gestaltung (z. B. Anhängertechnik) über die Anschaffungskosten direkt auf die Investitions- und Betriebskosten. Demgegenüber werden allerdings auch die notwendigen Prozessschritte und -zeiten durch die Anhängertechnik beeinflusst, sodass über den Ressourcenbedarf eine indirekte Wirkung auf Investitions- und Betriebskosten vorliegt.

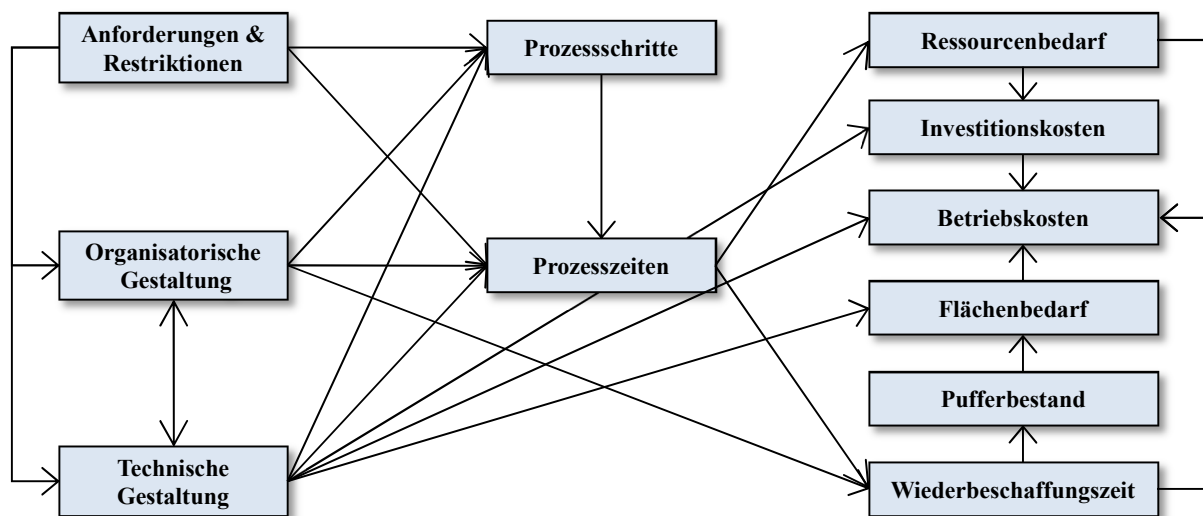


Abb. 56: Beispielhafte Darstellung von Wechselwirkungen in Routenzugsystemen in Anlehnung an GÜNTNER und KEUNTJE [GÜNTNER, KEUNTJE 2016, S. 15]

Unter Berücksichtigung der zahlreichen Systemkonfigurationen, Eingabeparameter und Kennzahlen (vgl. Abschnitt 6.8) wird ersichtlich, dass die Wirkungszusammenhänge in Routenzugsystemen mitunter sehr komplex und in der Regel nicht allgemeingültig quantifizierbar sind. Das erklärt u. a. die in der Literatur zu findenden divergierenden Angaben zur Bedeutung von Einflussfaktoren in Routenzugsystemen [MARTINI ET AL. 2015, S. 65]. Im Rahmen der Analyse ist daher ein individuelles Wirkmodell zu entwickeln, das die Identifizierung (und anschließende Quantifizierung und Darstellung) von Wirkungen unterstützt und Wechselwirkungen berücksichtigt.

7.2.1.2 Anforderungen an ein Wirkmodell

Die Anforderungen an ein Wirkmodell lassen sich aufgrund unterschiedlichster Verwendungszwecke (vgl. Abschnitt 7.2.1.1) sinnvollerweise aus den allgemeinen Anforderungen an Modelle (vgl. Abschnitt 4.3) sowie der mit der Analyse verfolgten Zielsetzung auf Basis des Bewertungsmodells ableiten (vgl. Tab. 45).

Tab. 45: Anforderungen an ein Wirkmodell

Zielorientierung	Ein Wirkmodell soll Aussagen über die Wirkungen von Eingabeparameterwertveränderungen auf Kennzahlenwerte ermöglichen und die Identifizierung relevanter Einflussfaktoren auf Basis des Bewertungsmodells unterstützen.
Vollständigkeit	Ein Wirkmodell soll alle relevanten Eingabeparameter und Kennzahlen des Bewertungsmodells berücksichtigen.
Allgemeingültigkeit	Ein Wirkmodell soll hinsichtlich der Vorgehensweise unabhängig von der Systemkonfiguration sein.
Richtigkeit	Ein Wirkmodell soll die Wirkungszusammenhänge in Routenzugsystemen in Abhängigkeit der Systemkonfiguration wirklichkeitsnah wiedergeben.
Objektivität	Die Analyseergebnisse sollen eindeutig und reproduzierbar sein.
Einfachheit	Ein Wirkmodell soll übersichtlich sein und eine effiziente Durchführung der Analysen ermöglichen.
Genauigkeit	Ein Wirkmodell soll eine angemessene Skalierung der Parameterwerte und aussagekräftige Analyseergebnisse aufweisen.
Nachvollziehbarkeit	Die Berechnungen von Wirkungen sollen nachvollziehbar und verständlich sein. Die Beziehungen zwischen den Systembestandteilen sollen ersichtlich und erklärbar sein.
Änderbarkeit	Ein Wirkmodell soll an geänderte Randbedingungen und Zielsetzungen flexibel anpassbar und erweiterbar sein.

7.2.1.3 Existierende Wirkmodelle

In der Literatur finden sich verschiedene Methoden der Systemanalyse, die auf Wirkmodellen im Sinne dieser Arbeit aufbauen [CRGRAPH 2012, S. 1]. Prinzipiell lassen sich diese Wirkmodelle hinsichtlich der Art der verarbeiteten Informationen (qualitativ oder quantitativ), der Darstellungsform (grafisch oder mathematisch) und dem Einsatzzweck (Erklärung oder Entscheidung) unterscheiden [ADAM 1996, S. 81 ff.].

Grafische Modelle dienen in der Regel der qualitativen Darstellung von Wirkungen zum Zweck der Erklärung von Wirkungszusammenhängen [ADAM 1996, S. 86]. Als Beispiele hierfür können das **Ishikawa-Diagramm**, das **Wirkdiagramm** oder das **Kausalmodell** genannt werden [STERMAN 2000, S. 10 ff.; CRGRAPH 2012, S. 2]. Die Abb. 57 zeigt beispielhaft ein Kausalmodell für die Dimensionierungsgrößen eines Routenzugsystems mit Angabe der Wirkrichtungen und dem Wirkungstrend (positive oder negative Beeinflussung). Grafische Modelle dienen in der Regel dazu, die Wirkungszusammenhänge im zu betrachtenden System grundsätzlich zu verstehen, um darauf aufbauend quantitative Modelle herleiten zu können (z. B. im Rahmen von „System Dynamics“) [STERMAN 2000, S. 41 f.; SPICAR 2013; DOMBROWSKI ET AL.

2014; ROZMAN ET AL. 2014]. Nachteile von grafischen Modellen sind, dass sie bei komplexen Systemen mit umfangreichen Wirkungen und Wechselwirkungen unübersichtlich sind und bei Änderungen (z. B. hinsichtlich der Systemstruktur) neu erstellt werden müssen. Hinzu kommt, dass grafische Modelle nicht die Identifizierung und Quantifizierung von Wirkungen ermöglichen, sondern lediglich deren Darstellung [ADAM 1996, S. 86]. Damit widersprechen grafische Modelle insbesondere den Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Einfachheit* und *Änderbarkeit*.

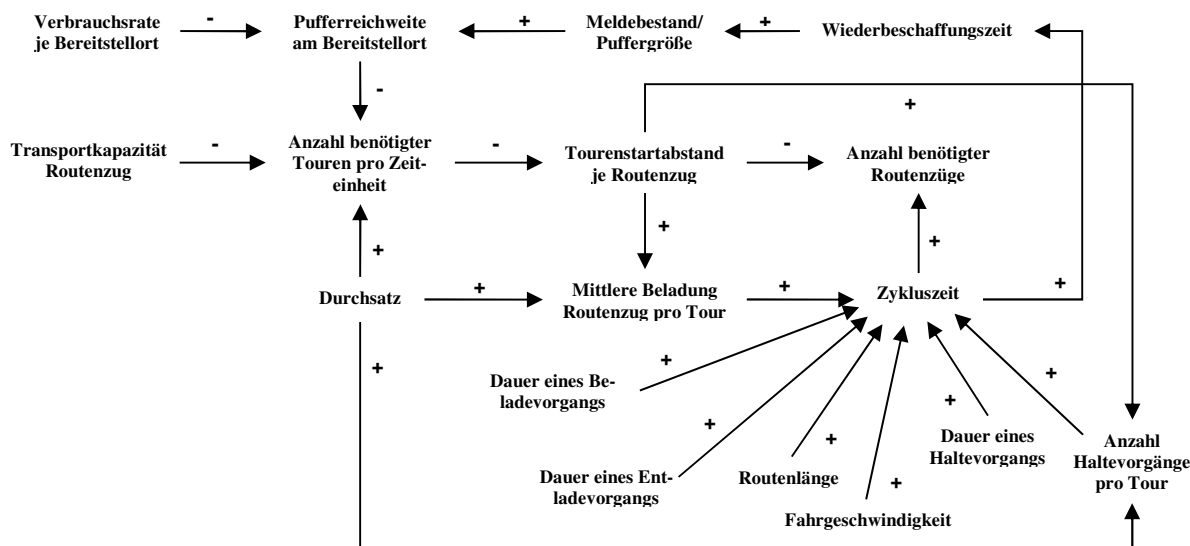


Abb. 57: Beispielhaftes Kausalmmodell für Routenzugsysteme (Ausschnitt)

Mathematische Modelle dienen der Quantifizierung von Wirkungen zum Zweck der Erklärung von Wirkungszusammenhängen und/oder der Vorbereitung von Entscheidungen [ADAM 1996, S. 86]. Als Beispiele hierfür können die Einflussanalyse, die statistische Versuchsplanung oder die Sensitivitätsanalyse genannt werden.

Die **Einflussanalyse** nutzt in der Regel die von DUPPERIN und GODET entwickelte Einflussmatrix als Instrument zur Erfassung von Wirkungszusammenhängen in Systemen, wobei die Anwendungsfelder vielfältig sind [DUPPERIN, GODET 1975; GAUSEMEIER ET AL. 2009; GRIENITZ, SCHMIDT 2011; KOPPE 2012]. In einer Einflussmatrix werden zeilen- und spaltenweise die zu betrachtenden Systembestandteile aufgetragen und deren gegenseitiger Einfluss aufeinander durch Eintragung von Punktwerten in den Kreuzungspunkten der Matrix angegeben. Anhand von Zeilen- und Spaltensumme können anschließend Einflussstärken und Wirkungszusammenhänge identifiziert werden [VESTER 2002, S. 226 ff.; BALAZOVA 2004, S. 85 ff.].

Der Vorteil der Einflussanalyse liegt in der Einfachheit der Berechnungen und deren Automatisierbarkeit durch entsprechende Software [VESTER 2002, S. 226 ff.; GAUSEMEIER ET AL. 2009, S. 69]. Ein Nachteil ist, dass die Bewertung der Einflüsse bei vielen Einflussfaktoren sehr aufwändig ist. Zudem unterliegen die Bewertungen subjektiven oder stochastischen Einflüssen, da sie beispielsweise auf Expertenbefragungen oder Umfeldanalysen basieren [GAUSEMEIER ET

AL. 2009, S. 66]. Dies hat zur Folge, dass unter Umständen inkonsistente Bewertungen durchgeführt werden, sodass die Einflussmatrix insbesondere den Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Allgemeingültigkeit*, *Richtigkeit* und *Objektivität* nicht gerecht wird.

Die **Netzwerkanalyse** dient der Erfassung und Analyse von Beziehungen in einem System, wobei oftmals soziale Netzwerke (z. B. Organisationen) betrachtet werden [HOLZER 2009, S. 668]. Die Netzwerkanalyse bzw. die angewandten Verfahren ähneln sehr stark der Einflussanalyse, wobei die Systembestandteile durch Personen oder Gruppen repräsentiert werden und deren Einflüsse untereinander analysiert werden. Da die Nachteile denen der Einflussanalyse gleichen, ist die Adaption der Methode im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit nicht zweckmäßig.¹²⁵

Die **statistische Versuchsplanung** (engl.: Design of Experiments (DoE)) dient der Identifizierung und Quantifizierung von Wirkungszusammenhängen in Systemen durch Experimente oder Computersimulationen [GEIGER, KOTTE 2008, S. 457; SIEBERTZ ET AL. 2010, S. 1]. Der Grundgedanke besteht darin, systematische Versuchspläne mit jeweils mehreren variierten Eingangsgrößen durchzuführen, um deren Wirkungen auf Zielgrößen zu identifizieren, ohne jede mögliche Systemkonfiguration einzeln testen zu müssen [HOFMANN 2011, S. 10]. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt anschließend durch den Einsatz statistischer Analysemethoden (z. B. Regressions- und Varianzanalyse) [GEIGER, KOTTE 2008, S. 458].

Der Vorteil der statistischen Versuchsplanung ist die universelle Einsetzbarkeit und der geringe Umsetzungsaufwand bei der Verwendung spezieller Software [SIEBERTZ ET AL. 2010, S. 1 f.]. Demgegenüber steht der Nachteil, dass die Umsetzung und Auswertung ohne entsprechende Software mit erheblichem Aufwand verbunden sind. Zudem sind für die Interpretation der Ergebnisse zumindest Grundkenntnisse über die Methode an sich sowie die Analysemethoden erforderlich [SIEBERTZ ET AL. 2010, S. 57 ff.]. Die statistische Versuchsplanung ist für die Analyse von Routenzugsystemen mittels des Bewertungsmodells geeignet, vor dem Hintergrund der Anforderungen nach *Einfachheit* und *Nachvollziehbarkeit* ist sie allerdings unzureichend.

Die **Sensitivitätsanalyse** dient der Identifizierung und Quantifizierung von Wirkungen in bereits mathematisch formulierten Modellen [HORVÁTH 2009, S. 465]. Sie wird üblicherweise eingesetzt, um Aussagen über die Robustheit von Planungsergebnissen (z. B. Investitionsrechnung) gegenüber Schwankungen von Eingabeparameterwerten zu gewinnen [WÖHE, DÖRING 2013, S. 511]. Dies geschieht durch Veränderungen einer oder mehrerer Eingabeparameterwerte des Modells und die Bestimmung der Wirkungen auf Zielgrößen [DOMSCHKE, SCHOLL 2005, S. 259]. Mögliche Zielsetzungen sind die Bestimmung von Grenzen, in denen die Eingabeparameterwerte schwanken können, ohne dass sich das ermittelte Ergebnis ändert oder die Bestimmung der Relevanz von Einflussfaktoren [WÖHE, DÖRING 2013, S. 511; ADAM 1996, S. 55].

¹²⁵ Eine Beschreibung der Grundlagen der Netzwerkanalyse und beispielhafte Anwendungen finden sich u. a. in [JANSEN 1999; HOLZER 2009; VITALI ET AL. 2011; BATTISTON ET AL. 2012].

Die Anwendung der Sensitivitätsanalyse erfordert ein bereits existierendes mathematisches Modell, stellt an dieses allerdings keine speziellen Anforderungen hinsichtlich der Struktur, sodass das Verfahren universell einsetzbar ist. Die Einfachheit und Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise und Ergebnisinterpretation erklärt zudem die häufige Verbreitung (vgl. Abschnitt 3.3). Die Sensitivitätsanalyse entspricht den gestellten Anforderungen an ein Wirkmodell und ist somit für die Identifizierung und Quantifizierung von Wirkungen zweckmäßig. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass das Verfahren an sich kein Entscheidungskriterium zur Verfügung stellt [HORVÁTH 2009, S. 465], weshalb die Ergebnisse entsprechend zu interpretieren sind (vgl. Abschnitt 7.4.2).

7.2.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient in dieser Arbeit zur systematischen Identifizierung der Wirkungen von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf Kennzahlenwerte im Rahmen des Bewertungsmodells. Dies soll die Bestimmung potentieller Stellgrößen für die zielorientierte Optimierung von Routenzugsystemen ermöglichen (vgl. Abschnitt 8.2). Voraussetzung dafür ist, dass bereits bei der Sensitivitätsanalyse die allgemeinen Anforderungen an das Wirkmodell (vgl. Abschnitt 7.2.1.2) sowie die Anforderungen an die Quantifizierung und Darstellung von Wirkungen (vgl. Abschnitt 7.2.2.4 und 7.4) berücksichtigt werden.

Der methodische Ansatz im Analysemodell ist zielgerichtet und geht von den Kennzahlen des Bewertungsmodells als mögliche Zielgrößen des Anwenders aus (vgl. Abschnitt 7.2.2.1). Der Vorteil dabei ist, dass auch nicht erwartete Wirkungen identifiziert werden und das Ergebnis unabhängig von den Präferenzen des Anwenders ist. Nachteilig hingegen ist, dass eine vollständige Sensitivitätsanalyse durch die große Anzahl der Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen (vgl. Abschnitte 6.3.2.2 und 6.8) sowohl rechenintensiv ist als auch die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Aus diesem Grund wird die Anzahl der zu betrachtenden Eingabeparameter reduziert (vgl. Abschnitt 7.2.2.2). Die Variation der Eingabeparameterwerte erfolgt zudem „*ceteris paribus*“ („unter sonst gleichen Bedingungen“), weil dadurch die Änderungen der Kennzahlenwerte auf die Variation lediglich eines Eingabeparameterwerts zurückzuführen sind (Ursache-Wirkungs-Zusammenhang) [MARTINI ET AL. 2015, S. 66]. Bei gleichzeitiger Variation mehrerer Eingabeparameterwerte kann es vorkommen, dass sich deren Wirkungen verstärken oder aufheben, wodurch Wirkungen fehlerhaft interpretiert oder überhaupt nicht identifiziert werden können [RABE ET AL. 2008, S. 103].

7.2.2.1 Bestimmung relevanter Kennzahlen

Das Bewertungsergebnis des Anwendungsbeispiels macht deutlich, dass sowohl die Güte des Routenzugsystems als auch die Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen von der individuellen Zielsetzung des Betrachters abhängen (vgl. Abschnitt 6.7). Die individuelle Zielvorstellung sollte sich daher auch in der Sensitivitätsanalyse widerspiegeln. In Anbetracht der Anforderun-

gen an das Wirkmodell würde die Eingrenzung der Anzahl der Kennzahlen zudem der *Zielorientierung* und *Vollständigkeit* widersprechen (vgl. Abschnitt 7.2.1.2). Aus diesem Grund werden alle Kennzahlen des Bewertungsmodells als relevant erachtet und entsprechend der bekannten Struktur in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.6.2.3).¹²⁶

7.2.2.2 Bestimmung relevanter Eingangsgrößen

Die Sensitivitätsanalyse basiert auf mathematischen Modellen und variiert Eingabeparameterwerte in bestimmten Wertebereichen (vgl. Abschnitt 7.2.1.3). Die technischen und organisatorischen Gestaltungsmöglichkeiten des Bewertungsmodells sind allerdings nominal skaliert¹²⁷ und stehen in der Regel mit mehreren Eingabeparametern in Bezug (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Die Änderung einer Merkmalsausprägung ruft folglich mehr als eine Parameterwertveränderung hervor, was wiederum dem „ceteris paribus“-Prinzip widerspricht (vgl. Abschnitt 7.2.2). Die Berücksichtigung der Gestaltungsmöglichkeiten im Zuge der Sensitivitätsanalyse ist daher nicht zielführend. Da ohnehin nur die Wirkungen für eine vorgegebene Systemkonfiguration identifiziert werden sollen, ist diese Eingrenzung akzeptabel.

Die Anzahl der zu variierenden Parameterwerte im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bestimmt maßgeblich deren Durchführungszeit.¹²⁸ Aus diesem Grund sind die bis zu 134 Eingabeparameter des Bewertungsmodells (vgl. Abschnitt 6.5) hinsichtlich ihrer Relevanz zu beurteilen. So ist beispielsweise das Merkmal *Anzahl der Bereitstellorte* lediglich für die gleichnamige Strukturkennzahl von Bedeutung, beeinflusst aber andere Kennzahlen nicht. Die Variation dieses Eingabeparameterwerts ist daher nicht erforderlich.

Die Variation des *Durchsatzes* für jeden einzelnen Haltepunkt ist aufwendig und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Anteil des Haltepunktdurchsatzes am Routendurchsatz in der Regel gering ist, nicht zweckmäßig. Vor dem Hintergrund der prozentualen Variation der Eingabeparameterwerte in Abhängigkeit von den ursprünglichen Werten (vgl. Abschnitt 7.2.2.3), bietet es sich an, alle Haltepunktdurchsätze gleichzeitig zu variieren. Dies widerspricht zwar dem „ceteris paribus“-Prinzip, ist aber in diesem Fall vertretbar, weil einerseits die Beziehungen zu anderen Modellgrößen identisch sind und andererseits die Haltepunktdurchsätze innerhalb des Bewertungsmodells ohnehin aggregiert werden.

¹²⁶ Der Berechnungsaufwand im Excel-Tool ist nahezu unabhängig von der Anzahl der Kennzahlen, da im Rahmen des Bewertungsmodells ohnehin stets alle Kennzahlen berechnet werden. Lediglich die Zuweisung von Zellwerten benötigt geringfügig mehr Zeit, wenn die Anzahl der Kennzahlen erhöht wird. Daher wäre die Eingrenzung der Anzahl der Kennzahlen mit Blick auf den Berechnungsaufwand unzweckmäßig.

¹²⁷ Nominal skalierte Werte können klassifiziert und in Bezug auf Gleichheit oder Ungleichheit überprüft werden. Rechenoperationen sind hingegen nicht zulässig [ZIMMERMANN, GUTSCHE 1991, S. 11].

¹²⁸ Das liegt daran, dass jede Parameterwertvariation eine neue Systemkonfiguration erzeugt, die entsprechend bewertet werden muss. Die Anzahl der Berechnungsläufe im Excel-Tool ist somit proportional zur Anzahl der Eingabeparameter. Daher ist die Eingrenzung der Anzahl der Eingabeparameter mit Blick auf den Berechnungsaufwand zweckmäßig.

In Bezug auf die weiteren Systemelemente werden die *Abschreibungsdauer*, der *Wartungs- und Reparaturfaktor* und die *Leergewichte von Transportmitteln* von der Sensitivitätsanalyse ausgenommen, weil sie in der Regel nicht oder nur bedingt beeinflussbar sind und bezogen auf die beiden erstgenannten Parameter nur ein geringer Einfluss auf die Betriebskosten als übergeordnete Kennzahl zu erwarten ist. Zudem ist die Variation von *mittlerer Pufferkapazität je Bereitstellort* und *mittlerer Belegung je Puffer* nicht zweckmäßig, weil sie ausschließlich in die gleichnamigen Kennzahlen sowie den *kapazitiven Nutzungsgrad des Puffers* eingehen.

Hinsichtlich der Systemprozesse wird lediglich die *Dauer eines Vorgangs* variiert, da die jeweilige *Anzahl der Vorgänge* zu den Berechnungsgrößen im Rahmen der Dimensionierung zählt und die Berechnung automatisch in Abhängigkeit der Systemkonfiguration erfolgt (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Ebenso ist die Variation des *geplanten kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs* ausgeschlossen, weil er aus dem *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstand* berechnet wird.

Bei den weiteren Eingabeparametern bleiben die Kategorien „Arbeitszeit“ und „Qualitätsdaten“ unberücksichtigt. Während das Arbeitszeitmodell in der Regel nicht bzw. nur bedingt beeinflussbar ist, sind die Qualitätsdaten im Zuge der Analyse von geringer Bedeutung, da sie ausschließlich direkt in die entsprechenden Qualitätskennzahlen eingehen und somit keine Wechselwirkungen mit anderen Berechnungsgrößen oder Kennzahlen aufweisen.

In der Kategorie „Ergonomie“ können die nominal skalierten Merkmale (z. B. *UHT - einhändig/zweihändig* oder *Kriterium - Anzahl Vorgänge (Umsetzen)*) aus den zuvor genannten Gründen nicht berücksichtigt werden. Die verbleibenden Merkmale *Körperhaltung*, *Ausführungsbedingungen* und *Positioniergenauigkeit* gehen ausschließlich in die Berechnung des Ergonomiepunktwerts ein und können vor dem Hintergrund der prozentualen Variation der Eingabeparameterwerte in Abhängigkeit von den ursprünglichen Werten (vgl. Abschnitt 7.2.2.3) zusammengefasst werden. Dies geschieht separat für Be- und Entladevorgänge. Die Tab. 46 listet die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berücksichtigten Eingabeparameter entsprechend ihrer Nummerierung im Excel-Tool auf.

7.2.2.3 Bestimmung von Wertebereichen

Die Bestimmung der Wertebereiche, in denen die Eingabeparameterwerte variiert werden, kann entweder durch Festlegung der Grenzwerte auf Basis absoluter Veränderungen je Eingabeparameter oder auf Basis prozentualer Veränderungen aller Parameter erfolgen.

Tab. 46: Betrachtete Eingabeparameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Nr.	Eingabeparameter	Einheit
Systemelemente		
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	[kg]
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	[m]
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	[m]
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	[1/h]
5	Routenlänge	[m]
6	Durchsatz	[LT/h]
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	[€]
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	[LT]
9	Länge Fahrzeug	[m]
10	Fahrgeschwindigkeit	[m/s]
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	[€]
12	Energieverbrauch Fahrzeug	[kg/h]
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	[Stk]
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	[m]
15	Transportkapazität pro Anhänger	[LT]
16	Investitionskosten je Anhänger	[€]
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	[Stk]
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	[LT]
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	[€]
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	[€]
21	Anzahl Beladetechnik	[Stk]
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	[€]
23	Anzahl Entladetechnik	[Stk]
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	[€]
25	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	[€]
27	Anzahl Informationstechnik	[Stk]
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	[€]
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	[€]
Systemprozesse		
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	[s]
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	[s]
32	Zeitzuschlag	[s]
33	Dauer eines Haltevorgangs	[s]
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	[s]
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	[s]
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	[min]
Weitere Eingabeparameter		
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	[min]
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	[%]
39	Summe sonstiger Investitionen	[€]
40	Summe sonstiger Abschreibungen	[€/Jahr]
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]
42	Summe Lizenzkosten	[€/Jahr]
43	Summe Bestandskosten	[€/Jahr]
44	Summe Flächenkosten	[€/Jahr]
45	Summe sonstiger Energiekosten	[€/Jahr]
46	Ergonomie Beladevorgänge	[-]
47	Ergonomie Entladevorgänge	[-]

7 Analysemodell

Die Festlegung der Grenzwerte auf Basis absoluter Veränderungen je Eingabeparameter hat den Vorteil, dass die Sensitivitätsanalyse an die individuellen Gegebenheiten angepasst werden kann. Beispielsweise kann bei der Festlegung des oberen Grenzwerts für die *Fahrgeschwindigkeit* eine Unternehmensvorgabe hinsichtlich der maximalen Fahrgeschwindigkeit im Produktionsbereich berücksichtigt werden, sodass lediglich realisierbare Werte verwendet werden. Diese Vorgehensweise hat die Nachteile, dass einerseits relevante Stellgrößen für Optimierungen womöglich nicht erkennbar sind und andererseits der Aufwand für die Bestimmung individueller Grenzwerte sehr hoch ist (insbesondere für Mehrrountensysteme).

Die Festlegung der Grenzwerte auf Basis prozentualer Veränderungen aller Eingabeparameter hat den Vorteil, dass der Aufwand sehr gering ist, weil der Prozentsatz der Veränderung einmalig und einheitenunabhängig bestimmt wird. Zudem werden alle Eingabeparameter in gleichem Maße berücksichtigt, sodass alle relevanten Stellgrößen für Optimierungen (im Rahmen des Modells) erkennbar sind. Ein Nachteil ist, dass der Anwender im Rahmen der Ergebnisinterpretation abschätzen muss, ob die Eingabeparameterwerte realisierbar sind (vgl. Abschnitt 7.6 und 8.2). Diese Vorgehensweise wird im Folgenden verwendet, weil sie im Gegensatz zur Festlegung der Grenzwerte auf Basis absoluter Veränderungen je Eingabeparameter den Anforderungen nach *Vollständigkeit*, *Objektivität* und *Einfachheit* entspricht.

Die Untersuchung der Grenzwerte je Eingabeparameter vernachlässigt, dass sich Parameterwertveränderungen nicht zwangsläufig linear auf Kennzahlenwerte auswirken. Beispielsweise weist die *Anzahl Routenzüge (tatsächlich)* üblicherweise einen sprunghaften Kennzahlenwertverlauf auf, wohingegen für andere Kennzahlen regressiv oder degressiv Kurvenverläufe resultieren können [MARTINI 2016, S. 6 f.]. Die Wirkintensitäten (vgl. Abschnitt 7.3.2) bezüglich der Kennzahlen sind somit abhängig vom Betriebspunkt des Routenzugsystems [MARTINI 2016, S. 6]. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, bietet es sich an, zusätzlich zum Ursprungswert und den Grenzwerten eines Eingabeparameters geeignete Zwischenwerte zu untersuchen. Das hat die Vorteile, dass Kennzahlenwertverläufe detaillierter abgebildet werden sowie die Überprüfung des Wirkungstrends und des Zusammenhangs der Extremwerte von Wirkintensitäten unterstützt wird (vgl. Abschnitt 7.4.1).

Die Festlegung der Grenzwerte erfolgt durch die vom Anwender vorzugebende Spannweite der Eingabeparameterwerte. Diese ist definiert als der Prozentsatz, um den der Ausgangswert im Rahmen der Sensitivitätsanalyse reduziert (unterer Grenzwert) bzw. erhöht wird (oberer Grenzwert). Die Zwischenwerte berechnen sich durch Linearisierung zwischen den Grenzwerten, sodass die Parameterwertveränderung zwischen zwei benachbarten Eingabewerten stets den gleichen Betrag aufweist (vgl. Tab. 47). Bei der Analyse von Mehrrountensystem ist zu beachten, dass die Spannweiten der Eingabeparameterwerte aller Routen gleich groß sein sollten, um die Wirkintensitäten routenübergreifend vergleichbar zu machen (vgl. Abschnitt 7.4.2.2).

Tab. 47: Variation der Fahrgeschwindigkeit für das Anwendungsbeispiel (Spannweite: 50 %)

	<i>Eingabewerte Parameter</i>										<i>Nr. 10</i>
Fahrgeschwindigkeit [%]	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Fahrgeschwindigkeit [m/s]	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,33	2,50

7.2.2.4 Durchführung

Die Bestimmung der relevanten Eingabeparameter und der jeweiligen Wertebereiche führt dazu, dass im Rahmen der Sensitivitätsanalyse je untersuchter Route 470 Systemkonfigurationen¹²⁹ zu betrachten sind. Diese sind nacheinander als Eingabeparameter im Bewertungsmodell einzusetzen und die jeweiligen **systembezogenen** Kennzahlenwerte (Durchschnitt und Summe) zu erfassen (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die routenbezogenen Kennzahlenwerte werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, weil damit einerseits der Erfassungsaufwand reduziert wird und andererseits Fehlinterpretationen im Rahmen der Parameter- und Wirkungsanalyse vermieden werden. Diese Vorgehensweise ist zulässig, weil sich ein Einroutensystem im Excel-Tool als Mehr-routensystem ohne Poolung abbilden lässt. In diesem Fall sind die Kennzahlenwerte der beiden Tabellenblätter identisch (vgl. Abschnitt 6.6.2.4). Bei der Interpretation der Ergebnisse von Parameter- und Wirkungsanalyse ist allerdings zu berücksichtigen, dass mit der Erhöhung der Anzahl der abgebildeten Routen tendenziell eine Verkleinerung der Werte der Wirkintensitäten einhergeht. Das hat zur Folge, dass die Wirkintensitäten ausschließlich relativ zueinander beurteilt werden können.

Die nachfolgende Parameter- und Wirkungsanalyse erfordert die Speicherung der 470 Systemkonfigurationen sowie der zugehörigen Kennzahlenwerte, um alle Wirkungen im Nachhinein berechnen und darstellen zu können. Dies bedeutet, dass insgesamt 93.060 Kennzahlenwerte¹³⁰ zu speichern sind. Aufgrund des Umfangs wird an dieser Stelle auf die vollständige Darstellung verzichtet und auf die Umsetzung der Sensitivitätsanalyse im Excel-Tool verwiesen (vgl. Abschnitt 7.5.1 bzw. Datei „2_Routenzug-Tool Beispiel“ im Datenanhang).

7.3 Quantifizierung von Wirkungen

7.3.1 Grundlagen

In quantitativen Wirkmodellen stellt sich prinzipiell die Frage, wie stark eine Eingangsgrößenveränderung auf eine Ausgangsgröße wirkt. Da der Sensitivitätsanalyse ein quantitatives Bewertungsmodell zugrunde liegt, können die Wirkungen direkt anhand der ermittelten Kennzahlenwerte berechnet werden. Die Berechnung kann dabei durch einfache Differenzbildung der Kennzahlenwerte vor und nach der Variation der Eingabeparameterwerte erfolgen, wobei das

¹²⁹ 47 Eingabeparameter mit jeweils zehn variierten Werten (ohne Ausgangszustand).

¹³⁰ 470 Systemkonfigurationen mit jeweils 2 x 99 Kennzahlenwerten (Durchschnitt und Summe).

Ergebnis der absoluten Wirkung, gemessen in der Einheit der jeweils betrachteten Kennzahl, entspricht. Diese Vorgehensweise hat den entscheidenden Nachteil, dass die Wirkungen bei Kennzahlen mit unterschiedlichen Einheiten (z. B. Betriebskosten und Ergonomiepunktwert) nicht direkt miteinander vergleichbar und somit schwer interpretierbar sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Wirkungen im Rahmen der Analyse in geeigneter Weise zu normieren.

Die Normierung von Werten mit unterschiedlichen Einheiten erfolgt üblicherweise durch Transformation auf eine einheitliche Skala z. B. durch die Vergabe von Punktwerten [VDI 1998, S. 4]. Daraus resultiert allerdings ein verhältnismäßig großer Aufwand und subjektiver Einfluss, da jedem einzelnen Kennzahlwert ein entsprechender Punktwert zugeordnet werden muss. Stattdessen bietet sich die Berücksichtigung der prozentualen Änderung eines Kennzahlwerts an, weil dadurch die ursprüngliche Einheit der Kennzahl eliminiert wird. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit, Wirkintensitäten kennzahlenunabhängig und automatisch berechnen zu können (vgl. Abschnitte 7.3.2 und 7.5).

7.3.2 Berechnung von Wirkintensitäten

Unter Wirkintensität ist die prozentuale Änderung eines Kennzahlwerts, bezogen auf den ursprünglichen Wert, bei der Variation eines Eingabeparameterwerts zu verstehen. Die Wirkintensität berechnet sich nach der Formel (5).

$$WI_{K,Parameter} = \frac{KZW_{Parameter, variiert} - KZW_{Parameter, 100\%}}{KZW_{Parameter, 100\%}} \quad (5)$$

mit K = Index der Kennzahl
 KZW = Kennzahlwert
 WI = Wirkintensität

Die Tab. 48 verdeutlicht anhand des Anwendungsbeispiels die resultierenden Wirkintensitäten der Kennzahl *Betriebskosten* bei Variation der *Fahrgeschwindigkeit*. Die Berechnung von Wirkintensitäten ermöglicht zum einen die Quantifizierung von Wirkungen unabhängig von Eingabeparameter- und Kennzahleneinheiten und zum anderen Aussagen über Wirkungstrends und Nichtlinearitäten in Kennzahlwert- und Wirkintensitätverläufen (vgl. Abschnitt 7.4.1). Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Berechnungsweise unabhängig von der Datenbasis (durchschnittliche oder summierte Kennzahlenwerte) ist, was wiederum die Umsetzung im Excel-Tool vereinfacht, weil „lediglich“ 46.530 Werte¹³¹ zu berechnen und zu speichern sind (vgl. Abschnitt 7.5.1).

¹³¹ 470 Systemkonfigurationen mit jeweils 99 Wirkintensitäten.

Tab. 48: Wirkintensitäten der Kennzahl *Betriebskosten* bei Variation der *Fahrgeschwindigkeit* für das Anwendungsbeispiel (Spannweite: 50 %)

		Wirkintensitäten Parameter										Nr. 10
Fahrgeschwindigkeit	[%]	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Betriebskosten	[T€]	132,0	125,7	121,2	117,8	115,2	113,1	111,4	110,0	108,7	107,7	106,8
WI _{Betriebskosten, Fahrgeschwindigkeit}	[%]	16,8	11,2	7,2	4,2	1,9	0,0	-1,5	-2,8	-3,9	-4,8	-5,6

7.4 Darstellung von Wirkungen

Bereits in Abschnitt 7.2.1.3 wurden grafische Modelle für die qualitative Darstellung von Wirkungen beschrieben, wobei diese für die Darstellung von quantitativen Kennzahlwert- und Wirkintensitätenverläufen gemäß der Tab. 48 nicht geeignet sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden individuelle Darstellungsformen verwendet, die der Interpretation der Analyseergebnisse im Sinne der Optimierung dienen.

7.4.1 Parameteranalyse

Die Parameteranalyse dient der Darstellung von Wirkungen **eines Eingabeparameters** auf **eine Kennzahl**, um deren direkten Wirkungszusammenhang zu verdeutlichen. Sie soll somit Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nachvollziehbar machen und beispielsweise die Identifizierung von Wirkungstrends und Nichtlinearitäten unterstützen [MARTINI ET AL. 2015, S. 66]. Als Darstellungsform bieten sich Diagramme an, in denen Kennzahlwerte und Wirkintensitäten über den variierten Eingabeparameterwerten aufgetragen werden. Damit ist zwar die Darstellung von Wechselwirkungen nicht möglich, diese werden aber implizit innerhalb des Bewertungsmodells berücksichtigt. In der Abb. 58 sind die Diagramme für die Kennzahl *Betriebskosten* und den Eingabeparameter *Fahrgeschwindigkeit* entsprechend den Berechnungsergebnissen in der Tab. 48 dargestellt. Es ist erkennbar, dass einerseits die Wirkung der Fahrgeschwindigkeit auf die Betriebskosten mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit abnimmt und andererseits der Zusammenhang zwischen der Änderung des Eingabeparameterwerts und der Änderung des entsprechenden Kennzahlwerts nichtlinear ist, d. h. die Wirkung der *Fahrgeschwindigkeit* auf die *Betriebskosten* ist abhängig vom Betriebspunkt des Routenzugsystems.

In der Sensitivitätsanalyse werden die systembezogenen Kennzahlenwerte (Durchschnitt und Summe) ermittelt. Da die Parameteranalyse absolute Kennzahlwerte berücksichtigt (linkes Diagramm in der Abb. 58), ist darauf zu achten, die geeignete Datenbasis je Kennzahl auszuwählen. Die Beurteilung einer Wirkung auf die Betriebskosten lässt sich beispielsweise anhand der summierten Betriebskosten beurteilen, wohingegen eine Wirkung auf den zeitlichen Nutzungsgrad lediglich anhand dessen Durchschnittswert sinnvoll ist.¹³²

¹³² Bei Routenzugsystemen bestehend aus einer Route ist genau genommen keine Unterscheidung notwendig, weil durchschnittlicher und summierter Kennzahlwert identisch sind.

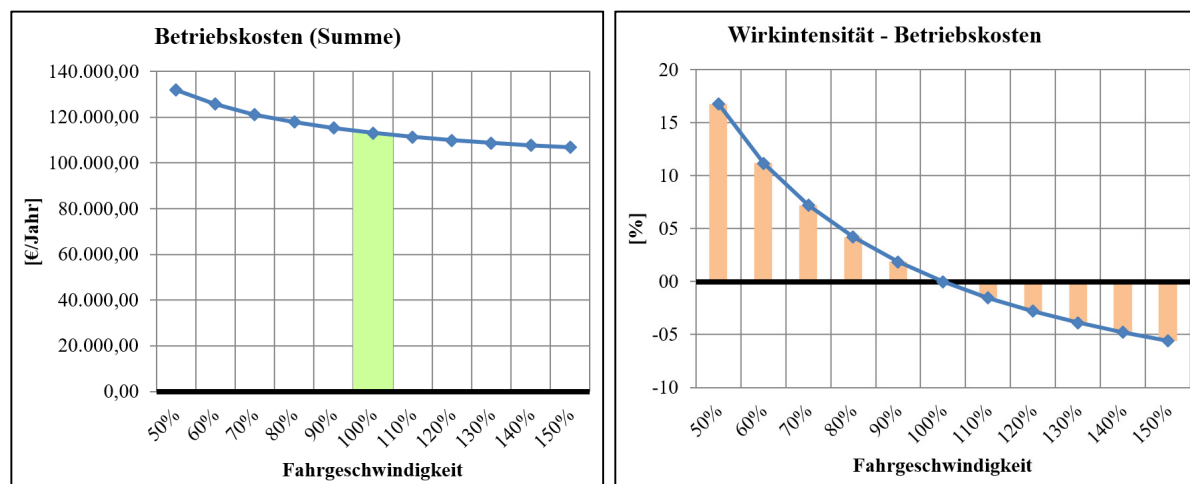


Abb. 58: Beispielhafte Darstellung von Wirkungen im Rahmen der Parameteranalyse (*Fahrgeschwindigkeit* → *Betriebskosten*)

Die Parameteranalyse ermöglicht auf der einen Seite, Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen gezielt darstellen und interpretieren zu können, auf der anderen Seite stellt sie die Basis für die nachfolgende Wirkungsanalyse dar. Innerhalb dieser ist es jedoch nicht zweckmäßig alle Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen manuell hinsichtlich ihrer Wirkintensitätverläufe zu untersuchen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, bereits im Rahmen der Parameteranalyse Angaben über den Wirkungstrend und die Spannweite von Wirkintensitäten auf Basis der Berechnungsergebnisse anzuzeigen.

Der Wirkungstrend gibt an, welche Art des Zusammenhangs zwischen dem Eingabeparameter und der Kennzahl besteht. Es lassen sich folgende Ausprägungen unterscheiden:

- **Positiver Wirkungstrend:** Die Erhöhung/Senkung des Eingabeparameterwerts führt zu einer Erhöhung/Senkung des Kennzahlwerts.
- **Negativer Wirkungstrend:** Die Erhöhung/Senkung des Eingabeparameterwerts führt zu einer Senkung/Erhöhung des Kennzahlwerts.
- **Kein Wirkungstrend:** Es ist kein eindeutiger Wirkungstrend identifizierbar.

Das Verhältnis von negativer zu positiver Spannweite der Wirkintensitäten gibt an, welche Art des Zusammenhangs zwischen den Extremwerten der Wirkintensitäten besteht. Es lassen sich folgende Ausprägungen unterscheiden:

- **Synchrone Spannweite:** Die betragsmäßige Abweichung zwischen dem minimalen und maximalen Wert der Wirkintensitäten ist kleiner als 1 %.¹³³
- **Asynchrone Spannweite:** Die betragsmäßige Abweichung zwischen dem minimalen und maximalen Wert der Wirkintensitäten ist größer als 1 %.

¹³³ Die Überprüfung auf exakte Übereinstimmung der Werte ist nicht sinnvoll, da im Rahmen des Excel-Tools Rundungsabweichungen zu erwarten sind.

Das Beispiel in der Abb. 58 weist demzufolge einen negativen Trend und eine asynchrone Spannweite auf, die auf den nichtlinearen Kurvenverlauf zurückzuführen ist.

7.4.2 Wirkungsanalyse

Die Wirkungsanalyse dient der Darstellung von Wirkungen **aller Eingabeparameter auf mehrere Kennzahlen** mit dem Ziel, die Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Relevanz für die Optimierung zu beurteilen. Die Parameteranalyse ist dafür ungeeignet, weil die Aussagefähigkeit ihrer Ergebnisse dadurch eingeschränkt ist, dass deren relative Einordnung zu anderen Eingabeparametern und Kennzahlen fehlt. Demzufolge müssten für die Beurteilung aller Eingabeparameter bezogen auf nur eine Kennzahl schon 47 Parameteranalysen manuell durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen der Wirkungsanalyse die Erfassung und grafische Darstellung der Wirkintensitäten sowie deren Wirkungstrends und Spannweiten für alle Eingabeparameter gemeinsam. Dabei ist entsprechend der zugrunde gelegten Modellstruktur zwischen der routenbezogenen und der systembezogenen Wirkungsanalyse zu unterscheiden.

7.4.2.1 Routenbezogene Wirkungsanalyse

Die Wirkungsanalyse auf Routenebene lässt sich unterscheiden in die Kategorien *Kennzahl*, *Eingabeparameter* und *Kennzahlenaggregation*, die hinsichtlich der Erfassung und Darstellung von Wirkintensitäten der gleichen Systematik unterliegen, allerdings unterschiedliche Zielstellungen verfolgen.

7.4.2.1.1 Kennzahl

Die Wirkungsanalyse bezogen auf eine Kennzahl dient der Erfassung und Darstellung der Wirkungen **aller Eingabeparameter auf eine Kennzahl**. Zu diesem Zweck werden die Wirkintensitäten aller Eingabeparameter gemäß der Berechnungsweise in Abschnitt 7.3.2 ermittelt und tabellarisch untereinander aufgeführt. Die Tab. 49 verdeutlicht dies anhand der Kennzahl *Betriebskosten* für das Anwendungsbeispiel. Die orange markierten Felder heben diejenigen Systemkonfigurationen hervor, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu Änderungen der Betriebskosten führen (Wirkintensität ungleich Null). Sie kennzeichnen somit diejenigen Eingabeparameter, die in Bezug auf die Ausgangssituation und die gewählte Spannweite der Eingabeparameter auf die Betriebskosten wirken.

Die vier Hilfsspalten auf der rechten Seite der Tabelle dienen der Erfassung der relevanten Informationen für die grafische Darstellung der Wirkungen. Sie beinhalten die Extremwerte der Wirkintensitäten, deren Verhältnis zueinander (synchrone/asynchrone Spannweite) sowie den jeweiligen Wirkungstrend gemäß Abschnitt 7.4.1. Damit lassen sich die numerischen Ergebnisse der Wirkungsanalyse als Diagramm darstellen, das die Wertebereiche der Wirkintensitäten über alle Eingabeparameter bezogen auf die Betriebskosten aufträgt (vgl. Abb. 59 auf S. 167).

7 Analysemodell

Tab. 49: Tabellarische Darstellung der Wirkintensitäten der *Betriebskosten* für das Anwendungsbeispiel

Nr.	Eingabeparameter	Wirkintensität Kennzahl [%]										Abk. W-B-1		Trend	Spannweite	
		Betriebskosten										Min	Max			
		50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%				
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
5	Routenlänge	-8,4	-6,7	-5,0	-3,4	-1,7	0,0	1,7	3,4	5,0	6,7	8,4	-8,4	8,4	positiv	synchron
6	Durchsatz	-24,1	-19,3	-14,5	-9,6	-4,8	0,0	4,8	9,6	14,5	19,2	24,0	-24,1	24,0	positiv	synchron
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	-0,2	0,2	positiv	synchron
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
10	Fahrgeschwindigkeit	16,8	11,2	7,2	4,2	1,9	0,0	-1,5	-2,8	-3,9	-4,8	-5,6	-5,6	16,8	negativ	asynchron
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	-1,4	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4	-1,4	1,4	positiv	synchron
12	Energieverbrauch Fahrzeug	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	-0,9	0,9	positiv	synchron
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	-0,7	0,7	positiv	synchron
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
15	Transportkapazität pro Anhänger	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	-0,2	0,2	positiv	synchron
16	Investitionskosten je Anhänger	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	-0,6	0,6	positiv	synchron
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
21	Anzahl Beladetechnik	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	-1,1	1,1	positiv	synchron
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	-1,1	1,1	positiv	synchron
23	Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
25	Anzahl Bereitstelltechnik	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	positiv	synchron
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	positiv	synchron
27	Anzahl Informationstechnik	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	-0,3	0,3	positiv	synchron
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	-0,3	0,3	positiv	synchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-42,2	-33,7	-25,3	-16,9	-8,4	0,0	8,4	16,9	25,3	33,7	42,2	-42,2	42,2	positiv	synchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-10,1	-8,1	-6,0	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,1	10,1	-10,1	10,1	positiv	synchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	-15,4	-12,3	-9,2	-6,2	-3,1	0,0	3,1	6,2	9,2	12,3	15,4	-15,4	15,4	positiv	synchron
32	Zeitzuschlag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
33	Dauer eines Haltevorgangs	-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	-1,3	1,3	positiv	synchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-8,0	-6,4	-4,8	-3,2	-1,6	0,0	1,6	3,2	4,8	6,4	8,0	-8,0	8,0	positiv	synchron
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	38,0	25,3	16,3	9,5	4,2	0,0	-3,5	-6,3	-8,8	-10,9	-12,8	-12,8	38,0	negativ	asynchron
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	-0,4	0,4	positiv	synchron
39	Summe sonstiger Investitionen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	positiv	synchron
40	Summe sonstiger Abschreibungen	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	-0,2	0,2	positiv	synchron
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	positiv	synchron
42	Summe Lizenzkosten	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	-0,4	0,4	positiv	synchron
43	Summe Bestandskosten	-1,3	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3	-1,3	1,3	positiv	synchron
44	Summe Flächenkosten	-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	-0,9	0,9	positiv	synchron
45	Summe sonstiger Energiekosten	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	-0,2	0,2	positiv	synchron
46	Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron

Legende:

Wert	= Ausgangszustand
Wert	= Wirkintensität ≠ 0
positiv	= positiver Wirkungstrend (Erhöhung/Senkung Eingabewert → Erhöhung/Senkung Kennzahlwert)
negativ	= negativer Wirkungstrend (Erhöhung/Senkung Eingabewert → Senkung/Erhöhung Kennzahlwert)
kein	= kein Wirkungstrend identifizierbar
synchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten < 1%
asynchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten > 1%

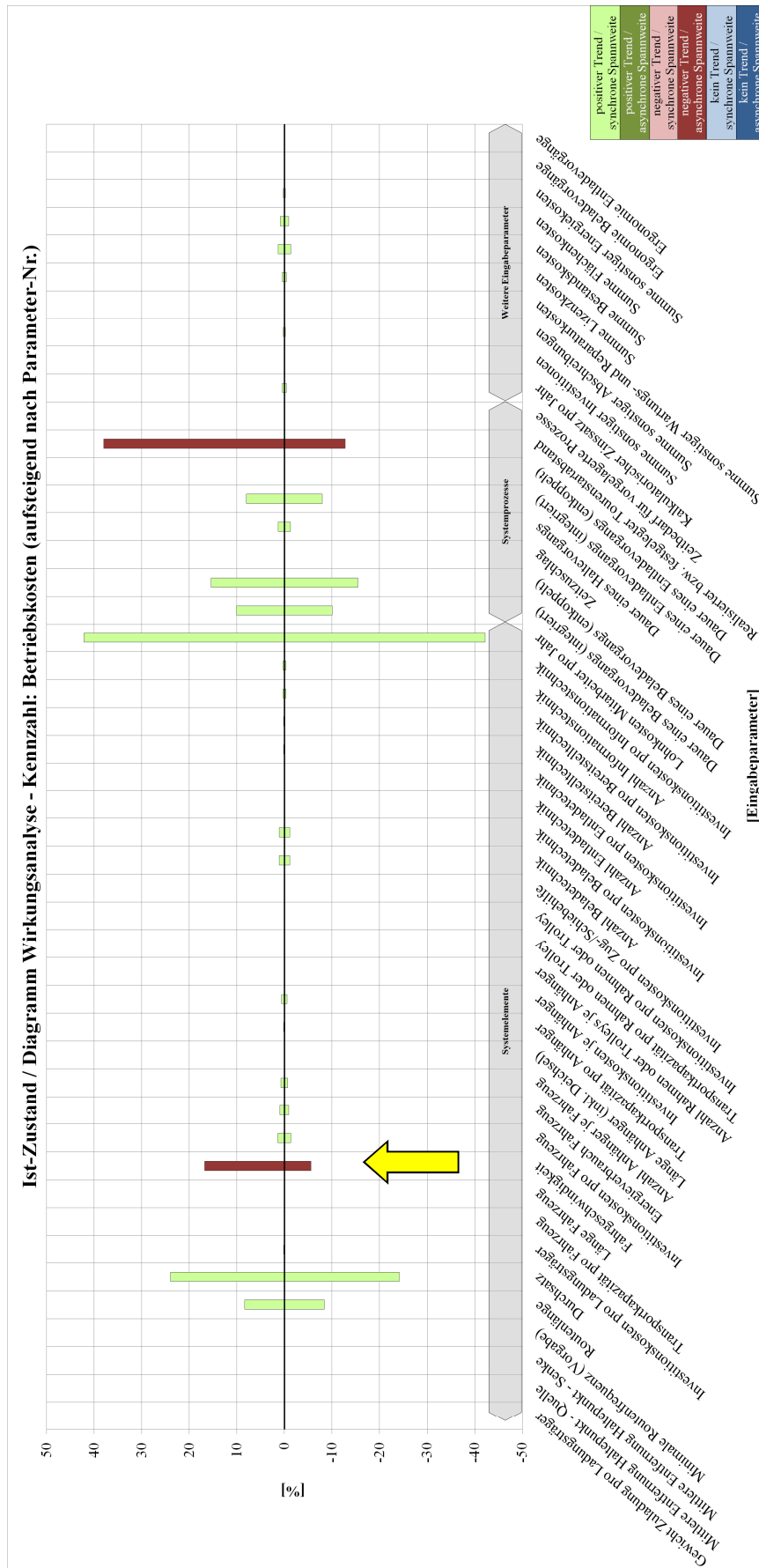


Abb. 59: Diagramm der Wirkintensitäten der Kennzahl Betriebskosten (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) in Anlehnung an SCHWARZER [SCHWARZER 2010, S. 114]

7 Analysemodell

Die Kennzeichnung des Wirkungstrends und des Zusammenhangs der Spannweiten erfolgt durch unterschiedliche Farbgebung entsprechend der aufgeführten Legende. Der dunkelrot eingefärbte Balken oberhalb des Eingabeparameters *Fahrtgeschwindigkeit* (siehe gelber Pfeil) deutet beispielsweise auf den bereits in Abschnitt 7.4.1 identifizierten negativen Trend und die asynchrone Spannweite der Wirkintensitäten hin.

Anhand des Diagramms können die Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Relevanz für die Optimierung bezogen auf eine ausgewählte Kennzahl beurteilt werden. Dabei ist allerdings die Optimierungsrichtung der jeweiligen Kennzahl zu berücksichtigen. Die Minimierung der Betriebskosten erfordert beispielsweise die Beurteilung der Eingabeparameter hinsichtlich der negativen Extremwerte ihrer Wirkintensitäten (negative Wirkintensität \triangleq Verminderung des Kennzahlwerts). Aus diesem Grund ist es sinnvoll die Eingabeparameter in der Tabelle (vgl. Anhang C.3) und im Diagramm (vgl. Abb. 60) sortiert nach dem Extremwert der negativen Wirkintensität und demzufolge nach ihrer Relevanz für die Optimierung aufzuführen.

7.4.2.1.2 Eingabeparameter

Die Wirkungsanalyse bezogen auf einen Eingabeparameter dient der Erfassung und Darstellung der Wirkungen **eines Eingabeparameters auf alle Kennzahlen**. Gegenüber der tabellarischen Darstellung der Wirkintensitäten einer Kennzahl (vgl. Tab. 49 auf S. 166) werden dabei zeilenweise alle Kennzahlen sowie die zugehörigen Wirkintensitäten aufgeführt. Die Tab. 50 verdeutlicht den grundlegenden Aufbau anhand des Eingabeparameters *realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand*, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich ein Tabellenausschnitt dargestellt wird.

Tab. 50: Tabellarische Darstellung der Wirkintensitäten des Eingabeparameters *realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand* des Anwendungsbeispiels (Ausschnitt)

		Wirkintensität Eingabeparameter [%]															
		Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand															
Abk.	Kennzahl	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Min	Max	Absolut	Trend	Spannweite
S-1	Anzahl der Routen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
S-2	Anzahl der Bereitstellorte	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
S-3	Anzahl der Bereitstellorte	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
S-5	Routenlänge	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	-50,0	-40,0	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	-50,0	50,0	50,0	positiv	synchron
L-Z-4	Zykluszeit	-15,7	-12,6	-9,4	-6,3	-3,1	0,0	3,1	6,3	9,4	12,5	15,5	-15,7	15,5	15,7	positiv	asynchron
L-Z-5	Wartezeit	-92,0	-73,6	-55,2	-36,8	-18,4	0,0	18,4	36,8	55,2	73,7	92,3	-92,0	92,3	92,3	positiv	synchron
...

Legende:

Wert	= Ausgangszustand
Wert	= Wirkintensität \neq 0
positiv	= positiver Wirkungstrend (Erhöhung/Senkung Eingabewert \rightarrow Erhöhung/Senkung Kennzahlwert)
negativ	= negativer Wirkungstrend (Erhöhung/Senkung Eingabewert \rightarrow Senkung/Erhöhung Kennzahlwert)
kein	= kein Wirkungstrend identifizierbar
synchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten < 1%
asynchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten > 1%
... %	= Systemkonfiguration führt zu unschlüssigem Kennzahlwert (manuelle Überprüfung erforderlich)

Die Hilfsspalten auf der rechten Seite der Tabelle sind ergänzt um den betragsmäßigen Extremwert der Wirkintensitäten je Kennzahl, der als Sortierkriterium der Kennzahlen im Diagramm dient. Das ist notwendig, weil die Kennzahlen unterschiedliche Optimierungsrichtungen aufweisen (z. B. Minimierung der Betriebskosten oder Maximierung des Gesamtnutzungsgrades). Die Darstellung der Wirkintensitäten im Diagramm erfolgt analog zur Darstellung der Wirkintensitäten bezogen auf eine Kennzahl, wobei die Wertebereiche der Wirkintensitäten über alle Kennzahlen bezogen auf einen Eingabeparameter aufgetragen werden. Die Tabelle und das Diagramm mit den nach absoluter Wirkintensität sortierten Kennzahlen befinden sich im Anhang C.1.

Die Wirkungsanalyse eines Parameters ermöglicht es, die relevanten Eingabeparameter bezogen auf eine Kennzahl auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf andere Kennzahlen zu beurteilen. Das ist insbesondere notwendig, weil die Veränderungen der Eingabeparameterwerte hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit zu überprüfen sind. Führt die Variation eines Eingabeparameterwerts beispielsweise zu einer unzumutbaren oder unzulässigen Veränderung eines Kennzahlwerts, so kann dies bei der Identifizierung von Stellgrößen zur Zielerreichung im Rahmen der Optimierung berücksichtigt werden. Gemäß der Tab. 49 (S. 166) führt beispielsweise die Erhöhung des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* um 50 % zu einer Senkung der *Betriebskosten* um 12,8 %. In der Wirkungsanalyse der Kennzahl bleibt allerdings unberücksichtigt, dass der *realisierte bzw. festgelegte Tourenstartabstand* mit Blick auf den *maximal möglichen Tourenstartabstand* lediglich um ca. 5,3 % erhöht werden darf und somit die realisierbare Betriebskostensenkung mit ca. 2,8 % deutlich niedriger ist. Die Überprüfung der Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte wird im Excel-Tool dadurch unterstützt, dass die Felder der entsprechenden Eingabeparameterwerte, die zu mindestens einem unschlüssigen Kennzahlwert führen, rot markiert werden (vgl. Tab. 50 auf S. 168 sowie Abschnitt 7.5.1.3).

7.4.2.1.3 Kennzahlenaggregation

Die Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation dient der Erfassung und Darstellung der Wirkungen **aller Eingabeparameter** auf **mehrere Kennzahlen** durch die Berechnung der aggregierten Wirkintensitäten mehrerer kennzahlbezogener Wirkungsanalysen. Das ist möglich, weil die Kennzahleneinheiten in der Wirkungsanalyse eliminiert werden und die Wirkintensitäten eines Eingabeparameters somit kennzahlenübergreifend zusammengefasst werden können (vgl. Abschnitt 7.3.2). Die aggregierte Wirkintensität eines Eingabeparameters bezogen auf mehrere Kennzahlen einer Route berechnet sich nach der Formel (6).

$$WI_{\text{aggregiert,Parameter}}^R = \sum_{K=1}^{n_K} (g_K \times WI_{K,Parameter}^R) \quad (6)$$

$$\text{wobei gilt } 0 \leq g_K \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{K=1}^{n_K} g_K = 1$$

mit

- g_K = Gewichtungsfaktor der Kennzahl K
- K = Index der Kennzahl
- n_K = Anzahl der relevanten Kennzahlen
- R = Index der Route
- WI = Wirkintensität

Diese Berechnungsweise berücksichtigt zum einen, dass in der Regel mehr als eine Kennzahl bei der Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen zu betrachten ist. Zum anderen kann die Wirkintensität bezogen auf eine Kennzahl entsprechend deren relativer Bedeutung in der Gesamtschau gewichtet werden, wodurch bereits bei der Analyse diejenigen Eingabeparameter als relevanter eingestuft werden, die im Sinne der Präferenz des Anwenders auf die Kennzahlen wirken.

Die Bestimmung der zu berücksichtigenden Kennzahlen und die Festlegung der Gewichtungsfaktoren je Kennzahl erfolgt aufgrund individueller Ziele und Präferenzen durch den Anwender (vgl. Abschnitte 7.6 und 8.4.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit steigender Anzahl der Kennzahlen nicht nur der Aufwand für die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren steigt und deren relative Bedeutung sinkt [KÜHNAPFEL 2014, S. 8], sondern auch die Auswertung der Analyseergebnisse komplexer ist. Da bis zu einer Anzahl von zehn Kennzahlen auch einfache Gewichtungsverfahren einsetzbar sind (vgl. Abschnitt 8.4.2.2), empfiehlt es sich, maximal zehn Kennzahlen im Rahmen der Analyse zu betrachten [KÜHNAPFEL 2014, S. 10 ff.; REFA 1990, S. 102].

Der Wirkungstrend wird bei der Kennzahlenaggregation auf Basis der bereits bekannten Wirkungstrends bezogen auf eine Kennzahl ermittelt, weil dadurch lediglich die Extremwerte der kennzahlbezogenen Wirkintensitäten analysiert werden müssen. Es lassen sich folgende Ausprägungen unterscheiden:

- **Positiver Trend:** Bezogen auf alle zu berücksichtigenden Kennzahlen liegt mindestens ein positiver Trend und kein negativer Trend vor.
- **Negativer Trend:** Bezogen auf alle zu berücksichtigenden Kennzahlen liegt mindestens ein negativer Trend und kein positiver Trend vor.
- **Kein Trend:** Bezogen auf alle zu berücksichtigenden Kennzahlen liegt mindestens ein positiver Trend und mindestens ein negativer Trend oder ausschließlich kein Trend vor.

Die Bestimmung der Art des Zusammenhangs zwischen den Extremwerten der aggregierten Wirkintensitäten (synchrone/asynchrone Spannweite) entspricht der Vorgehensweise gemäß Abschnitt 7.4.1. Die numerische und grafische Darstellung der Analyseergebnisse erfolgt analog zur kennzahlbezogenen Wirkungsanalyse (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.1), wobei aufgrund unter-

schiedlicher Optimierungsrichtungen der Kennzahlen die betragsmäßigen Extremwerte der aggregierten Wirkintensitäten als Sortierkriterium zu verwenden sind. Die entsprechende Tabelle sowie das Diagramm befindet sich im Anhang C.1.

7.4.2.2 Systembezogene Wirkungsanalyse

Die systembezogene Wirkungsanalyse dient der routenübergreifenden Erfassung und Darstellung der Wirkungen **aller Eingabeparameter** auf **mehrere Kennzahlen** durch die Zusammenfassung der aggregierten Wirkintensitäten mehrerer Routen. Die aggregierte Wirkintensität eines Eingabeparameters bezogen auf mehrere Kennzahlen eines Routenzugsystems berechnet sich nach der Formel (7).

$$WI_{\text{aggregiert,Parameter}}^{\text{System}} = \sum_{R=1}^{n_R} \left(\frac{1}{n_R} \times WI_{\text{aggregiert,Parameter}}^R \right) \quad (7)$$

mit n_R = Anzahl der Routen
 R = Index der Route
 WI = Wirkintensität

Diese Berechnungsweise gewichtet alle Routen eines Routenzugsystems gleich, bildet also den arithmetischen Mittelwert der aggregierten Wirkintensitäten aller Routen. In einem Einroutensystem sind die Ergebnisse von routenbezogener und systembezogener Wirkungsanalyse somit identisch.

Die Bestimmung des Wirkungstrends und der Art des Zusammenhangs zwischen den Extremwerten der aggregierten Wirkintensitäten (synchrone/asynchrone Spannweite) sowie auch die Darstellung der Ergebnisse entsprechen der Vorgehensweise gemäß Abschnitt 7.4.2.1.3.

7.5 Umsetzung des Analysemodells in MS Excel

Die Integration der Tabellenblätter des Analysemodells in das Excel-Tool erfolgt unter Berücksichtigung der bereits umgesetzten Struktur des Bewertungsmodells (vgl. Abschnitt 6.6.2). Es wird folglich zwischen routenbezogener und systembezogener Analyse unterschieden. Die Tab. 51 listet die Tabellenblätter des Analysemodells nach ihrer Reihenfolge in der Tabellenblattleiste des Excel-Tools auf. Die nachfolgenden Beschreibungen von Aufbau und Funktionsweise der Tabellenblätter folgen hingegen den funktionalen Zusammenhängen des Modells (Route → System). Entsprechend den Hauptfunktionen der jeweiligen Tabellenblätter wird folgendes Farbschema verwendet:

- Ergebnisdarstellung System: blau
- Analyse: lila

Tab. 51: Farbschema, Funktionen und Kurzbeschreibungen der Tabellenblätter des Analysemodells

<i>Tabellenblatt</i>	<i>Funktion</i>	<i>Kurzbeschreibung</i>
System-Analyse	- Berechnung - Ergebnisdarstellung	Numerische und grafische Darstellung systembezogener Analyseergebnisse auf Basis der Eingaben, Berechnungen und Kennzahlen aller Routen
R_X Analyse	- Eingabe - Berechnung - Ergebnisdarstellung	Durchführung der Wirkungsanalyse sowie numerische und grafische Darstellung routenbezogener Analyseergebnisse auf Basis der Eingaben, Berechnungen und Kennzahlen der Route X

7.5.1 Tabellenblatt „R_X Analyse“

Das Tabellenblatt „R_X Analyse“ dient der Durchführung von Sensitivitäts-, Parameter- und Wirkungsanalysen auf der Basis des Bewertungsmodells. Die verwendeten Makros zur Durchführung von Parameter- und Wirkungsanalysen greifen dabei auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zurück. Vor diesem Hintergrund ist der Aufbau des Analysemodells in separaten Tabellenblättern nicht sinnvoll, weil Tabellenblattwechsel die Laufzeiten der Makros negativ beeinflussen. Stattdessen ist das Tabellenblatt „R_X Analyse“ in Bereiche unterteilt:

- Zeilen 1 bis 561: Sensitivitätsanalyse
- Zeilen 562 bis 620: Parameteranalyse
- Zeilen 621 bis 999: Wirkungsanalyse

7.5.1.1 Bereich „Sensitivitätsanalyse“

Im Zellbereich B2:D2 befinden sich sechs Makros [23], mit den in der Tab. 52 aufgeführten Funktionsumfängen. Die Zellbereiche E2:J2 bzw. L2:Q2 umfassen die Legenden bezüglich der Eingabe- und Berechnungsfelder im Zellbereich E3:E999 [24] bzw. der Kennzahlen- und Wirkintensitätenmatrizen im Zellbereich G6:TC999 [25] (vgl. Abb. 61). Zwecks Übersichtlichkeit sind die Zeilen eins bis sechs des Tabellenblatts fixiert und werden stets angezeigt.

Der Zellbereich B3:E220 zeigt die Eingabedaten für die Sensitivitätsanalyse an (Systemkonfiguration im Ist-Zustand) [26] und ist hinsichtlich des Aufbaus identisch mit den Bereichen [3] bis [5] des Tabellenblatts „R_X Eingabe“ (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Die entsprechenden Eingabefelder im Zellbereich E3:E220 werden durch das Makro „Eingabedaten übertragen“ ausgefüllt. Die Zelle H5 ist das einzige manuell auszufüllende Eingabefeld im Bereich „Sensitivitätsanalyse“. Der Anwender legt durch die Vorgabe der Spannweite der Eingabeparameter die prozentuale Veränderung der Eingabeparameterwerte [27] im Rahmen der Sensitivitätsanalyse fest (vgl. Abschnitt 7.2.2.3). Demzufolge ist der Wert vor der Ausführung des Makros „Sensitivitätsanalyse durchführen“ einzutragen, dessen benötigte Laufzeit nach der Ausführung in der Zelle G10 angezeigt wird [28].

Tab. 52: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B2:D2 des Tabellenblatts „R_X Analyse“

Makro-Bezeichnung ¹³⁴	Funktion
Eingabedaten übertragen	Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“ in die Eingabefelder (Zellbereich E3:E220 [26]) kopieren.
Sensitivitätsanalyse durchführen	Zu analysierende Systemkonfigurationen (Zellbereich G34:TC220 [27]) nacheinander als Eingabedaten in das Tabellenblatt „R_X Eingabe“ kopieren und jeweilige Kennzahlenwerte aus Tabellenblatt „System-Kennzahlen ohne Poolung“ bzw. „System-Kennzahlen mit Poolung“ in die Kennzahlenmatrix (Zellbereich G224:TC446 [31]) übertragen.
Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen	Inhalte aller Eingabe- und Berechnungsfelder sowie Ergebnisse von Sensitivitäts-, Parameter- und Wirkungsanalysen löschen.
Zur Sensitivitätsanalyse wechseln	Markieren der Zelle F6 und wechseln zum Bereich „Sensitivitätsanalyse“.
Zur Parameteranalyse wechseln	Markieren der Zelle F568 und wechseln zum Bereich „Parameteranalyse“.
Zur Wirkungsanalyse wechseln	Markieren der Zelle F627 und wechseln zum Bereich „Wirkungsanalyse“.

In der Eingabeparametermatrix (Zellbereich G34:TC220 [29]) sind alle Systemkonfigurationen dargestellt, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtet werden (eine Spalte $\hat{=}$ eine Systemkonfiguration). Der Zellbereich G34:TC36 gibt je zu variierendem Eingabeparameter (vgl. Abschnitt 7.2.2.2) die variierten Werte in Prozent des Ursprungswerts entsprechend der eingegebenen prozentualen Spannweite [25] an. Der Zellbereich G38:TC220 gibt auf dieser Basis zeilenweise die Wertebereiche aller Eingabeparameter gemäß Abschnitt 7.2.2.3 wieder. Die hellorange markierten Felder kennzeichnen je Spalte den von der ursprünglichen Systemkonfiguration [26] abweichenden Wert des entsprechenden Eingabeparameters. Die Abb. 62 zeigt die Bereiche [26] und [29] nach der Übertragung der Eingabedaten und der Vorgabe der Spannweite (hier: 50 %) für das Anwendungsbeispiel.

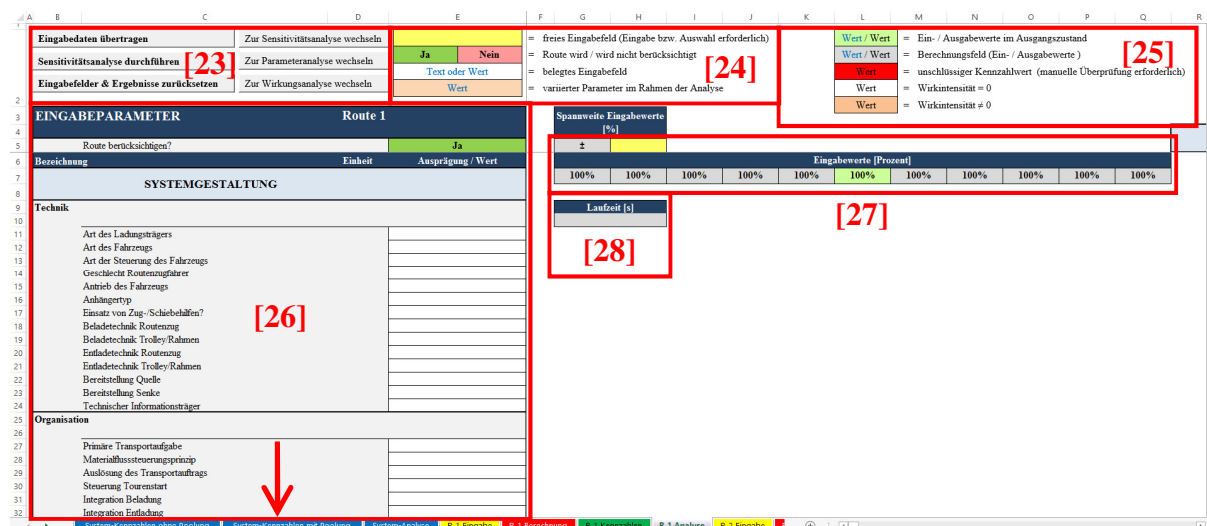


Abb. 61: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Eingabeparameter)

¹³⁴ Die nicht fett formatierten Makros dienen der Navigation innerhalb des Tabellenblatts (auch im Folgenden).

7.5 Umsetzung des Analysemodells in MS Excel

Eingabedaten übertragen Zur Sensitivitätsanalyse wechseln
Sensitivitätsanalyse durchführen Zur Parameteranalyse wechseln
Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen Zur Wirkungsanalyse wechseln

EINGABEPARAMETER Route 1 Beispiel 1 VDI 586 (Dimensionsierung)

SYSTEMELEMENTE

Transportgut	
Gewicht Zuladung pro Ladungsträger [kg]	200,0
Route	
Anzahl der Bereitstellorte (Quelle) [Stk]	1
Anzahl der Bereitstellorte (Senke) [Stk]	10
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle [m]	10,0
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke [m]	4
Minimale Routenfrequenz (Vorgabe) [1/h]	1,5
Routenlänge [m]	500
Haltepunkte Entladung	
Durchsatz H_1 [LT/h]	0,50
Durchsatz H_2 [LT/h]	1,45
Durchsatz H_3 [LT/h]	0,60
Durchsatz H_4 [LT/h]	1,20
Durchsatz H_5 [LT/h]	4,25
Durchsatz H_6 [LT/h]	1,50
Durchsatz H_7 [LT/h]	-
Durchsatz H_8 [LT/h]	-
Durchsatz H_9 [LT/h]	-
Durchsatz H_10 [LT/h]	-
Durchsatz H_11 [LT/h]	-
Durchsatz H_12 [LT/h]	-

Eingabewerte Parameter Nr. 1

	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	500%
Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	100,0	120,0	140,0	160,0	180,0	200,0	220,0	240,0	260,0	280,0	300,0	500
Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Routenlänge	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Durchsatz H_1	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Durchsatz H_2	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Durchsatz H_3	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Durchsatz H_4	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Durchsatz H_5	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
Durchsatz H_6	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Durchsatz H_7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz H_8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz H_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz H_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz H_11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durchsatz H_12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 62: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Systemkonfigurationen)

Der Zellbereich B224:E446 [30] umfasst die Kennzahlenübersicht mit den Kennzahlenwerten für die Eingabeparameter im Ist-Zustand [26]. Die entsprechenden Kennzahlenwerte im Zellbereich E224:E446 werden durch das Makro „Eingabedaten übertragen“ eingesetzt, wobei zu beachten ist, dass es sich dabei um systembezogene Kennzahlenwerte (Durchschnitt und Summe) handelt (vgl. Abschnitt 6.4.2). Demzufolge muss vor der Ausführung des Makros sichergestellt sein, dass das Tabellenblatt „R_X Eingabe“ für alle zu betrachtenden Routen korrekt ausgefüllt ist. Die Frage, ob es sich um ein Routenzugsystem mit oder ohne Fahrzeug-Poolung handelt, ist im Zuge der Makro-Ausführung vom Anwender zu beantworten (vgl. Bedienungsanleitung im Anhang B.2).

Die Kennzahlenmatrix im Zellbereich G224:TC446 [31] beinhaltet die den jeweiligen Systemkonfigurationen [29] zugehörigen Kennzahlenwerte (eine Spalte $\hat{=}$ Kennzahlenwerte einer Systemkonfiguration). Der Bereich wird durch das Makro „Sensitivitätsanalyse durchführen“ spaltenweise mit den systembezogenen Kennzahlenwerten der jeweiligen Systemkonfigurationen ausgefüllt, wobei wiederum im Zuge der Makro-Ausführung vom Anwender anzugeben ist, ob es sich um ein Routenzugsystem mit oder ohne Fahrzeug-Poolung handelt (vgl. Bedienungsanleitung im Anhang B.2). Die Abb. 63 zeigt den Bereich [31] nach der Durchführung der Sensitivitätsanalyse für das Anwendungsbeispiel. Er umfasst exklusive des mehrmals aufgeführten Ist-Zustands (hellgrün markiert) insgesamt 93.060 Kennzahlenwerte (vgl. Abschnitt 7.2.2.4), die als Basis für die Berechnung der Wirkintensitäten dienen (vgl. Abschnitt 7.3.2).

Die Kennzahlenmatrix [31] wird einer Konsistenzprüfung unterzogen, indem die prozentual angegebenen Kennzahlenwerte, der Tourenstartabstand und die Wiederbeschaffungszeiten hinsichtlich ihres Wertebereichs überprüft werden. Beispielsweise führt im Anwendungsbeispiel bereits die Erhöhung des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* um 10 % zu ungünstigen Kennzahlenwerten (vgl. Abb. 64 und Abschnitt 6.6.2.3). Die softwaretechnische Umset-

7 Analysemodell

zung der Konsistenzprüfung erfolgt durch bedingte Formatierungen. Da die manuelle Überprüfung aller Kennzahlenwerte nicht zweckmäßig ist, erfolgt die Konsistenzprüfung zusätzlich im Rahmen der Wirkungsanalyse bezogen auf einen Eingabeparameter (vgl. Abschnitt 7.5.1.3).

KENZAHLEN - DURCHSCHNITT				Kennzahlen Parameter											
Route 1				Nr. 1											
Route berücksichtigen?				Gewicht Zuladung pro Ladungsträger											
Route 1				50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	50%
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S-5	Routenlänge	[m]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
L-Z-5	Wartezeit	[min]	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1	55,1
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9
L-Z-8	Beladeczeit	[min]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
L-Z-11	Entladeczeit	[min]	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
L-Z-12	Anteil Beladeczeit	[%]	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
L-Z-15	Anteil Entladeczeit	[%]	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8

Abb. 63: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlen)

KENZAHLEN - DURCHSCHNITT				Kennzahlen Parameter										
Route 1				Nr. 36										
Route 1				Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand										
Route 1				50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S-5	Routenlänge	[m]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0

Abb. 64: Beispielhafter Widerspruch bei der Konsistenzprüfung der Kennzahlenwerte im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Der Zellbereich B450:E559 [32] weist die bereits bekannte Kennzahlenstruktur auf, die dazu dient, zeilenweise die Kennzahlen aufzuführen, auf die sich die in der Wirkintensitätenmatrix (Zellbereich G450:TC559 [33]) dargestellten Wirkintensitäten beziehen. Die Wirkintensitätenmatrix beinhaltet die den jeweiligen Systemkonfigurationen [29] zugehörigen Wirkintensitäten (eine Spalte $\hat{=}$ Wirkintensitäten einer Systemkonfiguration), die sich nach Abschnitt 7.3.2 automatisch auf Basis der Kennzahlenwerte im Bereich [31] berechnen.

Die durch bedingte Formatierung dunkelorange markierten Felder enthalten Wirkintensitäten, deren Werte ungleich Null sind. Die 46.530 Wirkintensitäten (exklusive Ist-Zustand) dienen als Datenbasis für die Parameter- und Wirkungsanalyse (vgl. Abschnitt 7.3.2). Die Abb. 65 zeigt den Bereich [33] nach der Durchführung der Sensitivitätsanalyse für das Anwendungsbeispiel, wobei in diesem Ausschnitt keine Wirkintensitäten ungleich Null vorkommen.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a legend and a data table. The legend defines the following:

- Wert / Wert** (Green): Ein- / Ausgabewerte im Ausgangszustand
- Wert / Wert** (Yellow): Berechnungsfeld (Ein- / Ausgabewerte)
- Wert** (Red): unschlüssiger Kennzahlwert (manuelle Überprüfung erforderlich)
- Wert** (White): Wirkintensität = 0
- Wert** (Orange): Wirkintensität ≠ 0

The data table is titled 'Wirkintensität Parameter [%]' and 'Gewicht Zuladung pro Ladungsträger'. It shows values for various parameters across different weight loadings. Red arrows point to cells containing the values 32 and 33.

Abb. 65: Bereich „Sensitivitätsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Wirkintensitäten)

7.5.1.2 Bereich „Parameteranalyse“

Der Bereich „Parameteranalyse“ ermöglicht die Analyse ausgewählter Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen und ist aufgrund seiner Unabhängigkeit vom Bereich „Wirkungsanalyse“ optional nutzbar. Der Zellbereich B565:E572 [34] umfasst die Auswahlfelder (Zellbereich D568:E570) zur Durchführung einer Parameteranalyse von einem auszuwählenden Eingabeparameter bezogen auf eine auszuwählende Kennzahl gemäß Abschnitt 7.4.1. Vom Anwender ist zudem die Basis auszuwählen, die den absoluten systembezogenen Kennzahlwerten zugrunde liegen soll. Die Auswahl erfolgt mittels Dropdown-Listen, in denen die Eingabeparameter und Kennzahlen zwecks Übersichtlichkeit nach aufsteigender Nummer bzw. Abkürzung aufgeführt sind.

Im Zellbereich B574:E574 [35] befindet sich die Legende bezüglich der Ergebnisdarstellung (Zellbereich G565:Q574 [36]), bestehend aus numerischer und grafischer Darstellung von Kennzahlwerten und Wirkintensitäten gemäß den Abschnitten 7.3.2 und 7.4.1. Die Aktualisierung der Ergebnisdarstellung auf Basis der Auswahlfelder erfolgt automatisch, indem die Felder im Zellbereich G571:Q572 dynamisch mittels der Excel-Funktion SVERWEIS die jeweiligen Kennzahlwerte und Wirkintensitäten aus den Kennzahlen- [31] und Wirkintensitätenmatrizen [33] auslesen. Die Zellen N573 bzw. Q573 zeigen den Wirkungstrend bzw. den Zusammenhang zwischen den Extremwerten der Wirkintensitäten gemäß Abschnitt 7.4.1 an.

Die Abb. 66 zeigt den Bereich „Parameteranalyse“ für die Kennzahl *Betriebskosten* (Basis: Summe) und den Eingabeparameter *Fahrgeschwindigkeit*. Der Zellbereich B565:Q618 bietet die Möglichkeit, parallel fünf voneinander unabhängige Parameteranalysen in der beschriebenen Art und Weise durchzuführen und darzustellen.

7 Analysemmodell

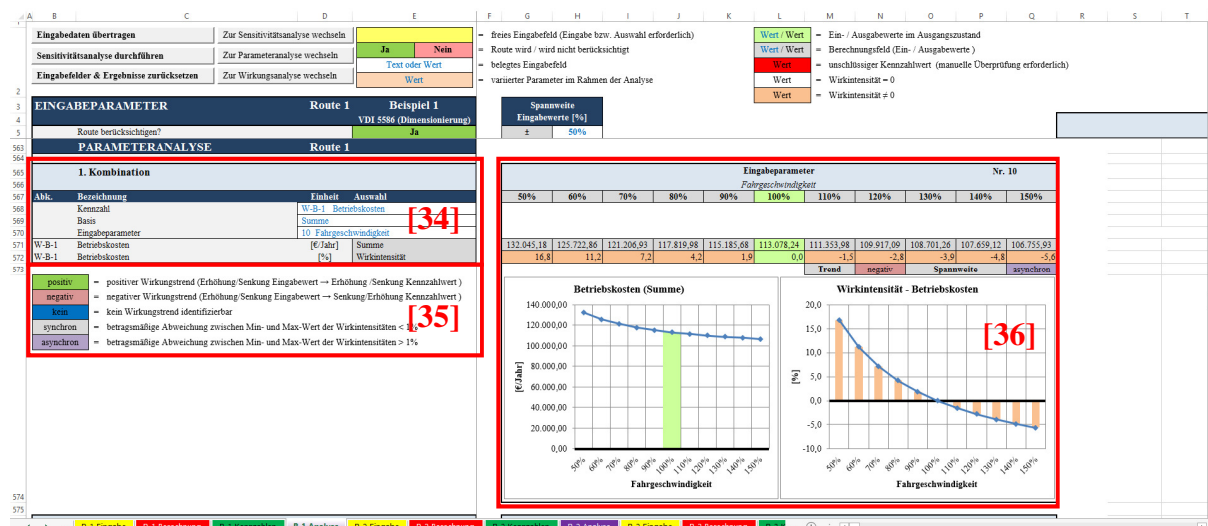


Abb. 66: Bereich „Parameteranalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“

7.5.1.3 Bereich „Wirkungsanalyse“

Der Zellbereich B624:E629 [37] beinhaltet die Auswahlfelder (Zellbereich D627:E628) zur Durchführung einer Wirkungsanalyse bezogen auf eine Kennzahl gemäß Abschnitt 7.4.2.1.1. Die Kennzahl sowie die bevorzugte Optimierungsrichtung sind vom Anwender mittels Dropdown-Listen auszuwählen. Im Zellbereich B631:E636 befinden sich vier Makros [38], mit den in der Tab. 53 aufgeführten Funktionsumfängen sowie die Zelle D636 für die Angabe der benötigten Laufzeit des Makros „Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen“ (vgl. Abb. 67).

Tab. 53: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B631:E636 des Tabellenblatts „R_X Analyse“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen	Wirkintensitäten aller Eingabeparameter bezogen auf die ausgewählte Kennzahl aus der Wirkintensitätenmatrix (Zellbereich G450:TC559 [33]) in den Zellbereich AO624:BU673 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) übertragen und anschließend sortiert nach Wirkintensität in den Zellbereich G624:AM673 [40] kopieren.
Kennzahl zur Aggregation hinzufügen	Extremwerte, deren Zusammenhang und Wirkungstrend der Wirkintensitäten aller Eingabeparameter aus dem Zellbereich AO624:BU673 [40] in den Zellbereich AP898:CM949 [47] kopieren.
Wirkintensitäten Kennzahl löschen	Inhalte der Auswahlfelder (Zellbereich D627:E628 [37]) sowie Ergebnisse der Wirkungsanalyse (Zellbereiche G627:Q673 und AO627:AY673 [40]) löschen.
Zur Kennzahlenübersicht wechseln	Markieren der Zelle B229 und wechseln zur Kennzahlenmatrix (Zellbereich G224:TC446 [31]) im Bereich „Sensitivitätsanalyse“.

Der Zellbereich B638:E642 umfasst die Legende [39] bezüglich der tabellarischen Ergebnisdarstellung der Wirkungsanalyse (Zellbereich G624:BU673 [40]). Nach Ausführung des Makros „Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen“ wird das Wirkungsanalyseergebnis zunächst tabellarisch sortiert nach Eingabeparameter-Nr. im Zellbereich AO624:BU673 dargestellt (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.1). Darauf basierend wird der Zellbereich G624:AM673 mit der tabellarischen Darstellung sortiert nach Wirkintensität erstellt. Beide Tabellen schließen Hilfsspalten (Zellbereiche AB625:AM673 bzw. BJ625:BU673) mit ein, die der Diagrammerstellung dienen

7.5 Umsetzung des Analysemodells in MS Excel

und somit für den Anwender nicht von Bedeutung sind. Die automatisch generierten Diagramme gemäß Abschnitt 7.4.2.1.1 befinden sich in den Zellbereichen AO676:BK724 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) und G676:AB724 (sortiert nach Wirkintensität), wobei die Achsengrenzen der Ordinate auf $\pm 50\%$ festgelegt sind.¹³⁵ Die Abb. 67 zeigt den Bereich [40] nach der Durchführung der Wirkungsanalyse für die Kennzahl *Betriebskosten* des Anwendungsbeispiels.

EINGABEDATEN ÜBERTRAGEN		Zur Sensitivitätsanalyse wechseln	Ja		Nein
Sensitivitätsanalyse durchführen		Zur Parameteranalyse wechseln	Text oder Wert		
Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen		Zur Wirkungsanalyse wechseln	Wert		

EINGABEPARAMETER		Route 1	Beispiel 1
Route berücksichtigen?		VDI 5586 (Dimensionierung)	

WIRKUNGSANALYSE		Route 1	
Kennzahl			
Abk.	Bezeichnung	Einheit	Auswahl
	Kennzahl	W-B-1 Betriebskosten	[37]
	Optimierungsrichtung	Minimierung	
W-B-1	Betriebskosten	€/Jahr	Minimierung

Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen		Zur Kennzahlenübersicht wechseln
Kennzahl zur Aggregation hinzufügen		[38]
Wirkintensitäten Kennzahl löschen		Laufzeit [s] 24,6

Wirkintensität Kennzahl [%]												Abk. W-B-1
Betriebskosten												
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%		
-42,2	-33,7	-25,3	-16,9	-8,4	0,0	8,4	16,9	25,3	33,7	42,2		
-24,1	-19,3	-14,5	-9,6	-4,8	0,0	4,8	9,6	14,5	19,3	24,0		
-15,4	-12,3	-9,2	-6,2	-3,1	0,0	3,1	6,2	9,2	12,3	15,4		
38,0	25,3	16,9	9,6	4,2	0,0	-3,5	-6,3	-8,8	-10,9	-12,8		
-10,1	-8,1	-6,0	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,1	10,1		
-8,4	-6,7	-5,0	-3,4	-1,7	0,0	1,7	3,4	5,0	6,7	8,4		
-8,0	-6,4	-4,8	-3,2	-1,6	0,0	1,6	3,2	4,8	6,4	8,0		
16,8	11,2	7,2	4,2	1,9	0,0	-1,5	-2,8	-3,9	-4,8	-5,6		
-1,4	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4		
-1,3	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3		
-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3		
-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1		
-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1		
-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9		
-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9		
-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7		
-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6		
-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4		
-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4		
-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3		
-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3		
-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2		

positiv	= positiver Wirkungstrend (Erhöhung/Senkung Eingabewert → Erhöhung/Senkung Kennzahlwert)
negativ	= negativer Wirkungstrend (Erhöhung/senkung Eingabewert → Senkung/Erhöhung Kennzahlwert)
kein	= kein Wirkungstrend identifizierbar
synchron	= betragensmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten < 1%
asynchron	= betragensmäßige Abweichung zwischen Min- und Max-Wert der Wirkintensitäten > 1%

Abb. 67: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahl)

Das Makro „Kennzahl zur Aggregation hinzufügen“ kopiert das angezeigte tabellarische Wirkungsanalyseergebnis sortiert nach Eingabeparameter-Nr. (Zellbereich AO624:BU673 [40]) in den Zellbereich AP898:CM949 [47], wodurch es im Rahmen der Kennzahlenaggregation berücksichtigt wird. Vom Anwender sind in diesem Zuge die entsprechenden Bewertungskriterium-Nr.¹³⁶ sowie der Gewichtungsfaktor der Kennzahl anzugeben (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.3). Das Makro „Wirkintensitäten Kennzahl löschen“ setzt die Bereiche [37] und [40] sowie die Zelle D636 in den Ausgangszustand zurück, um beispielsweise die Wirkungsanalyse für eine andere Kennzahl durchführen zu können.

Der Zellbereich B728:E732 [41] enthält das Auswahlfeld zur Durchführung der Wirkungsanalyse bezogen auf einen vom Anwender mittels Dropdown-Liste auszuwählenden Eingabeparameter gemäß Abschnitt 7.4.2.1.2. Im Zellbereich B734:E739 befinden sich drei Makros [42], mit den in der Tab. 54 aufgeführten Funktionsumfängen sowie die Zelle D739 für die Angabe der benötigten Laufzeit des Makros „Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen“ (vgl. Abb. 68).

¹³⁵ Die Achsengrenzen der Ordinate können manuell über die Excel-Funktion „Achse formatieren“ → „Achsoptionen“ → „Grenzen“ manipuliert werden. Dies gilt auch für alle anderen Diagramme im Excel-Tool.

¹³⁶ Die Bezeichnung „Bewertungskriterium“ soll an dieser Stelle deutlich machen, dass die im Rahmen der Entscheidungsfindung (vgl. Abschnitt 8.4) als Bewertungskriterien verwendeten Kennzahlen bereits im Analysemodell zur Identifizierung der relevanten Eingabeparameter verwendet werden sollten.

7 Analysemodell

Tab. 54: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B734:E739 des Tabellenblatts „R_X Analyse“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen	Wirkintensitäten des Eingabeparameters (Zellbereich D731:E731 [41]) bezogen auf alle Kennzahlen aus der Wirkintensitätenmatrix (Zellbereich G450:TC559 [33]) in den Zellbereich AP728:AZ829 (sortiert nach Kennzahlabkürzung) übertragen und anschließend sortiert nach Wirkintensität in den Zellbereich G731:Q829 [44] kopieren.
Wirkintensitäten Eingabeparameter löschen	Inhalte des Auswahlfeldes (Zellbereich D731:E731 [41]) sowie Ergebnisse der Wirkungsanalyse in den Zellbereichen G728:Q829 sowie AP728:AZ829 [44] löschen.
Zu Kennzahlen des Eingabeparameters wechseln	Wechseln zu den Kennzahlenwerten des Eingabeparameters (Zellbereich D731:E731 [41]) in der Kennzahlenmatrix (Zellbereich G224:TC446 [31]) im Bereich „Sensitivitätsanalyse“.

Der Zellbereich B741:E746 umfasst die Legende [43] bezüglich der tabellarischen Ergebnisdarstellung der Wirkungsanalyse (Zellbereich G728:BU673 [44]). Nach Ausführung des Makros „Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen“ wird das Wirkungsanalyseergebnis zunächst tabellarisch sortiert nach Kennzahlabkürzung im Zellbereich AP728:BW829 dargestellt (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.2). Darauf basierend wird der Zellbereich G728:AN829 mit der tabellarischen Darstellung sortiert nach absoluter Wirkintensität erstellt. Beide Tabellen schließen Hilfsspalten (Zellbereiche AC729:AN829 bzw. BL729:BW829) zur automatischen Diagramm-erstellung gemäß Abschnitt 7.4.2.1.2 mit ein. Die Diagramme befinden sich in den Zellbereichen AP832:BY894 (sortiert nach Kennzahlabkürzung) und G832:AO894 (sortiert nach absoluter Wirkintensität). Die Abb. 68 zeigt den Bereich [44] nach der Durchführung der Wirkungsanalyse für den Eingabeparameter *realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand* des Anwendungsbeispiels.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following components:

- Top Section:** A menu bar with options like 'Eingabedaten übertragen', 'Sensitivitätsanalyse durchführen', and 'Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen'. Below it are buttons for 'Ja', 'Nein', and 'Wert'.
- Legend (43):** A table explaining the symbols used in the analysis:
 - freies Eingabefeld (Eingabe bzw. Auswahl erforderlich)
 - Route wird / wird nicht berücksichtigt
 - belegtes Eingabefeld
 - variierter Parameter im Rahmen der Analyse
 - Wert / Wert
 - Ein- / Ausgabewerte im Ausgangszustand
 - Berechnungsfeld (Ein- / Ausgabewerte)
 - unschlüssiger Kennzahlwert (manuelle Überprüfung erforderlich)
 - Wirkintensität = 0
 - Wirkintensität ≠ 0
- Main Table (44):** A table titled 'Wirkintensität Eingabeparameter [%]' for parameter 'Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand'. The columns represent different percentage levels (50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%, 130%, 140%, 150%) and the rows represent various output parameters (e.g., Q-F-3, L-M-2, L-M-3, etc.). The cells contain numerical values representing the percentage change in the output parameter.
- Other Elements:** A 'Spannweite Eingabewerte [%]' field set to 50%, and a 'Laufzeit [s]' field set to 31.9.

Abb. 68: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Eingabeparameter)

Wie bereits in Abschnitt 7.4.2.1.2 erwähnt, wird im Zuge der Wirkungsanalyse die Konsistenzprüfung der Kennzahlenmatrix (Zellbereich G224:TC446 [31]) berücksichtigt. Dies geschieht

7.5 Umsetzung des Analysemodells in MS Excel

automatisch mit der Ausführung des Makros „Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen“. Dabei werden diejenigen Felder der Eingabeparameterwerte (Zellbereich G730:Q730 und AP730:AZ730) rot markiert, die zu mindestens einem unschlüssigen Kennzahlwert führen (vgl. Abb. 68). Mittels des Makros „Zu Kennzahlen des Eingabeparameters wechseln“ ist es möglich, direkt zu den Kennzahlenwerten des jeweiligen Eingabeparameters in der Kennzahlenmatrix zu wechseln, um die Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte manuell überprüfen zu können. Das Makro „Wirkintensitäten Eingabeparameter löschen“ setzt die Bereiche [41] und [44] sowie die Zelle D739 in den Ausgangszustand zurück, um beispielsweise die Wirkungsanalyse für einen anderen Eingabeparameter durchführen zu können.

Der Zellbereich B902:E909 beinhaltet fünf Makros [45], mit den in der Tab. 55 aufgeführten Funktionsumfängen. Der Zellbereich B911:E916 umfasst die Legende [46] bezüglich der tabellarischen Ergebnisdarstellung der Wirkungsanalyse im Zellbereich G898:DB949 [47] (vgl. Abb. 69).

Tab. 55: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B902:E909 des Tabellenblatts „R_X Analyse“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren	Aggregierte Wirkintensitäten aller Eingabeparameter bezogen auf die ausgewählten Kennzahlen aus dem Zellbereich AP899:CM949 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) in den Zellbereich G899:AC949 (sortiert nach Wirkintensität) übertragen.
Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen	Ergebnisse der Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation im Zellbereich G899:AC949 (sortiert nach Wirkintensität) löschen.
Bewertungskriterium Nr. ... löschen	Extremwerte, deren Zusammenhang und Wirkungstrend der Wirkintensitäten für eine bestimmte Kennzahl im Zellbereich AP898:CM949 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) löschen.
Alle Bewertungskriterien löschen	Extremwerte, deren Zusammenhang und Wirkungstrend der Wirkintensitäten für alle Kennzahlen im Zellbereich AP898:CM949 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) löschen.
Zur Kennzahlenübersicht wechseln	Markieren der Zelle B229 und wechseln zur Kennzahlenmatrix (Zellbereich G224:TC446 [31]) im Bereich „Sensitivitätsanalyse“.

The screenshot displays the 'Wirkungsanalyse' section of the 'R_X Analyse' spreadsheet. On the left, a control panel contains buttons for macro execution: 'Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren', 'Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen', 'Bewertungskriterium Nr. ... löschen', and 'Alle Bewertungskriterien löschen'. A legend below defines terms: 'positiv' (positive trend), 'negativ' (negative trend), 'synchron' (small deviation), and 'asynchron' (large deviation). A table titled 'Wirkintensität aggregiert [%]' shows aggregated data for 17 parameters. Red boxes and arrows highlight the macro buttons and specific data points in the table, such as the 'Dauer eines Beladevorgangs (integriert)' row.

Abb. 69: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlenaggregation)

7 Analysemodell

Wie bereits beschrieben, überträgt das Makro „Kennzahl zur Aggregation hinzufügen“ [38] das tabellarische Wirkungsanalyseergebnis bezogen auf eine Kennzahl aus dem Zellbereich AO624:BU673 [40] in den Zellbereich AP898:CM949 [47]. Dort wird es in komprimierter Form dargestellt und dient als Basis für die Berechnung und Auswertung der aggregierten Wirkintensitäten sortiert nach Eingabeparameter-Nr. (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.3).

Die Abb. 70 zeigt einen Ausschnitt der aggregierten Wirkintensitäten sowie des übertragenen Wirkungsanalyseergebnisses bezüglich der Kennzahl *Zykluszeit* (Bewertungskriterium Nr. 1 mit $g_{K1} = 10,3 \%$) für das Anwendungsbeispiel. Ist die Summe der Gewichtungsfaktoren ungleich 100 % (vgl. Formel (6) in Abschnitt 7.4.2.1.3), werden die Zellen AY899 (roter Pfeil) und Q899 rot hinterlegt. Aufgabe des Anwenders ist es in diesem Fall, die jeweiligen Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien (gelber Pfeil) manuell anzupassen. Dies ist auch nach der Übertragung der kennzahlbezogenen Wirkungsanalyseergebnisse durch das Makro „Kennzahl zur Aggregation hinzufügen“ [38] noch möglich. Trotzdem ist es ratsam, bereits vor der Wirkungsanalyse die Auswahl und Gewichtung der Bewertungskriterien vorzunehmen (vgl. Abschnitte 7.6 und 8.4.2).

Wirkintensität aggregiert [%]					Summe Gewichtung ($\Sigma g_K = 100 \%$)		100%		Bewertungskriterium Nr. 1			
									Gewichtung ($0 \% \leq g_K \leq 100 \%$)			
									Wirkintensität [%]			
									Abk. L-Z			
									Zykluszeit			
Nr.	Eingabeparameter	Minimum	Maximum	Trend	Sp	weite	Minimum	Maximum	Trend	Sp	weite	
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	kein	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	kein	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,4	positiv	asyn	chron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
5	Routenlänge	-7,5	7,8	kein	asyn	chron	-15,1	15,1	positiv	syn	ron	
6	Durchsatz	-19,7	18,4	positiv	asyn	chron	-15,7	15,5	positiv	asyn	chron	
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,1	0,1	positiv	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	kein	syn	ron	0,0	0,0	kein	syn	ron	
10	Fahrgeschwindigkeit	-6,6	13,5	kein	asyn	chron	-10,1	30,3	negativ	asyn	chron	

Abb. 70: Ausschnitt des Wirkungsanalyseergebnisses zur Kennzahlenaggregation für das Anwendungsbeispiel

Das Makro „Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren“ [45] überträgt das Ergebnis der Aggregation aus dem Zellbereich AP899:CM949 in den Zellbereich G899:AC949, wo es sortiert nach absoluter aggregierter Wirkintensität dargestellt wird. Die Abb. 69 zeigt den Bereich [47] nach der Durchführung der Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation des Anwendungsbeispiels. Die Hilfsspalten der beiden Tabellen in den Zellbereichen R901:AC949 und CN901:DB949 dienen der automatischen Trendberechnung und Diagrammerstellung gemäß Abschnitt 7.4.2.1.3. Die jeweiligen Diagramme befinden sich in den Zellbereichen AP952:BK999 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) und G952:AA999 (sortiert nach absoluter Wirkintensität).

Das Makro „Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen“ löscht das Ergebnis der Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation im Zellbereich G899:AC949. Das kann beispielsweise erforderlich sein, wenn nachträglich Bewertungskriterien hinzugefügt (Makro „Kennzahl zur Aggregation hinzufügen“ [38]) oder gelöscht (Makro „Bewertungskriterium Nr. ... löschen“ oder „Alle Bewertungskriterien löschen“ [45]) werden sollen (vgl. Anhang B.2).

Das Makro „Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen“ im Kopf des Tabellenblatts [23] setzt alle Bereiche des Tabellenblatts in den Ausgangszustand zurück. Das ist beispielsweise erforderlich, wenn Daten im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ geändert werden. In diesem Fall sind die auf den Bewertungsergebnissen basierenden Analysen erneut durchzuführen.

7.5.2 Tabellenblatt „System-Analyse“

Im Tabellenblatt „System-Analyse“ sind keine Eingaben vom Anwender erforderlich. Es stehen lediglich zwei Makros im Zellbereich B7:C10 [48] zur Verfügung, mit den in der Tab. 56 aufgeführten Funktionsumfängen. Der Zellbereich B12:E18 umfasst die Legende [49] bezüglich der tabellarischen Ergebnisdarstellung der systembezogenen Wirkungsanalyse (Zellbereich G3:BS207 [50]).

Tab. 56: Makros und Funktionsumfänge im Zellbereich B7:C10 des Tabellenblatts „System-Analyse“

Makro-Bezeichnung	Funktion
Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren	Aggregierte Wirkintensitäten aller Eingabeparameter bezogen auf die zu betrachtenden Routen aus dem Zellbereich G3:BS53 (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) in den Zellbereich G107:AC157 (sortiert nach Wirkintensität) übertragen.
Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen	Ergebnisse der systembezogenen Wirkungsanalyse im Zellbereich G107:AC157 (sortiert nach Wirkintensität) löschen.

Im Zellbereich Q3:BD53 sind die aggregierten Wirkungsanalyseergebnisse je Route (sortiert nach Eingabeparameter-Nr.) aufgeführt. Diese werden automatisch aus dem Tabellenblatt „R_X Analyse“ übernommen, sofern die jeweilige Route zu berücksichtigen ist (Zelle E5 im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ = „Ja“). Anhand dieser Information werden die Gewichtungsfaktoren je Route berechnet (vgl. Zelle T5 in der Abb. 71).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Worksheet 1 (left):** 'WIRKUNGSANALYSE SYSTEM'. It contains two macro buttons: 'Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren' (cell B7) and 'Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen' (cell B12). A legend [49] defines terms like 'Wert', 'positiv', 'negativ', 'kein', 'synchron', and 'asynchron'. A red box [48] highlights the macro buttons.
- Worksheet 2 (right):** 'Wirkintensität aggregiert [%]'. It displays a table with columns: 'Nr. Eingabeparameter', 'Minimum', 'Maximum', 'Trend', 'Spannweite', 'Route 1', and 'Ja'. The table lists 34 parameters with their respective values and trends. A red box [50] highlights a specific row in the table, and a red arrow points to it.

Abb. 71: Bereich „Wirkungsanalyse“ des Tabellenblatts „R_X Analyse“ (Kennzahlenaggregation)

7 Analysemodell

Nach der Formel (7) in Abschnitt 7.4.2.2 werden daraufhin die aggregierten Wirkintensitäten sowie der jeweilige Wirkungstrend und Zusammenhang der Extremwerte der Wirkintensitäten im Zellbereich G3:P53 bestimmt. Die dafür notwendigen Hilfsspalten befinden sich im Zellbereich BE5:BS53. Die Abb. 71 zeigt das systembezogene Wirkungsanalyseergebnis nach der Durchführung der routenbezogenen Wirkungsanalyse für das Anwendungsbeispiel. Da in diesem Fall lediglich eine Route zu betrachten ist ($g_{R1} = 100\%$), stimmt das Wirkungsanalyseergebnis der Route mit dem des Systems überein. Das diesbezügliche Diagramm befindet sich im Zellbereich G56:AB103.

Das Makro „Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren“ [48] überträgt das Ergebnis der Aggregation aus dem Zellbereich G3:BS53 in den Zellbereich G107:AC157, wo es sortiert nach absoluter aggregierter Wirkintensität dargestellt wird. Die Hilfsspalten im Zellbereich R109:AC157 dienen der automatischen Trendberechnung und Diagrammerstellung gemäß Abschnitt 7.4.2.2. Das Diagramm befindet sich im Zellbereich G160:AA207 und dient auf Systemebene als Basis für die Interpretation der Analyseergebnisse.

Das Makro „Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen“ löscht das Ergebnis der systembezogenen Wirkungsanalyse im Zellbereich G107:AC157. Das ist beispielsweise erforderlich, wenn die routenbezogene Wirkungsanalyse hinsichtlich der Bewertungskriterien angepasst wird.

7.6 Beispielhafte Anwendung des Analysemodells

Im Rahmen der Analyse sind die Wirkintensitäten bezogen auf diejenigen Kennzahlen zu erfassen und zu interpretieren, die für den Anwender von besonderer Bedeutung sind. Der Systematik des verwendeten zielorientierten Lösungsansatzes folgend (vgl. Abschnitt 4.2), ist es zweckmäßig, bereits an dieser Stelle die im Rahmen der multikriteriellen Entscheidungsfindung als Bewertungskriterien auszuwählenden Kennzahlen sowie deren Gewichtungsfaktoren zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 8.4.2). Dies fördert nicht nur die *Einfachheit* und *Nachvollziehbarkeit*, sondern stellt auch sicher, dass die Kennzahlenauswahl und -gewichtung möglichst unabhängig von Analyseergebnissen und potentiellen Optimierungsmaßnahmen erfolgt und damit der Anforderung nach *Objektivität* gerecht wird.

Die Analyse des Routenzugsystems für das Anwendungsbeispiel soll zwecks Übersichtlichkeit auf wenigen, besonders praxisrelevanten Kennzahlen basieren. Außerdem bietet es sich in diesem Fall an, Kennzahlen aus mehreren Kategorien und mit unterschiedlichen Einheiten zu verwenden, um verschiedene Arten von Wertfunktionen im Rahmen der multikriteriellen Entscheidungsfindung anwenden und erläutern zu können (vgl. Abschnitt 8.4.2.3). Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen werden die in der Tab. 57 aufgeführten Kennzahlen mit den jeweiligen Optimierungsrichtungen als relevant erachtet und im Folgenden als Bewertungskriterien verwendet. Die Gewichtungsfaktoren entsprechen dem Ergebnis der Kriteriengewichtung mittels differenziertem Paarvergleich. Da dieser methodisch dem Entscheidungsmodell im

Rahmen der Optimierung zuzuordnen ist, erfolgt die Methodenauswahl und -beschreibung sowie die Anwendung auf das Beispiel im Abschnitt 8.4.2.2.

Tab. 57: Optimierungsrichtungen und Gewichtungsfaktoren ausgewählter Kennzahlen

<i>Abk.</i>	<i>Kennzahl</i>	<i>Optimierungsrichtung</i>	<i>Gewichtungsfaktor (gerundet)</i>
L-Z-4	Zykluszeit	Minimierung	0,10
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	Minimierung	0,10
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	Maximierung	0,04
W-I-1	Investitionskosten	Minimierung	0,10
W-B-1	Betriebskosten	Minimierung	0,41
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	Minimierung	0,24

Die im ersten Schritt durchzuführende Sensitivitätsanalyse basiert auf den übertragenen Eingabedaten gemäß Abschnitt 6.6.1 (vgl. auch Anhang C.2), wobei die Eingabeparameterwerte um $\pm 50\%$ (Spannweite) variiert werden. Der zweite Schritt ist die Durchführung der Wirkungsanalysen für die in der Tab. 57 aufgeführten Kennzahlen und Optimierungsrichtungen sowie die Übertragung des jeweiligen Ergebnisses in den Bereich „Kennzahlenaggregation“ unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren. Die vollständigen numerischen und grafischen Ergebnisse der sechs kennzahlbezogenen Wirkungsanalysen sind im Anhang C.3 dargestellt. Der dritte Schritt beinhaltet die Erzeugung des Ergebnisses der Kennzahlenaggregation (sortiert nach Wirkintensität), das im Folgenden als Ausgangspunkt für die Interpretation dient und dem Anhang C.1 entnommen werden kann.¹³⁷ Die optionale Parameteranalyse sowie die Wirkungsanalyse bezogen auf einen Eingabeparameter werden nach Bedarf durchgeführt. Das vollständige Ergebnis der Sensitivitäts- und Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation kann der Datei „2_Routenzug-Tool Beispiel“ im Datenanhang entnommen werden.

Anhand des Diagramms der Kennzahlenaggregation (sortiert nach Wirkintensität) lassen sich die Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Relevanz für die Optimierung beurteilen. Die Eingrenzung der Anzahl der relevanten Eingabeparameter (vgl. Abschnitt 4.2) erfolgt durch die Festlegung eines Grenzwerts hinsichtlich der absoluten Wirkintensität. Unter Berücksichtigung der Extremwerte der Wirkintensitäten aller Eingabeparameter werden für das Beispiel die Eingabeparameter mit einer absoluten Wirkintensität größer fünf Prozent als relevant erachtet. Die Abb. 72 verdeutlicht die Eingrenzung der Anzahl der Eingabeparameter für das Anwendungsbeispiel grafisch anhand eines Diagrammausschnitts (vgl. Anhang C.1).

Hinsichtlich des Grenzwerts der absoluten Wirkintensität ist zu beachten, dass dieser stets individuell festzulegen ist, weil die aggregierten Wirkintensitäten bei Mehrrountensystemen ten-

¹³⁷ Da es sich bei dem Anwendungsbeispiel um ein Einrountensystem handelt, ist das routenbezogene und systembezogene Analyseergebnis identisch (vgl. Abschnitt 7.5.2).

7 Analysemodell

denziell niedriger sind (vgl. Abschnitt 7.2.2.4) und ihre Werte zudem von der gewählten Spannweite der Eingabeparameterwerte im Rahmen der Sensitivitätsanalyse abhängen (vgl. Abschnitt 7.2.2.3). Deshalb sind auch die Wirkintensitäten relativ zueinander zu beurteilen.

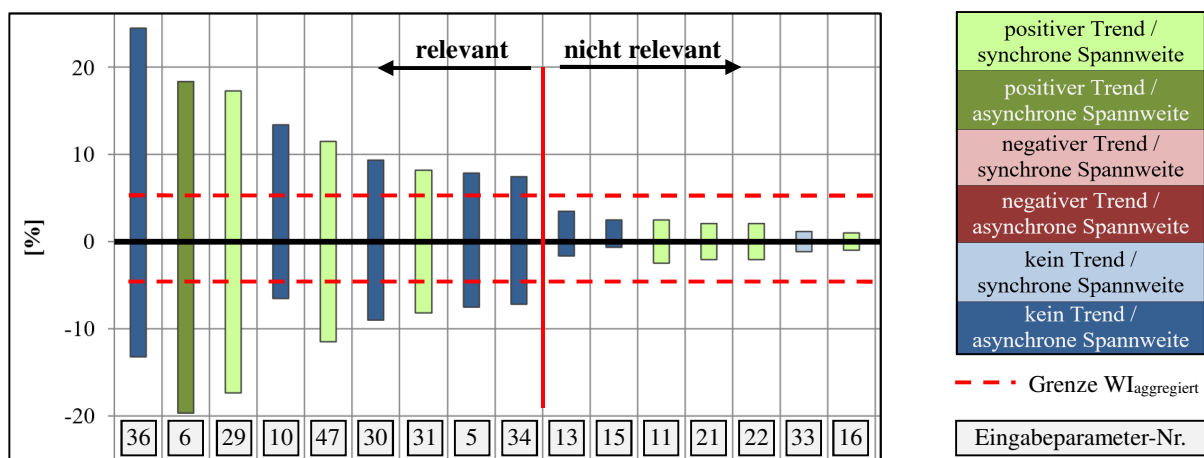


Abb. 72: Eingrenzung der Anzahl der relevanten Eingabeparameter für das Anwendungsbeispiel

Die Abb. 73 zeigt das numerische Wirkungsanalyseergebnis (Kennzahlenaggregation) für die als relevant eingestufteten Eingabeparameter des Anwendungsbeispiels. Bezogen auf diese Eingabeparameter sind Wirkungsanalysen durchzuführen, um die Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte zu überprüfen. In den Abschnitten 7.4.2.1.2 und 7.5.1.3 wurde die Vorgehensweise im Excel-Tool sowie das Ergebnis für den *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstand* bereits ausführlich dargestellt.

Wirkintensität aggregiert [%]		Summe Gewichtung ($\Sigma g_k = 100\%$)				100%
Nr.	Eingabeparameter	Minimum	Maximum	Absolut	Trend	Spannweite
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-13,2	24,5	24,5	kein	asynchron
6	Durchsatz	-19,7	18,4	19,7	positiv	asynchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-17,3	17,3	17,3	positiv	synchron
10	Fahrgeschwindigkeit	-6,6	13,5	13,5	kein	asynchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	-11,5	11,5	11,5	positiv	synchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-9,0	9,4	9,4	kein	asynchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	-8,2	8,2	8,2	positiv	synchron
5	Routenlänge	-7,5	7,8	7,8	kein	asynchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-7,2	7,4	7,4	kein	asynchron

Abb. 73: Numerisches Wirkungsanalyseergebnis (Kennzahlenaggregation) für das Anwendungsbeispiel

Anhand der zusammengefassten Ergebnisse der Realisierbarkeitsprüfungen der neun relevanten Eingabeparameter in der Tab. 58 ist ersichtlich, dass auch die Erhöhung des *Durchsatzes* zu ungünstigen Kennzahlenwerten führt (Überschreitung des *maximal möglichen Tourenstartabstands* bzw. *kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug* $> 100\%$). Im Umkehrschluss weist das auf die geringe Robustheit des Routenzugsystems gegenüber Kapazitätsschwankungen hin (vgl. Abschnitt 6.7). Die Wirkungsanalyse bezogen auf den *Durchsatz* erfordert zusätzlich die Überprüfung der Kennzahlenwerte bei der Reduzierung der Eingabeparameterwerte (Zellen G730 bis K730 im Excel-Tool rot markiert). Die manuelle Überprüfung zeigt, dass in diesen Fällen

die durchsatzabhängigen Kennzahlen *Liefertermintreue* und *Liefermengentreue* > 100 % sind. Das liegt daran, dass deren Zählerwerte (*Anzahl termin- bzw. mengentreuer Transportaufträge*) nicht antizipierbar sind (vgl. Abschnitt 6.3.2) und deshalb unverändert aus dem Tabellenblatt „R_X Eingabe“ übernommen werden. Die Reduzierung des *Durchsatzes* ist somit durchaus realisierbar.

Tab. 58: Überprüfung der Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf Basis der Analyse

Nr. Eingabeparameter	Eingabewerte Parameter [%]										
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	o	o	o	o	o	o	x	x	x	x	x
6 Durchsatz	o	o	o	o	o	o	x	x	x	x	x
29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
10 Fahrgeschwindigkeit	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
47 Ergonomie Entladevorgänge	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
5 Routenlänge	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

In vielen Fällen ist es offensichtlich, ob ein Eingabeparameterwert im Rahmen der Optimierung reduziert oder erhöht werden soll. Beispielsweise wird der Anwender bestrebt sein, die *Lohnkosten der Mitarbeiter pro Jahr* zu reduzieren. Mit Blick auf die Optimierungsrichtungen der Kennzahlen in der Tab. 57 (überwiegend Minimierung) und die Wirkungstrends gemäß der Abb. 73, sind die Werte der Eingabeparameter mit eindeutig positivem Wirkungstrend nach Möglichkeit zu reduzieren, weil dies die Kennzahlenwerte verkleinert (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.3).

Diejenigen Eingabeparameter, die keinen eindeutigen Wirkungstrend aufweisen, sollten kennzahlbezogen analysiert werden, insbesondere, wenn die Extremwerte der Wirkintensitäten asynchron zueinander sind. Die *Fahrgeschwindigkeit* beispielsweise wirkt auf fünf der sechs Kennzahlen und weist stets nichtlineare Kurvenverläufe der Wirkintensitäten auf (vgl. Abschnitt 7.4.1). Dabei wirkt die Reduzierung der *Fahrgeschwindigkeit* in allen Fällen besonders stark gegenüber einer Erhöhung. Vor dem Hintergrund, dass sie bezogen auf die Kennzahl *Punktwert Multiple-Lasten-Tool* (mit hohem Gewichtungsfaktor) einen positiven Wirkungstrend aufweist, ist an dieser Stelle keine eindeutige Aussage bezüglich der Zweckmäßigkeit der Veränderungsrichtung möglich.¹³⁸ Demgegenüber weist die Routenlänge überwiegend lineare

¹³⁸ Die Reduzierung der *Fahrgeschwindigkeit* führt zu einer Erhöhung der *Zykluszeit* und der *Anzahl der Mitarbeiter*. Da die (unveränderten) Tätigkeiten im Routenzugsystem von allen Mitarbeitern in gleichem Maße ausgeführt werden (vgl. Abschnitt 6.4.1.7), reduziert sich die körperliche Belastung für den einzelnen Mitarbeiter.

Kurvenverläufe der Wirkintensitäten auf, sodass anhand der Gewichtungsfaktoren und Analyseergebnisse erkennbar ist, dass nur die Reduzierung der Routenlänge zielführend ist.

Die beispielhaft dargelegte Untersuchung der Wirkungen von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf Kennzahlenebene ist grundsätzlich empfehlenswert, weil die Aussagekraft des Wirkungsanalyseergebnisses der Kennzahlenaggregation durch die Abstrahierung zwangsläufig eingeschränkt ist (Informationsverlust). Das gilt insbesondere für Mehrroustensysteme. Die Wirkungsanalyse bezogen auf eine Kennzahl ermöglicht zudem die Bestimmung zweckmäßiger Veränderungsrichtungen von Eingabeparameterwerten und dient damit der Identifizierung von Stellgrößen zur Zielerreichung und der Bestimmung potentieller Optimierungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 8.2). Die Tab. 59 zeigt das Ergebnis der Beurteilung von Veränderungen der Eingabeparameterwerte hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit für das Anwendungsbeispiel. Diese ist unabhängig von der Realisierbarkeit zu beurteilen, weshalb auch die Erhöhung des *realisierter bzw. festgelegten Tourenstartabstands* im Zuge der Bestimmung potentieller Optimierungsmaßnahmen zu berücksichtigen ist.

Tab. 59: Beurteilung von Veränderungen der Eingabeparameterwerte hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit

		<i>Richtung der Veränderung</i>	
		Reduzierung	Erhöhung
		o = zweckmäßig	
		x = unzweckmäßig	
<i>Nr. Eingabeparameter</i>			
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	o	o
6	Durchsatz	o	x
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	o	x
10	Fahrgeschwindigkeit	o	o
47	Ergonomie Entladevorgänge	o	x
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	o	x
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	o	x
5	Routenlänge	o	x
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	o	x

7.7 Verifikation und Validierung

Gegenüber dem Bewertungsmodell weist das Analysemodell verhältnismäßig wenige unterschiedliche Arten von Berechnungsformeln auf, die allerdings häufig nacheinander anzuwenden sind. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der V&V des Analysemodells zunächst auf der Überprüfung der Korrektheit der Makro-Programmierung und der durch die verwendeten Makros erzeugten Ergebnisse, bevor diese wiederum hinsichtlich ihrer Eignung für die Analyse von Routenzugsystemen beurteilt werden. Die V&V der Makro-Programmierung erfolgt bereits während der Implementierung durch Code-Inspektionen und Debugging mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen zwecks Identifizierung von Syntax-, Semantik- und Logikfehlern (vgl. Abschnitt 6.8).

Aufgrund der Struktur des Analysemodells und dem daraus resultierenden Aufbau des Excel-Tools bietet es sich an, zunächst den Analysebereich „Sensitivitätsanalyse“ zu verifizieren.

Trotz der Vielzahl der Systemkonfigurationen und Kennzahlenwerte ist der Aufwand diesbezüglich verhältnismäßig gering, weil einerseits lediglich ein Eingabeparameterwert je Systemkonfiguration variiert wird („ceteris paribus“-Prinzip) und andererseits die Kennzahlenwerte des bereits verifizierten und validierten Bewertungsmodells übertragen werden. Beispielsweise sind die Eingabeparameterwerte des Analysemodells in der Eingabeparametermatrix (Zellbereich G34:TC220 im Tabellenblatt „R_X Analyse“) durch einfache Excel-Funktionen (z. B. MITTELWERT oder HÄUFIGKEIT) zeilenweise hinsichtlich ihrer Identität mit den Eingabeparameterwerten des Bewertungsmodells kontrollierbar. Dafür bieten sich insbesondere Grenzwerttests mit Spannweiten von Null und 100 % an.

Hinsichtlich der Kennzahlenmatrix wird nach der Durchführung der Sensitivitätsanalyse überprüft, ob alle Zellen tatsächlich Werte enthalten. Des Weiteren werden zufällig ausgewählte Systemkonfigurationen unterschiedlicher Ein- und Mehrrountensysteme manuell in das Tabellenblatt „R_X Eingabe“ kopiert und die resultierenden Kennzahlenwerte mit denen in der Kennzahlenmatrix verglichen. Die in Abschnitt 7.5.1.1 beschriebene Konsistenzprüfung dient zur Identifizierung ungültiger Kennzahlenwerte. Deren bewusste Erzeugung ermöglicht den Vergleich mit den Ergebnissen der Konsistenzprüfung des Bewertungsmodells (vgl. Abschnitt 6.6.2.3). Die Zellmarkierung (rote Füllung) erfolgt in diesem Fall durch makrogesteuerte Einfärbung der Zellen.

Die hinterlegten Formeln in den Zellen der Wirkintensitätenmatrix werden zum einen dahingehend überprüft, ob alle Wirkintensitäten vor der Durchführung der Sensitivitätsanalyse den Wert Null annehmen (Kennzahlenmatrix enthält keine Werte). Zum anderen erfolgt nach der Durchführung der Sensitivitätsanalyse der Vergleich mit manuellen Berechnungsergebnissen für ausgewählte Zellen. Deren Identifizierung wird durch die Einfärbung von Zellen mit Wirkintensitäten ungleich Null unterstützt (bedingte Formatierung). In diesem Zuge wird außerdem kontrolliert, ob die Zellen jeweils mindestens eine und höchstens zwei „Spuren zum Vorgänger“ (Zellen in Kennzahlenmatrix) aufweisen. Anhand der Kennzahlen- und Wirkintensitätenmatrizen lässt sich zudem die Struktur des Analysemodells kontrollieren, weil jede Zelle genau 55 „Spuren zum Nachfolger“ (Parameteranalyse) aufweisen muss.¹³⁹

Im Bereich „Parameteranalyse“ sind zunächst die Berechnungsfelder hinsichtlich der „Spuren zum Vorgänger“ gemäß der Beschreibung im vorherigen Abschnitt zu untersuchen. Zudem werden die mittels der Excel-Funktion SVERWEIS abgerufenen Kennzahlenwerte und Wirkintensitäten auf Korrektheit überprüft. Dies geschieht manuell durch die Auswahl unterschiedlicher Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen, wobei jeder Eingabeparameter und jede Kennzahl mindestens einmal vorkommt und jeder Eingabeparameter mindestens eine Kennzahl beeinflussen muss bzw. jede Kennzahl durch mindestens einen Eingabeparameter beeinflusst wer-

¹³⁹ Fünf Eingabeparameter-Kennzahlen-Kombinationen mit je elf Kennzahlenwerten bzw. Wirkintensitäten, die mittels der Excel-Funktion SVERWEIS abgerufen werden.

den muss (abhängig von der Systemkonfiguration). Dadurch lassen sich Syntax- und Semantikfehler ausschließen. Des Weiteren ist in diesem Zuge die Übereinstimmung der numerischen und grafischen Parameteranalyseergebnisse sicherzustellen. Anhand der grafischen Ergebnisse sind wiederum die Angaben zum Wirkungstrend und zum Zusammenhang zwischen den Extremwerten der Wirkintensitäten nachvollziehbar.

Bereits im Zuge der Analyse verschiedener Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen ist es empfehlenswert, zu prüfen, ob das Modellverhalten erklärbar ist. Bei der V&V des Bewertungsmodells ist dies bereits hinsichtlich der qualitativen Wirkung eines Eingabeparameters bezogen auf ausgewählte Kennzahlen erfolgt (Abschnitt 6.8). Anhand der Parameteranalyseergebnisse erfolgt hingegen die systematische Untersuchung des Modellverhaltens hinsichtlich der quantitativen Wirkung aller Eingabeparameter bezogen auf ausgewählte Kennzahlen. Das ist lediglich beispielhaft möglich, weshalb alle relevanten Eingabeparameter und Kennzahlen des Anwendungsbeispiels dahingehend beurteilt werden, ob ihr Wirkungszusammenhang nachvollziehbar ist. Dabei sind insbesondere nichtlineare Kurvenverläufe von Bedeutung, weil zusätzlich zum Wirkungstrend auch betriebspunktabhängige Wirkintensitäten erklärbar sein müssen (vgl. Abschnitt 7.4.1).

Der *realisierte bzw. festgelegte Tourenstartabstand* weist beispielsweise einen negativen Wirkungstrend auf, d. h. die Senkung des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* führt zu einer Erhöhung der *Betriebskosten*. Das liegt daran, dass in diesem Fall mehr Touren pro Zeiteinheit mit einer geringeren mittleren Beladung des Routenzugs pro Tour absolviert werden. Dadurch sinkt der kapazitive Nutzungsgrad des Routenzugs wohingegen dessen zeitlicher Nutzungsgrad sowie auch der der Mitarbeiter steigt. Demzufolge erhöhen sich die Personalkosten und damit einhergehend die *Betriebskosten*. Die asynchrone Spannweite der Wirkintensitäten des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* ist ein Indiz für die Nichtlinearität des entsprechenden Kurvenverlaufs. Diese resultiert einerseits aus der nichtlinearen Beeinflussung der Zykluszeit durch die Abhängigkeit der Entladezeit von der mittleren Beladung des Routenzugs pro Tour. Andererseits verhalten sich die zeitlichen Nutzungsgrade von Routenzug und Mitarbeiter antiproportional zum *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstand*.

Der negative Wirkungstrend der *Fahrgeschwindigkeit* hinsichtlich der *Betriebskosten* ist offensichtlich, da sich mit sinkender Fahrgeschwindigkeit die Fahr- und Zykluszeit erhöht, wodurch wiederum die zeitlichen Nutzungsgrade von Routenzug und Mitarbeiter und damit einhergehend die *Betriebskosten* steigen. Die Nichtlinearität des entsprechenden Kurvenverlaufs (vgl. Abb. 58 auf S. 164) hat seine Ursache im antiproportionalen Verhältnis zwischen Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit. Dies ist nicht direkt ersichtlich, zumal die Routenlänge als weiterer beeinflussender Eingabeparameter proportional zur Fahrzeit ist und somit eine synchrone Spannweite aufweist.

Die Überprüfung der Wirkungen aller Eingabeparameter auf die *Betriebskosten* gemäß der Tab. 60 führt zu dem Ergebnis, dass das Modellverhalten in diesem Fall als erklärbar bezeichnet

werden kann. In gleicher Weise werden weitere Tests mit Kennzahlen des Anwendungsbeispiels durchgeführt. Die Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass die Wirkungszusammenhänge nachvollziehbar sind und die Parameteranalyse somit geeignet ist, um Wirkungen von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf einzelne Kennzahlwerte abzubilden.

Tab. 60: Beispielhafte V&V des Analysemodells durch Erklärung von Wirkungen für das Anwendungsbeispiel (Betriebskosten)

Nr. Eingabeparameter	Wirkungstrend	Spannweite	Erklärung	Verifikation
29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Personalkosten auf.	ja
6 Durchsatz	positiv	synchron	Beeinflusst die Anzahl der Touren pro Zeiteinheit und weist proportionalen Zusammenhang mit zeitlichem Nutzungsgrad des Routenzugs und der Mitarbeiter auf.	ja
31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Personalkosten auf.	ja
36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	negativ	asynchron	Beeinflusst die Anzahl der Touren pro Zeiteinheit und weist antiproportionalen Zusammenhang mit zeitlichem Nutzungsgrad des Routenzugs und der Mitarbeiter auf. Weist antiproportionalen Zusammenhang mit Zykluszeit auf.	ja
30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Belade- und Zykluszeit auf.	ja
5 Routenlänge	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Fahr- und Zykluszeit auf.	ja
34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Entlade- und Zykluszeit auf.	ja
10 Fahrgeschwindigkeit	negativ	asynchron	Weist antiproportionalen Zusammenhang mit Fahrzeit und Zykluszeit auf.	ja
11 Investitionskosten pro Fahrzeug	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Kapitalkosten, Abschreibungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten auf.	ja
43 Summe Bestandskosten	positiv	synchron	Weist proportionalen Zusammenhang mit Betriebskosten auf.	ja
...

Legende:

positiv	= positiver Wirkungstrend
negativ	= negativer Wirkungstrend
synchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min-/Max-Wert der Wirkintensitäten < 1%
asynchron	= betragsmäßige Abweichung zwischen Min-/Max-Wert der Wirkintensitäten > 1%

Die Verifikation im Bereich „Wirkungsanalyse“ vereinfacht sich dadurch, dass die bereits verifizierten Ergebnisse der Parameteranalyse genutzt werden, sodass die Wirkungsanalyseergebnisse für alle Eingabeparameter und Kennzahlen lediglich hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den Parameteranalyseergebnissen zu kontrollieren sind. In gleicher Weise ist zu prüfen, ob die Ergebnisse im Rahmen der Kennzahlenaggregation korrekt übertragen werden. Die in Abschnitt 7.5.1.3 beschriebene Konsistenzprüfung dient zur Identifizierung ungültiger Kennzahlenwerte durch deren bewusste Erzeugung und den Vergleich mit der Kennzahlenmatrix. Durch die systematische Variation von Eingabeparameterwerten wird sichergestellt, dass die numerischen und grafischen Analyseergebnisse übereinstimmen. Dies erfolgt beispielsweise durch optischen Vergleich der Balkendiagramme hinsichtlich der Balkenhöhe, der Farbgebung sowie der Zuordnung von Balken zu Eingabeparametern bzw. Kennzahlen.

Die Überprüfung der aggregierten Wirkintensitäten erfolgt zusätzlich durch den Vergleich mit manuellen Berechnungsergebnissen unter Berücksichtigung variiertener Kriteriengewichte. Diese

7 Analysemodell

werden wiederum durch bedingte Formatierungen gemäß Abschnitt 7.5.1.3 auf Konsistenz geprüft. Die Verifikation des systembezogenen Analyseergebnisses basiert auf der Anforderung, dass dieses bei einem Einroutensystem identisch mit dem routenbezogenen Analyseergebnis sein muss (7.5.2). Des Weiteren wird das übertragene Wirkungsanalyseergebnis für Mehrrountensysteme auf Übereinstimmung mit dem Tabellenblatt „R_X Analyse“ geprüft sowie die Berechnungen der gewichteten Wirkintensitäten manuell kontrolliert.

Die Anwendung der genannten V&V-Techniken stellt sicher, dass das Modell im Excel-Tool formallogisch korrekt umgesetzt ist, dass die Eingabeparameter-, Kennzahlen- und Wirkintensitätenmatrizen konsistent und widerspruchsfrei sind und dass deren Daten im Rahmen der Parameter- und Wirkungsanalyse korrekt abgerufen werden. Aufbauend darauf ist zu prüfen, ob die Ergebnisse der Kennzahlenaggregation basierend auf der Parameteranalyse erklärbar sind. Hierfür eignet sich die Gegenüberstellung der Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Rangfolgen im Zuge der Wirkungsanalyse. Die Tab. 61 listet die Eingabeparameter nach absteigender aggregierter Wirkintensität auf, wobei jeweils die Ränge der Eingabeparameter bei kennzahlbezogener Wirkungsanalyse für das Anwendungsbeispiel angegeben sind (vgl. Anhang C.3 und C.1).

Tab. 61: Rangfolgen der Eingabeparameter je Kennzahl für das Anwendungsbeispiel (sortiert nach aggregierter Wirkintensität)

Nr. Eingabeparameter	Abk. Kennzahl	L-Z-4 Zykluszeit	L-R-6 Anzahl Mitarbeiter	L-M-8 Gesamtnutzungsgrad	W-I-1 Investitionskosten	W-B-1 Betriebskosten	Q-E-1 Punktwert Multiple-Lasten-Tool
36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand		3	3	4		4	3
6 Durchsatz		2	1	1		2	2
29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr						1	
10 Fahrgeschwindigkeit		6	7	8		8	4
47 Ergonomie Entladevorgänge							1
30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)		1	4	5		5	5
31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)			2			3	
5 Routenlänge		4	5	6		6	6
34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)		5	6	7		7	7
13 Anzahl Anhänger je Fahrzeug				2	4	16	
...

Legende: X = Rang des Eingabeparameters (kennzahlbezogene Wirkungsanalyse)

Grundsätzlich muss jeder im Rahmen der Kennzahlenaggregation relevante Eingabeparameter zumindest bei einer kennzahlbezogenen Wirkungsanalyse von Relevanz sein. Die Überprüfung aller Eingabeparameter bestätigt dies für das Anwendungsbeispiel. Darüber hinaus muss die resultierende Rangfolge nach aggregierter Wirkintensität anhand der kennzahlbezogenen Rangfolgen nachvollziehbar sein. Daher sollten Eingabeparameter mit niedrigen Rängen (kennzahlbezogen) in der Tab. 61 weiter oben aufgeführt sein.

Tendenziell ist dies erkennbar, wobei zu berücksichtigen ist, dass durch die Verwendung der betragsmäßigen Extremwerte der Wirkintensitäten (vgl. Abschnitt 7.4.2.1.3) Rangfolgeänderungen auftreten können. Das trifft beispielsweise auf den *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstand* und den *Durchsatz* zu. Trotz der durchgängig höheren Ränge des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* ist dieser als relevantester Eingabeparameter ausgewiesen, was auf dessen asynchrone Spannweite der Extremwerte zurückzuführen ist. Eingabeparametern mit dieser Eigenschaft (z. B. Fahrgeschwindigkeit) kommt im Zuge der Kennzahlenaggregation tendenziell eine höhere Bedeutung zu. Ein gegenteiliger Effekt liegt nicht vor, sodass durch die Eingrenzung der Anzahl der relevanten Eingabeparameter durch die Festlegung des Grenzwerts der absoluten Wirkintensität (vgl. Abschnitt 7.6) stets alle tatsächlich relevanten Eingabeparameter berücksichtigt werden.

Die angewandten V&V-Techniken stellen die korrekte Transformation der Ergebnisse aus dem Bewertungsmodell in das Analysemodell sicher und bestätigen überdies die Nachvollziehbarkeit des Analyseergebnisses. Abschließend ist zu beurteilen, ob das Modell grundsätzlich für die Analyse von Routenzugsystemen als Basis für deren Optimierung geeignet ist.

Die vorgestellte Verfahrensweise bietet die Möglichkeit Wirkungen von Veränderungen der Eingabeparameterwerte auf Kennzahlenwerte für eine Vielzahl geplanter bzw. bestehender Routenzugsysteme zielorientiert identifizieren, quantifizieren und übersichtlich darstellen zu können. Darauf aufbauend lassen sich die Eingabeparameter hinsichtlich ihrer Relevanz für die Optimierung beurteilen. Das entwickelte Excel-Tool ermöglicht dabei die Durchführung der aufwendigen Analysen mittels Makros in akzeptabler Zeit (vgl. Tab. 62). Es unterstützt zudem die Überprüfung der Realisierbarkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte. Das Analysemodell ist somit validiert und für den Einsatz im Rahmen der Optimierung geeignet.

Tab. 62: Mittlere Laufzeiten ausgewählter Makros des Analysemodells¹⁴⁰

Makro-Bezeichnung	Laufzeit	Bemerkung
Sensitivitätsanalyse durchführen	170,7 s	Je Route einmal durchzuführen.
Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen	13,8 s	Je Route und relevanter Kennzahl einmal durchzuführen.
Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen	27,7 s	Je Route und relevantem Eingabeparameter einmal durchzuführen.

¹⁴⁰ Die mittleren Laufzeiten beziehen sich auf jeweils zehn Durchläufe mit der im Anhang B.1 aufgeführten Konfiguration des PC-Systems.

8 Optimierungsmodell

8.1 Modellbildung und -struktur

Das Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Modells zur Identifizierung von potentiellen Optimierungsmaßnahmen basierend auf dem Analyseergebnis sowie zur Auswahl der zweckmäßigen Maßnahmen unter Berücksichtigung individueller Zielgrößen auf Basis einer Entscheidungsregel (vgl. Abschnitt 4.1).

Im Gegensatz zum Bewertungs- und Analysemodell ist die softwaretechnische Umsetzung des Optimierungsmodells nicht erforderlich. Das liegt zum einen daran, dass im Rahmen der Optimierung zwischen den Teilmodellen keine umfangreichen Datenübermittlungen oder Berechnungen stattfinden, zum anderen sind die Identifizierung von potentiellen Optimierungsmaßnahmen und die Überprüfung deren Wirkungen nicht sinnvoll automatisierbar. Das ist darin begründet, dass es eine Vielzahl möglicher Optimierungsmaßnahmen gibt, deren Eignungen und Wirkungen einzelfallabhängig und somit vom Anwender individuell zu beurteilen sind (vgl. Abschnitte 8.2 und 8.3).

Bei der Modellbildung ist darauf zu achten, dass einerseits die Optimierung auf dem Analyseergebnis basiert und andererseits die Entscheidungsfindung auf der Grundlage der relevanten Kennzahlen erfolgt. Demzufolge sind sowohl das Analyse- als auch das Bewertungsmodell in das Optimierungsmodell zu integrieren und um ein geeignetes Entscheidungsmodell zu ergänzen. Die sich ergebende Modellstruktur mit den jeweiligen Teilmodellen geht aus der Abb. 74 hervor. Es ist ersichtlich, dass die Entscheidungsfindung lediglich auf den relevanten Kennzahlenwerten aus dem Bewertungsmodell basiert. Damit wird die Erfüllung der im Abschnitt 4.3 gestellten Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Objektivität* und *Nachvollziehbarkeit* des Modells sichergestellt.

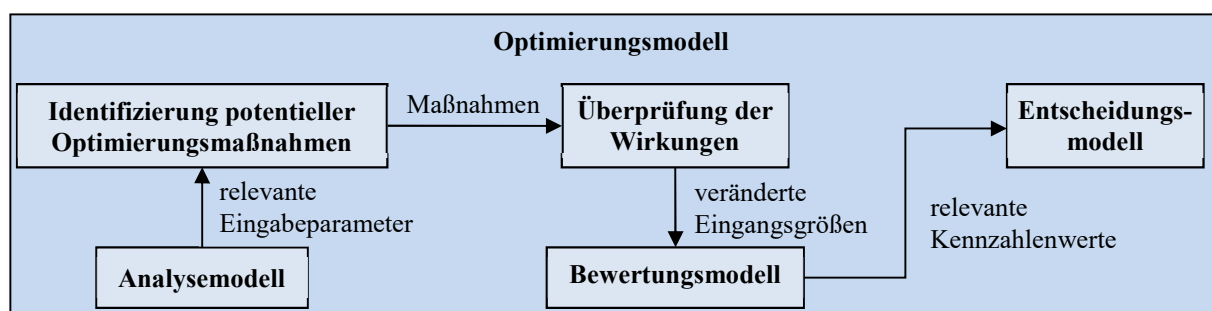


Abb. 74: Struktur und Zusammenhang der Teilmodelle des Optimierungsmodells

8.2 Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen

Das Ziel dieses Abschnitts ist die Bestimmung von Ansatzpunkten zur Beeinflussung der identifizierten Stellgrößen für die Optimierung (relevante Eingabeparameter) und die Formulierung

konkreter Maßnahmen, die unter Berücksichtigung individueller Randbedingungen realisierbar und geeignet erscheinen. Dies dient, nach der bereits erfolgten Eingrenzung der Anzahl der relevanten Eingabeparameter und deren zweckmäßiger Optimierungsrichtungen in Abschnitt 7.6, der weiteren Eingrenzung des Lösungsraumes für die zielorientierte Optimierung (vgl. Abschnitt 1.2).

8.2.1 Vorgehensweise

Die Beschreibungen der Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen in Kapitel 0 machen deutlich, dass deren Eignungen in der Regel von vielen Faktoren abhängig und nicht allgemeingültig formulierbar sind. Das gilt gleichermaßen für Gestaltungsempfehlungen bzw. Optimierungsmaßnahmen mit Blick auf individuelle Zielvorstellungen, weshalb es nicht möglich ist, alle potentiellen Optimierungsmaßnahmen und deren Wirkungen in dieser Arbeit darzulegen. Daher werden im Folgenden denkbare Ansatzpunkte zur Beeinflussung der relevanten Eingabeparameter des Anwendungsbeispiels dargestellt und geeignete Maßnahmen für diesen Fall beispielhaft untersucht. Dies erlaubt die Beschreibung der grundlegenden Vorgehensweise bei der Optimierung, ohne jedoch den Anforderungen nach *Vollständigkeit* und *Allgemeingültigkeit* des Modells zu widersprechen (vgl. Abschnitt 4.3).

Die Bestimmung von Ansatzpunkten zur Beeinflussung von Eingabeparametern erfolgt auf Basis der umfassenden Beschreibungen der Gestaltungsmerkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen in Kapitel 0. Diese Wissensbasis unterstützt den Anwender einerseits durch die Benennung von Vor- und Nachteilen, Anwendungsvoraussetzungen und Eignungen der Gestaltungsmöglichkeiten und andererseits durch das Aufzeigen möglicher Wirkungen auf das Systemverhalten bei deren Umsetzung. Überdies ist es sinnvoll, die Definitionsblätter der Kennzahlen im Anhang A.1 bis A.4 einzubeziehen sowie das zu optimierende Routenzugsystem individuell hinsichtlich weiterer Ansatzpunkte für die Optimierung zu untersuchen. Die Analyse von (relevanten) Prozesszeiten in Bezug auf ihre Bestandteile bei bestehenden Routenzugsystemen ermöglicht beispielsweise die Identifizierung von Verbesserungspotentialen, die womöglich nicht direkt ersichtlich sind (z. B. Verringerung von Informations- oder Suchzeiten).

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, das Analyseergebnis hinsichtlich der Realisierbarkeit und Zweckmäßigkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte einzubeziehen, um lediglich diejenigen Ansatzpunkte zu erfassen, die die Eingabeparameter in der gewünschten Weise beeinflussen (vgl. Abschnitt 7.6). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Maßnahmen in der Regel nicht nur singuläre Einflüsse auf einzelne Eingabeparameter haben, weshalb die Abschätzung der Einflüsse von Maßnahmen auf unterschiedliche Eingangsgrößen (Systemgestaltung und Eingabeparameter) notwendig ist. Von besonderer Bedeutung sind dabei Maßnahmen, die mehrere der als relevant identifizierten Eingabeparameter beeinflussen, insbesondere wenn sich diese antiproportional zu relevanten Kennzahlen verhalten. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass sich die Wirkungen bei der gleichzeitigen Variation der Werte mehrerer Eingabeparameter maßgeblich verstärken können [MARTINI ET AL. 2015, S. 70].

Des Weiteren ist der Umfang der Beeinflussbarkeit der Eingabeparameter im Anwendungsfall abzuschätzen, weil die gewählte Spannweite der Eingabeparameterwerte (hier: $\pm 50\%$) womöglich nicht ohne weiteres realisierbar ist. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Kombination mehrerer Maßnahmen unter Umständen ein geeignetes Mittel sein kann, um die gewünschten Eingabeparameterwerte realisierbar zu machen (vgl. nachfolgende Ausführungen).

8.2.2 Optimierungsmaßnahmen für das Anwendungsbeispiel

Der **realisierte bzw. festgelegte Tourenstartabstand** wird durch das Gestaltungsmerkmal „Steuerung Tourenstart“ beeinflusst (vgl. Abschnitt 5.2.5). Für alle Steuerungsarten gelten im Beispiel die Grenzen $t_{TA,min} = 14$ min und $t_{TA,max} = 31,6$ min, wobei angenommen wird, dass die Touren auch weiterhin nach festem Fahrplan gestartet werden sollen. Gemäß der Tab. 59 in Abschnitt 7.6 ist sowohl die Senkung als auch die Erhöhung des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* als Optimierungsansatz zu überprüfen.

Die Senkung des Tourenstartabstands ist in diesem Fall ohne weiteres realisierbar (vgl. Abschnitt 7.6), wohingegen die Erhöhung des Tourenstartabstands nur um 1,6 min möglich ist. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der maximale Tourenstartabstand von der Transportkapazität des Routenzugs abhängig ist [VDI 2016c, S. 8], ist deren Erhöhung auf sechs Anhänger je Routenzug ein Ansatzpunkt, um die Erhöhung des Tourenstartabstands trotzdem realisieren zu können. Im Beispiel ist allerdings die Anzahl der Anhänger je Routenzug auf maximal fünf begrenzt (vgl. Abschnitt 6.6.1), sodass die Kombination aus der Erhöhung der Transportkapazität und des Tourenstartabstands keine potentielle Optimierungsmaßnahme darstellt.

Prinzipiell ist der **Durchsatz** als Eingangsgröße bzw. Anforderung auf Systemebene als Summe der routenbezogenen Durchsätze vorgegeben und stellt für den Anwender somit keine Stellgröße zur Optimierung dar. Auf Routenebene bzw. routenübergreifend betrachtet besteht hingegen durchaus die Möglichkeit den Durchsatz durch das Gestaltungsmerkmal „Anzahl der Routen“ bzw. die Änderung der Zuordnung von Bereitstellorten zu Routen zu beeinflussen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Letzteres ist zwar nicht Gegenstand der Arbeit, sollte aber vom Anwender im Rahmen der Optimierung zumindest als Ansatzpunkt erwogen werden. Beispielsweise könnten, zwecks Senkung des routenbezogenen Durchsatzes, Bereitstellorte einer anderen Route zugeordnet werden.

Da es sich beim Anwendungsbeispiel um ein Einroutensystem handelt, setzt die Zuordnung von Bereitstellorten zu einer anderen Route die Bestimmung einer weiteren Route voraus (sogenannte „Routensplittung“). Bei einer verhältnismäßig kurzen Route (hier: 500 m) und dem Einsatz lediglich eines Routenzugs ist diese Maßnahme nicht zweckmäßig und daher zu verwerfen.

Die **Lohnkosten der Mitarbeiter pro Jahr** sind in der Regel nicht oder nur in geringem Umfang beeinflussbar. Deren Relevanz im Anwendungsbeispiel verdeutlicht allerdings, dass die

direkt von den Lohnkosten abhängigen Personalkosten (vgl. Kennzahl W-B-9 im Anhang A.3) ebenfalls relevant sein müssen, was durch den hohen Anteil der Personalkosten (85 %) an den Betriebskosten deutlich wird (vgl. Abschnitt 6.7). Die gewünschte Senkung der Personalkosten ist durch die Reduzierung der Anzahl der Mitarbeiter realisierbar. Aus der Wirkungsanalyse der Kennzahl „Anzahl Mitarbeiter“ (vgl. Anhang C.3) geht hervor, dass die diesbezüglich relevanten Eingabeparameter implizit berücksichtigt werden, weshalb auf deren Beeinflussung nicht separat eingegangen werden muss. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Senkung der Personalkosten ist die Automatisierung von Prozessen gemäß den Gestaltungsmerkmalen „Art der Steuerung“ des Fahrzeugs (vgl. Abschnitte 5.1.2.1) und „Be- und Entladetechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Die Erhöhung des Automatisierungsgrades geht in der Regel mit hohen Investitionskosten einher (vgl. Abschnitte 5.1.2.1 und 5.1.3) und ist daher nur lohnenswert, wenn sich Prozesse häufig wiederholen und die Automatisierungstechnik hoch ausgelastet ist. Im Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein „kleines“ Routenzugsystem mit lediglich einer Route und einem Routenzug, weshalb die Automatisierung nicht zweckmäßig erscheint. Hinzu kommt, dass das Investitionsbudget im Beispiel auf maximal 50.000 € limitiert sein soll¹⁴¹, wodurch die Automatisierung von Prozessen als potentielle Optimierungsmaßnahme auszuschließen ist.

Die **Fahrgeschwindigkeit** wird durch das Gestaltungsmerkmal „Transportmittel“ (vgl. Abschnitt 5.1.2), die Routenführung und durch Unternehmensvorgaben beeinflusst. Die Fahrzeugtechnik bestimmt beispielsweise die maximal erreichbaren Fahrgeschwindigkeiten, wobei die Obergrenze in der Regel unternehmensspezifisch vorgegeben ist und meist unterhalb der theoretisch möglichen Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs liegt. Die Anhängertechnik bestimmt insbesondere die realisierbare Kurvengeschwindigkeit, die umso höher ist, je spurtreuer und stabiler das verwendete Lenksystem ist (vgl. Tab. 15 auf S. 55). Die mittlere Fahrgeschwindigkeit wird maßgeblich dadurch beeinflusst, ob und in welchem Umfang die Fahrgeschwindigkeit entlang der Route reduziert werden muss. Denkbare Ansatzpunkte zur Optimierung diesbezüglich sind beispielsweise die Verbreiterung von Fahrwegen zur Ermöglichung von Überholvorgängen und Begegnungsverkehr [HARRIS ET AL. 2003, S. 72; HOMOLKA 2016, S. 23], die Verminderung der Anzahl von Kurven und Kreuzungen oder die Einführung von Vorfahrtsregelungen [HOMOLKA 2016, S. 26].

Für das Beispiel sind sowohl Maßnahmen zur Reduzierung wie auch zur Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zu untersuchen (vgl. Abschnitt 7.6). Die Verringerung der Fahrgeschwindigkeit um 50 % ist ohne weiteres dadurch möglich, dass der Routenzug durchgängig mit geringerer Geschwindigkeit fährt (zunächst ohne Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Zykluszeit). Demgegenüber ist die Erhöhung der (mittleren) Fahrgeschwindigkeit durch Verwendung

¹⁴¹ Diese Annahme wird getroffen, um einerseits die Komplexität im Rahmen der Maßnahmenidentifizierung zu reduzieren (Erhöhung der Anschaulichkeit) und andererseits die Vielseitigkeit von Wertfunktionen im Zuge der Entscheidungsfindung zu verdeutlichen (vgl. Abschnitt 8.4.2.3).

einer anderen Transportmitteltechnik aufgrund von vorgegebenen Kurven- und Maximalgeschwindigkeiten nicht realisierbar. Da es sich um ein Einroutensystem mit lediglich einem Routenzug handelt, sind Maßnahmen zur Veränderung der Routenführung nicht erfolversprechend und bleiben daher im Folgenden unberücksichtigt.

Hinsichtlich der **Ergonomie der Entladevorgänge** sind diejenigen Ansatzpunkte relevant, die die Wichtungen der Leitmerkmale des MLT beeinflussen (vgl. Anhang B.3). Dazu zählen die Gestaltungsmerkmale „Ladungsträger“ (vgl. Abschnitt 5.1.1), „Anhänger“ (vgl. Abschnitt 5.1.2.2), „Be- und Entladetechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.3) und „Bereitstelltechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.4). Die Verbesserung der Ergonomie kann mit Blick auf das Anwendungsbeispiel (An- und Abkuppeln von Anhängern am Bereitstellort) durch die Verwendung von Anhängern mit Rollenverschiebesystem und Rollenbahnen an den Bereitstellorten erreicht werden. Die (Teil-)Automatisierung von Entladeprozessen durch entsprechende Anhänger- bzw. Entladetechnik ist ebenfalls denkbar. Unabhängig von diesen prozessverändernden Maßnahmen besteht die Möglichkeit, die Wichtungen der Leitmerkmale z. B. durch ein anderes Rollenmaterial oder eine andere Rollenordnung zu beeinflussen [KEUNTJE 2016, S. 120 ff.].

Die aufgeführten Maßnahmen hinsichtlich der Umgestaltung von Anhänger-, Entlade- und Bereitstelltechniken sind aufgrund verhältnismäßig hoher Investitionsbedarfe mit Blick auf die Investitionsgrenze von 50.000 € nicht realisierbar. Die Senkung der Wichtungen der Leitmerkmale durch beispielsweise andere Rollen, erscheint insbesondere vor dem Hintergrund der bereits niedrigen Wichtungswerte (vgl. Anhang C.1) und dem bereits geringen Ergonomiepunktwert im Ist-Zustand (vgl. Abb. 54 auf S. 145) nicht notwendig.

Die **Dauer eines Beladevorgangs (integriert)** ist in vielerlei Hinsicht beeinflussbar. Das technische Gestaltungsmerkmal „Transportmittel“ (vgl. Abschnitt 5.1.2) erscheint in Bezug auf das Beispiel vor allem im Hinblick auf die Art der Kupplung als relevant (Zeitbedarf für das An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes im Lager). Die (Teil-)Automatisierung des Beladeprozesses durch entsprechende Anhänger-, Entlade- bzw. Bereitstelltechnik ist ebenfalls denkbar (vgl. Abschnitte 5.1.3 und 5.1.4). Das organisatorische Gestaltungsmerkmal „Integration Beladung“ (vgl. Abschnitt 5.2.6) beeinflusst sowohl die Anzahl der Beladevorgänge als auch deren Dauer, weshalb die Eignung der vollständigen Integration der Beladeprozesse in die Tour (Routenzugfahrer belädt Routenzug selbst) zu beurteilen ist. Die „Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess“ (vgl. Abschnitt 5.2.9) ist dahingehend zu überprüfen, ob die Anzahl und Dauer der Beladevorgänge durch die Wahl eines alternativen Gestaltungsmerkmals womöglich verringert werden kann. Die individuelle Analyse des Beladeprozesses gibt weitere Hinweise für potentielle Optimierungsansätze, z. B. zur Verkürzung von Informations- und Suchzeiten durch Informationsbereitstellung auf Hand-Terminals oder Tablets (vgl. Abschnitt 8.5).

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass durch den Wechsel der Kupplungsart immer noch der Anhängerverbund im Lager an- und abgekuppelt werden muss und der hohe Zeitbedarf

dafür nicht allein aus der Betätigung der Kupplung resultiert, ist diese Maßnahme im Beispiel nicht erfolgversprechend. Demgegenüber ist die Integration der Beladung in die Tour als zweckmäßig einzustufen, weil dadurch das An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes überflüssig ist. Dafür spricht auch, dass die Zykluszeit im Anwendungsbeispiel nicht der limitierende Faktor des Systems ist und sich die physische Belastung des Routenzugfahrers durch die Selbstbeladung mittels Gabelstapler nicht erhöht (vgl. Abschnitt 6.7). Eine weitere Maßnahme in diesem Zusammenhang ist die Bereitstellung des Anhängerverbundes inkl. Schlepper, sodass der Fahrer im Lager den leeren Routenzug gegen den vorbeladenen Routenzug tauscht (vgl. Abschnitt 5.2.9). Die zusätzliche Investition beschränkt sich in diesem Fall auf einen weiteren Schlepper, sodass die Maßnahme realisierbar und im Folgenden zu untersuchen ist.

Die **Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)** ist maßgeblich von den Gestaltungsmerkmalen „Transportmittel“ (vgl. Abschnitt 5.1.2), „Be- und Entladetechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.3), „Bereitstelltechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.4), „Integration Beladung“ (vgl. Abschnitt 5.2.6) und „Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess“ (vgl. Abschnitt 5.2.9) abhängig. Auf die erneute Darstellung und Beurteilung der Maßnahmen wird verzichtet, weil das Ergebnis dem der **Dauer eines Beladevorgangs (integriert)** gleicht.

Hinsichtlich der individuellen Analyse des Beladeprozesses für das Anwendungsbeispiel sei angenommen, dass die Möglichkeiten zur Verkürzung der Prozesszeit gering sind und daher keine potentiellen Optimierungsmaßnahmen darstellen.

Die **Routenlänge** kann durch das Gestaltungsmerkmal „Anzahl der Routen“ bzw. die Änderung der Zuordnung von Bereitstellorten zu Routen beeinflusst werden (vgl. Abschnitt 5.2.4). So ist beispielsweise die Verkürzung der Routenlänge dadurch möglich, dass bestimmte Bereitstellorte einer anderen Route zugeordnet werden und dadurch kürzere Fahrwege realisierbar sind. Bei verhältnismäßig langen Routen bietet sich unter Umständen die Routensplittung an, um einerseits den Fahrzeitanteil je Route und andererseits die Länge des Fahrwegs je Route zu verringern [MARTINI ET AL. 2016, S. 27]. Der gleiche Effekt lässt sich durch das Abkürzen von Touren erzielen, sofern das Wegenetz und die Lage der anzufahrenden Bereitstellorte je Tour dies erlauben. Die mathematische Routenoptimierung im Sinne des Operations Research bietet – insbesondere in komplexen Wegenetzen und bei vielen Bereitstellorten – die Möglichkeit, durch Neubildung der Routen deren Längen zu verringern (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Wie bereits erwähnt, ist die Zuordnung von Bereitstellorten zu einer anderen Route im Anwendungsbeispiel nicht zweckmäßig. Überdies lassen die anderen Maßnahmen zur Verkürzung der Routenlänge in einem Einroutensystem mit verhältnismäßig wenigen Bereitstellorten keinen Erfolg erwarten, weshalb sie nicht weiter betrachtet werden.

Die **Dauer eines Entladevorgangs (integriert)** ist, wie auch die Dauer eines Beladevorgangs (integriert), maßgeblich von den technischen Gestaltungsmerkmalen „Transportmittel“ (vgl. Abschnitt 5.1.2), „Be- und Entladetechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.3) sowie „Bereitstelltechnik“

8.3 Überprüfung der Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen

(vgl. Abschnitt 5.1.4) abhängig, die überwiegend hinsichtlich ihrer Beeinflussbarkeit ausgeschlossen wurden. Die miteinander in Beziehung stehenden Gestaltungsmerkmale „Informationstechnik“ (vgl. Abschnitt 5.1.5), „Materialflusssteuerungsprinzip“ (vgl. Abschnitt 5.2.2) und „Auslösung des Transportauftrags“ (vgl. Abschnitt 5.2.3) sind dahingehend zu untersuchen, ob alternative Kombinationen der Merkmalsausprägungen zur Verkürzung von Prozesszeiten beitragen können (z. B. durch Einführung von e-Kanban). Eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Informationszeit des Routenzugfahrers besteht durch die Vorgabe der „Ordnung der Ladung auf dem Routenzug“ (vgl. Abschnitt 5.2.10). Ein weiterer Ansatzpunkt zur Reduzierung der Entladedauer ist die Verkürzung der Entfernungen zwischen Haltepunkten und Bereitstellorten durch die Änderung der Zuordnung von Bereitstellorten zu Haltepunkten (vgl. Abschnitt 5.2.4).

Die Überprüfung der genannten Ansatzpunkte hinsichtlich ihrer Eignung für das Anwendungsbeispiel zeigt, dass das zu erwartende Optimierungspotential aufgrund der aktuellen Systemgestaltung (z. B. Auslösung des Transportauftrags durch EDV) und der gegebenen Eingabeparameterwerte (z. B. mittlere Entfernung zwischen Haltepunkt und Senke = 4 m) sehr gering ist. Diese unzweckmäßigen Optimierungsmaßnahmen sind daher von der weiteren Betrachtung auszuschließen.

Die Tab. 63 stellt die zu untersuchenden potentiellen Optimierungsmaßnahmen für das Anwendungsbeispiel gemäß den vorherigen Ausführungen zusammenfassend dar.

Tab. 63: Übersicht potentieller Optimierungsmaßnahmen für das Anwendungsbeispiel

Nr.	Bezeichnung	Erläuterung
1	Reduzierung Tourenstartabstand	Reduzierung des Tourenstartabstands auf $t_{TA} = 15$ min.
2	Reduzierung Fahrgeschwindigkeit	Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit auf $v_{RZ} = 3$ km/h.
3	Selbstbeladung	Vollständige Integration des Beladeprozesses in die Tour, d. h. der Routenzugfahrer kommissioniert die zu transportierenden Güter und belädt seinen Routenzug im Lager selbst (vgl. Abschnitt 5.2.6).
4	Routenzugtausch	Fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhängern, d. h. der Routenzugfahrer stellt den leeren Routenzug nach der Tour im Lager ab und übernimmt einen anderen, vorbeladenen Routenzug für die nächste Tour (vgl. Abschnitt 5.2.9).

8.3 Überprüfung der Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen

Für die potentiellen Optimierungsmaßnahmen ist zu überprüfen, welche Wirkungen durch deren Umsetzung auf die Kennzahlenwerte des Routenzugsystems resultieren. Zu diesem Zweck ist zunächst je Maßnahme ein Soll-Zustand des betrachteten Routenzugsystems zu definieren, dessen Kennzahlenwerte daraufhin anhand des Bewertungsmodells bestimmbar sind. Die Werte der relevanten Kennzahlen (vgl. Tab. 57 auf S. 185) dienen im nächsten Schritt der Entscheidung, ob die jeweilige Maßnahme zielkonform ist, d. h. ob sie im Gesamtkontext tatsächlich zu einer Verbesserung im Sinne der Zielsetzung des Anwenders führt (vgl. Abschnitt 8.4).

8.3.1 Definition von Soll-Zuständen

Bereits bei der Identifizierung der potentiellen Optimierungsmaßnahmen in Abschnitt 8.2 wurde berücksichtigt, dass diese in der Regel nicht nur singuläre Einflüsse auf einzelne Eingabeparameter haben. Die Abschätzung der Einflüsse von Maßnahmen auf unterschiedliche Eingangsgrößen (Systemgestaltung und Eingabeparameter) ist somit notwendig, um mithilfe des Bewertungsmodells belastbare Kennzahlenwerte für den Vergleich von Ist- und Soll-Zuständen des betrachteten Routenzugsystems zu bestimmen (vgl. Abschnitt 8.4). Unter Zuhilfenahme der Wissensbasis in Kapitel 0 ist dies Aufgabe des Anwenders, wobei zu berücksichtigen ist, auf welche Routen sich Veränderungen in Mehrrou­tensystemen beziehen. Beispielsweise sind Tourenstartabstände individuell je Route festzulegen, wohingegen gestalterische Änderungen in der Regel alle Routen gleichermaßen betreffen (z. B. Entkopplung von Beladeprozessen).

Grundsätzlich ist bei der Definition eines Soll-Zustands, ausgehend vom Ist-Zustand, zwischen reinen Parameterwertveränderungen und kombinierten Gestaltungs- und Parameterwertveränderungen zu unterscheiden. Reine Parameterwertveränderungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Systemkonfiguration bestehen bleibt und demzufolge im Rahmen des Bewertungsmodells bzw. Excel-Tools lediglich die durch die Optimierungsmaßnahme beeinflussten Eingabeparameterwerte anzupassen sind. Diese sind in der Regel verhältnismäßig einfach zu bestimmen, insbesondere wenn es sich lediglich um einen zu verändernden Eingabeparameterwert handelt. Im Anwendungsbeispiel trifft das auf die Soll-Zustände 1 (Reduzierung Tourenstartabstand) und 2 (Reduzierung Fahrgeschwindigkeit) zu.

Für den Soll-Zustand 1 ist zu berücksichtigen, dass durch die Reduzierung des realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands der geplante kapazitive Nutzungsgrad des Routenzugs, die Anzahl der Beladevorgänge (entkoppelt) sowie die Anzahl der Entladevorgänge (integriert) gemäß der Tab. 64 sinken, wobei diese Werte im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ vom Excel-Tool automatisch berechnet werden (vgl. Abschnitt 6.6.2.1) und nicht vom Anwender anzupassen sind.¹⁴² Es ist ersichtlich, dass durch die Halbierung des Tourenstartabstands doppelt so viele Touren pro Zeiteinheit gefahren werden, wodurch wiederum die mittlere Beladung und damit einhergehend der kapazitive Nutzungsgrad des Routenzugs auf 50 % des Ausgangswertes sinkt.

Beim Soll-Zustand 2 unterscheidet sich lediglich die *Fahrgeschwindigkeit* gemäß der Tab. 65 gegenüber dem Ist-Zustand. Die Berechnungsfelder sind nicht betroffen.

¹⁴² Aufgrund des veränderten Mitarbeiterbedarfs gegenüber dem Ist-Zustand verändert sich auch die durch das Excel-Tool berechnete *Zahl der geleisteten Arbeitsstunden* (vgl. Abschnitt 6.6.2.1) als Eingangsgröße für die Kennzahl „Unfallhäufigkeit“ (vgl. Anhang A.4). Da diese im Rahmen der Analyse und Optimierung nicht als relevantes Kriterium einbezogen wird, bleibt sie im Folgenden der Übersichtlichkeit halber unberücksichtigt.

8.3 Überprüfung der Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen

Tab. 64: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 1 gegenüber dem Ist-Zustand

<i>Merkmal</i>	<i>Merkmalsausprägung</i>	
	<i>Ist-Zustand</i>	<i>Soll-Zustand 1</i> <i>(red. Tourenstartabstand)</i>
SYSTEMPROZESSE		
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	1	1
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	360 s	360 s
Anzahl Beladevorgänge (entkoppelt)	4,75	2,38
Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	120 s	120 s
Anzahl Entladevorgänge (integriert)	4,75	2,38
Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	60 s	60 s
Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	30 min	15 min
Geplanter kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	95 %	47,5 %

Legende: Eingabefeld im Excel-Tool Berechnungsfeld im Excel-Tool

Kombinierte Gestaltungs- und Parameterwertveränderungen zeichnen sich dadurch aus, dass sich die Systemgestaltung ändert, woraus wiederum Parameterwertveränderungen resultieren. Folglich sind im Bewertungsmodell bzw. Excel-Tool zunächst die Gestaltungsalternativen auszuwählen, die den Soll-Zustand charakterisieren und anschließend die entsprechenden Eingabeparameterwerte einzugeben (vgl. Abschnitt 6.6.2.1).

Tab. 65: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 2 gegenüber dem Ist-Zustand

<i>Merkmal</i>	<i>Merkmalsausprägung</i>	
	<i>Ist-Zustand</i>	<i>Soll-Zustand 2</i> <i>(red. Fahrgeschwindigkeit)</i>
SYSTEMELEMENTE		
Fahrgeschwindigkeit (gerundet)	1,67 m/s	0,83 m/s

Legende: Eingabefeld im Excel-Tool

Beim Soll-Zustand 3 des Beispiels verändert sich aufgrund der Selbstbeladung des Routenzugs durch den Fahrer die Systemgestaltung hinsichtlich der Merkmale *Bereitstellung Quelle*, *Integration Beladung* und *Verbindung von Schleppern und Anhängern im Routenzugprozess* gemäß der Tab. 66.

Im Bewertungsmodell bzw. Excel-Tool äußert sich dies durch die Erhöhung der *Anzahl der Beladevorgänge (integriert)* auf 4,75, wohingegen keine *Beladevorgänge (entkoppelt)* mehr notwendig sind. Diese Werte werden durch das Excel-Tool automatisch berechnet (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Die darüber hinausgehende Änderung der *Dauer eines Beladevorgangs (integriert)* ist vom Anwender abzuschätzen. Im Anwendungsbeispiel ist davon auszugehen, dass der Routenzugfahrer je zu beladendem Anhänger etwas mehr Zeit benötigt als der Logistiker im Ist-Zustand, weil einerseits das Transportmittel für die Beladung gewechselt werden muss und andererseits längere Informations- und Suchzeiten unterstellt werden können. Daher wird der diesbezügliche Zeitbedarf mit 150 s je Beladevorgang bzw. Anhänger angesetzt.

8 Optimierungsmodell

Tab. 66: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 3 gegenüber dem Ist-Zustand

<i>Merkmal</i>	<i>Merkmalsausprägung</i>	
	<i>Ist-Zustand</i>	<i>Soll-Zustand 3 (Selbstbeladung)</i>
SYSTEMGESTALTUNG		
Bereitstellung Quelle	Bereitstellung auf Anhängern/ Transporthilfsmitteln	Bodenbereitstellung
Integration Beladung	entkoppelt	integriert
Verbindung von Schleppern und Anhängern im Routenzugprozess	Anhänger fix miteinander verbun- den, An- und Abkuppeln des An- hängerverbundes an/von Schlepper	fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhänger
SYSTEMPROZESSE		
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	1	4,75
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	360 s	150 s
Anzahl Beladevorgänge (entkoppelt)	4,75	0
Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	120 s	0 s
Legende:	Eingabefeld im Excel-Tool	Berechnungsfeld im Excel-Tool

Beim Soll-Zustand 4 des Beispiels verändert sich durch den Routenzugtausch im Lager die Systemgestaltung lediglich hinsichtlich des Merkmals *Verbindung von Schleppern und Anhängern im Routenzugprozess* gemäß der Tab. 67. Die aus der Prozessveränderung resultierende Verkürzung der *Dauer eines Beladevorgangs (integriert)* ist vom Anwender zu quantifizieren. In diesem Fall wird angenommen, dass der Zeitbedarf durch die Vermeidung von Ab- und Ankuppel- sowie Rangiervorgängen beim Routenzugtausch um 50 % auf 180 s gesenkt werden kann.

Tab. 67: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 4 gegenüber dem Ist-Zustand

<i>Merkmal</i>	<i>Merkmalsausprägung</i>	
	<i>Ist-Zustand</i>	<i>Soll-Zustand 4 (Routenzugtausch)</i>
SYSTEMGESTALTUNG		
Verbindung von Schleppern und Anhängern im Routenzugprozess	Anhänger fix miteinander verbun- den, An- und Abkuppeln des An- hängerverbundes an/von Schlepper	fixe Verbindung zwischen Schlepper und Anhänger
SYSTEMPROZESSE		
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	1	1
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	360 s	180 s
Legende:	Eingabefeld im Excel-Tool	Berechnungsfeld im Excel-Tool

Auf die vollständige Darstellung aller Eingangsgrößen der definierten Soll-Zustände wird an dieser Stelle aufgrund des Umfangs verzichtet. Im Excel-Tool sind die vier Soll-Zustände zwecks Nachvollziehbarkeit im Tabellenblatt „Beispiele“ als Beispiele „8“ bis „11“ hinterlegt (vgl. Datei „2_Routenzug-Tool Beispiel“ im Datenanhang).

8.3.2 Kennzahlenwerte

Die Bestimmung der Kennzahlenwerte je definiertem Soll-Zustand erfolgt durch Eingabe der jeweiligen Eingangsgrößen bzw. durch sequenzielle Auswahl der Beispiele „8“ bis „11“ im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ des Excel-Tools (vgl. Bedienungsanleitung im Anhang B.2). Bei Mehrrountensystemen ist darauf zu achten, dass die Eingangsgrößen aller zu berücksichtigender Routen im Soll-Zustand einzugeben sind. Des Weiteren sind für die nachfolgende Entscheidungsfindung die jeweiligen System-Kennzahlen heranzuziehen, wobei vom Anwender für jede Kennzahl individuell zu entscheiden ist, ob der durchschnittliche oder der summierte Kennzahlwert zugrunde gelegt wird (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Die resultierenden Kennzahlenwerte (numerisch) für die vier Soll-Zustände des Anwendungsbeispiels finden sich im Anhang C.1. Die Tab. 68 stellt die entscheidungsrelevanten Kennzahlenwerte für das Beispiel übersichtlich dar. Die Felder der Soll-Zustände sind dahingehend farblich markiert, ob eine Verbesserung, eine Verschlechterung oder keine Veränderung des Kennzahlwerts im Vergleich zum Ist-Zustand vorliegt. Es ist erkennbar, dass jeder Soll-Zustand in Bezug auf mindestens eine Kennzahl einen besseren sowie auch einen schlechteren Kennzahlwert aufweist, sodass es keinen Soll-Zustand gibt, der vom Ist-Zustand eindeutig dominiert wird bzw. diesen eindeutig dominiert [HWANG, YOON 1981, S. 58 ff.]. Für das Anwendungsbeispiel sind somit zwar die Wirkungen der potentiellen Optimierungsmaßnahmen auf die Kennzahlenwerte bekannt, es ist allerdings noch keine Aussage darüber möglich, ob und welche der Maßnahmen tatsächlich zu einer Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand führen.

Tab. 68: Übersicht entscheidungsrelevanter Kennzahlenwerte der Soll-Zustände des Anwendungsbeispiels

<i>Abk.</i>	<i>Kennzahl</i>	<i>Einheit</i>	<i>Ist-Zustand</i>	<i>Soll-Zustand 1</i> <i>(red. Tourenstartabstand)</i>	<i>Soll-Zustand 2</i> <i>(red. Fahrgeschwindigkeit)</i>	<i>Soll-Zustand 3</i> <i>(Selbstbeladung)</i>	<i>Soll-Zustand 4</i> <i>(Routenzugtausch)</i>
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5	13,9	21,5	22,4	13,5
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	1,91	2,74	2,27	1,64	1,69
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	75,0	70,2	83,4	84,8	70,0
W-I-1	Investitionskosten	[€]	32.500	32.500	32.500	29.750	44.500
W-B-1	Betriebskosten	[€]	113.078	156.070	132.045	99.724	104.758
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	19	15	17	17	20

Legende:

	≙ Verbesserung des Kennzahlwerts
	≙ keine Veränderung des Kennzahlwerts
	≙ Verschlechterung des Kennzahlwerts

8.4 Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, zunächst diejenigen Soll-Zustände zu bestimmen, die dem Anwender unter Berücksichtigung der für ihn relevanten Kennzahlen und seiner Präferenzen einen höheren Nutzen bringen als der Ist-Zustand (vgl. Abschnitt 8.4.2). Jeder dieser Zustände definiert einen Schritt auf einem Optimierungspfad durch den Lösungsraum und dient wiederum als Ausgangspunkt für die erneute Durchführung des Verfahrens bis ein zu definierendes Abbruchkriterium (z. B. keine weitere Verbesserung) erreicht wird (vgl. Abschnitt 8.4.3). Auf Basis aller sinnvollen Optimierungspfade ist es schließlich möglich, denjenigen auszuwählen, der zum Ziel-Zustand führt.¹⁴³

8.4.1 Grundlagen

8.4.1.1 Entscheidungsfindung

Allgemein ist unter Entscheidung die „Auswahl einer von mehreren möglichen Handlungsalternativen“ zu verstehen [LAUX ET AL. 2014, S. 3], wobei die Entscheidung die Bewertung der Handlungsalternativen voraussetzt. Eine Handlungsalternative ist in dieser Arbeit als Maßnahme gemäß Abschnitt 8.2 zu verstehen, die zu einem bestimmten Soll-Zustand gemäß Abschnitt 8.3 führt. Als Entscheidungshilfe dient ein Entscheidungsmodell, dessen Aufgabe es ist, die Entscheidung aus der als „Problem“ empfundenen Handlungssituation in einer formalisierten Sprache abzubilden [LAUX ET AL. 2014, S. 29].

Grundsätzlich ist, je nach Anzahl der bei der Entscheidung zu berücksichtigenden Zielgrößen, zwischen einkriteriellen und multikriteriellen Modellen zu unterscheiden [KLEIN, SCHOLL 2004]. Einkriterielle Modelle basieren auf einkriteriellen Bewertungsverfahren, zu denen beispielsweise die gängigen Verfahren der Investitionsrechnung für die wirtschaftliche Bewertung zählen [WÖHE, DÖRING 2013]. Diese werden im Folgenden nicht näher betrachtet, da sie bei der Entscheidungsfindung lediglich auf eine Zielgröße abstellen (z. B. Kosten, Amortisationsdauer oder Kapitalwert) und somit nicht für die Entscheidungsfindung auf Basis unterschiedlicher Kennzahlen geeignet sind.

Des Weiteren ist zwischen Bewertungen unter Sicherheit und Unsicherheit zu differenzieren [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 39 ff.]. Im ersten Fall sind die eintretenden Umweltzustände bekannt, d. h. das Ergebnis (System-Zustand) bei der Wahl einer Handlungsalternative ist vorhersehbar [LAUX ET AL. 2014, S. 57]. Demgegenüber sind im zweiten Fall je Handlungsalternative unterschiedliche Ergebnisse (System-Zustände) möglich, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt (Entscheidungen unter Risiko) oder nicht bekannt sind (Entscheidungen unter Unsicher-

¹⁴³ Es handelt sich hierbei um den besten der betrachteten Soll-Zustände, d. h. um ein lokales Optimum (vgl. Abschnitt 4.1). Das Auffinden des globalen Optimums ist nicht garantiert.

heit) [LAUX ET AL. 2014, S. 83]. Da es sich bei dem der Entscheidung zugrunde gelegten Bewertungsmodell um ein statisches Modell mit deterministischen Eingangsdaten handelt (vgl. Abschnitt 6.1), sind die sich ergebenden Kennzahlenwerte bei bekannten Eingangsgrößen stets eindeutig, weshalb es sich um Entscheidungen unter Sicherheit handelt.

8.4.1.2 Anforderungen an ein Entscheidungsmodell

Die Anforderungen an ein Entscheidungsmodell lassen sich aus den allgemeinen Modellanforderungen (vgl. Abschnitt 4.3) sowie der mit der Optimierung verfolgten Zielsetzung auf Basis der bereits identifizierten Optimierungsmaßnahmen und Soll-Zustände (vgl. Abschnitte 8.2 und 8.3) ableiten (vgl. Tab. 69).

Tab. 69: Anforderungen an ein Entscheidungsmodell

Zielorientierung	Ein Entscheidungsmodell soll mittels einer Entscheidungsregel die Auswahl zweckmäßiger Optimierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung individueller Zielvorstellungen ermöglichen.
Vollständigkeit	Ein Entscheidungsmodell soll alle potentiellen Optimierungsmaßnahmen und relevanten Kennzahlen berücksichtigen.
Allgemeingültigkeit	Ein Entscheidungsmodell soll hinsichtlich der Vorgehensweise unabhängig von der Systemkonfiguration und den potentiellen Optimierungsmaßnahmen sein.
Richtigkeit	Ein Entscheidungsmodell soll die Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen in Abhängigkeit individueller Zielvorstellungen korrekt bewerten.
Objektivität	Die Bewertung und Entscheidung sollte eindeutig und reproduzierbar sein.
Einfachheit	Ein Entscheidungsmodell soll übersichtlich sein und eine effiziente Bewertung von Optimierungsmaßnahmen erlauben. Die Entscheidungsregel für die Auswahl zweckmäßiger Optimierungsmaßnahmen soll möglichst einfach sein.
Genauigkeit	Ein Entscheidungsmodell soll Wirkungen von Optimierungsmaßnahmen hinreichend genau spezifizieren und bei der Bewertung verdeutlichen.
Nachvollziehbarkeit	Die Bewertung und Entscheidung soll nachvollziehbar und verständlich sein. Die Beziehungen zwischen den Optimierungsmaßnahmen und dem Bewertungsergebnis soll ersichtlich und erklärbar sein.
Änderbarkeit	Ein Entscheidungsmodell soll an geänderte Randbedingungen und Zielsetzungen flexibel anpassbar und erweiterbar sein.

8.4.1.3 Existierende multikriterielle Bewertungsverfahren

In der Literatur werden multikriterielle Bewertungsverfahren oftmals den Klassen **Multi-Objective Decision Making (MODM)** und **Multi-Attribute Decision Making (MADM)** zugeordnet [ZIMMERMANN, GUTSCHE 1991, S. 25 ff.; WEBER 1993b, S. 1; KLEIN, SCHOLL 2004, S. 327]. Bei den MODM-Verfahren ist die Menge der zulässigen Alternativen¹⁴⁴ nicht vorbestimmt und wird als stetiger Lösungsraum bezeichnet [ZIMMERMANN, GUTSCHE 1991, S. 25]. Die MADM-Verfahren sind gekennzeichnet durch eine endliche Zahl von im Voraus bekannten

¹⁴⁴ In der Literatur wird üblicherweise der allgemeine Begriff „Alternative“ verwendet, weil darunter sowohl Handlungsalternativen als auch alternative System-Zustände, Produkte o. Ä. zu verstehen sind.

Alternativen in einem diskreten Lösungsraum [ZIMMERMANN, GUTSCHE 1991, S. 25]. Da dem Entscheidungsmodell in dieser Arbeit definierte und in der Anzahl begrenzte Soll-Zustände als Alternativen zugrunde liegen, sind solche MADM-Verfahren zu betrachten.

Die **Dominanzverfahren** berücksichtigen bei der Bewertung keine Präferenzen des Anwenders hinsichtlich der Kriterien und basieren auf ordinalen Informationen über die Merkmalsausprägungen. Zu diesen Verfahren zählen beispielsweise das **Dominanz-**, **Maximin-**, **Maximax-** und **Rangfolgeverfahren** [HWANG, YOON 1981, S. 58 ff.; GERHARD 1988, S. 203 f.; KLEIN, SCHOLL 2004, S. 342 ff.]. Die Verfahren sind einfach umzusetzen, widersprechen aber den Anforderungen nach *Zielorientierung*, *Richtigkeit* und *Genauigkeit*. In diesem Zuge sind auch das **konjunktive** bzw. das **disjunktive Verfahren** als ungeeignet einzustufen. Diese berücksichtigen zwar bei der Entscheidungsfindung Anspruchsniveaus hinsichtlich der Merkmalsausprägungen, jedoch ebenfalls keine Kriteriengewichtung [LAUX ET AL. 2014, S. 78 ff.].

Die **Outranking-Verfahren** basieren auf Präferenzaussagen des Anwenders in Bezug auf Paare von Alternativen hinsichtlich der Kriterien [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 344]. Das älteste Outranking-Verfahren ist das Verfahren **ELECTRE** (Elimination Et Choix Traduisant la Realität), das die Alternativen in die Menge der dominierenden und in die Menge der dominierten Alternativen unterteilt [HWANG, YOON 1981, S. 115 ff.; KLEIN, SCHOLL 2004, S. 344 ff.; FIGUEIRA ET AL. 2005]. Der Nachteil dabei ist, dass die Alternativen nicht ohne weiteres hinsichtlich ihrer Rangfolge bzw. der relativen Güte beurteilbar sind [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 346], was der Anforderung nach *Genauigkeit* und *Nachvollziehbarkeit* widerspricht.

Das Verfahren **PROMETHEE** (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations) ermöglicht demgegenüber die Rangfolgebildung durch die Berechnung von Wertigkeiten [ZIMMERMANN, GUTSCHE 1991, S. 220 ff.]. Der Aufwand für das Erstellen der Präferenzfunktionen anhand der Differenzen der Merkmalsausprägungen je Kriterium sowie die umfangreichen Berechnungen ist allerdings sehr hoch, weshalb in der Regel spezielle Software eingesetzt wird [BRANS, MARESCHAL 2005, S. 169 ff.]. Die Anforderungen nach *Einfachheit* und *Nachvollziehbarkeit* sind somit nicht erfüllt.

Das Verfahren **TOPSIS** (Technique for Orders Preference by Similarity to Ideal Solution) basiert auf dem Prinzip, dass die beste Alternative die kleinste euklidische Distanz zur idealen Lösung und die größte euklidische Distanz zur schlechtesten möglichen Lösung haben sollte [HWANG, YOON 1981, S. 128]. Als Entscheidungsgrundlage dient die zu berechnende „relative Nähe“ jeder Alternative zur Ideallösung. Das Verfahren ist anschaulich und erfordert einen verhältnismäßig geringen Rechenaufwand, besitzt allerdings den Nachteil, dass die Distanzberechnungen stets lineare Zusammenhänge der Wertigkeiten der Merkmalsausprägungen je Kriterium unterstellen. Damit widerspricht das Verfahren je nach Kriterienauswahl und Präferenz des Anwenders der Anforderung nach *Richtigkeit*.

Das **gewichtete Produktmodell** berechnet auf Basis der Merkmalsausprägungen und Gewichtungen je Kriterium Teilwertigkeiten, die miteinander multipliziert werden und damit die Gesamtwertigkeit einer Alternative ergeben [TRIANAPHYLLOU 2000, S. 8]. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der einfachen Berechnungsweise und der Möglichkeit die ursprünglichen Werte je Kriterium ohne Normierung verwenden zu können [TRIANAPHYLLOU 2000, S. 8]. Die Aussagequalität und die Darstellungsmöglichkeiten der Bewertungsergebnisse widersprechen allerdings der Anforderung nach *Nachvollziehbarkeit*, weil die Gesamtwertigkeiten nicht auf einer einheitlichen Skala darstellbar sind [MARTINI 2009, S. 101 f.].

Bei den **Punktbewertungsverfahren** weist der Anwender den Merkmalsausprägungen der Alternativen je Kriterium Punktwerte zu, die mit dem Kriteriengewicht multipliziert und anschließend zu einem Gesamtpunktwert addiert werden [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 387 f.]. Zu diesen Verfahren zählt beispielsweise die in der Praxis weit verbreitete und vielseitig einsetzbare **Nutzwertanalyse** [ZANGEMEISTER 1976; ADAM 1996, S. 412]. Die Vorteile von Punktbewertungsverfahren sind insbesondere die einfache Berechnungsweise sowie die Möglichkeit individuelle Punkteskalen verwenden zu können [KÜHNAPFEL 2014, S. 16]. Als Nachteil ist der subjektive Einfluss der Punktevergabe durch den Anwender zu nennen [KÜHNAPFEL 2014, S. 16], was der Anforderung nach *Objektivität* widerspricht.

Der **Analytic Hierarchy Process** (AHP) vergleicht die Merkmalsausprägungen der Alternativen paarweise und relativ zueinander, wobei gemäß den Präferenzen des Anwenders Punktwerte zugeordnet werden [SAATY 2005, S. 346]. Daraufhin werden Prioritätenvektoren für die Kriterien aufgestellt und anschließend zu einer Gesamtpriorität addiert [SAATY 1980]. Das Verfahren berücksichtigt bereits bei der Kriterienauswahl und -gewichtung die gesamte Zielhierarchie [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 361] und ermöglicht die Prüfung der Präferenzen des Anwenders auf Inkonsistenzen [SAATY 2005, S. 348 ff.]. Als Nachteile sind der verhältnismäßig hohe Rechenaufwand sowie die eingeschränkte *Nachvollziehbarkeit* zu nennen. Ein wesentlicher Kritikpunkt ist die in der relativen Bewertung begründete Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses von der Menge der Alternativen, wodurch es zu Rangfolgeänderungen kommen kann [BELTON, GEAR 1983]. Das Verfahren widerspricht somit den Anforderungen nach *Richtigkeit* und *Nachvollziehbarkeit*.

Die **multiattributive Nutzentheorie** (engl.: Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)) weist den Merkmalsausprägungen der Alternativen je Kriterium Teilnutzwerte zwischen Null und Eins zu, die mit dem Kriteriengewicht multipliziert und anschließend zu einem Gesamtnutzwert addiert werden [KEENEY, RAIFFA 1993]. Gegenüber der Nutzwertanalyse erfolgt die Zuweisung der Teilnutzwerte auf der Basis von Nutzenfunktionen, die die Präferenzen des Anwenders unter Berücksichtigung aller Merkmalsausprägungen eines Kriteriums abbilden [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 347 ff.]. Alternativ sind Wertfunktionen verwendbar, deren Verläufe sich entweder durch einfache mathematische Zusammenhänge oder Schätzungen ergeben [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 384]. Die multiattributive Nutzentheorie ist bei der Verwendung von Wertfunktionen

einfach umzusetzen und vielseitig einsetzbar. Zudem ist sie gegenüber den anderen Bewertungsverfahren als objektiver und nachvollziehbarer zu beurteilen.

8.4.2 Multiattributive Nutzentheorie

8.4.2.1 Auswahl von Bewertungskriterien

Um die in Abschnitt 8.3.1 definierten Soll-Zustände mit dem Ist-Zustand vergleichen zu können, müssen Bewertungskriterien ausgewählt werden, anhand derer sich die Erfüllung der Zielvorstellung des Anwenders beurteilen lässt. Dafür stehen die aus dem Zielsystem abgeleiteten 99 Kennzahlen des Bewertungsmodells zur Verfügung (vgl. Abschnitt 6.3.2.2). Es sollten allerdings nur diejenigen Kennzahlen berücksichtigt werden, die für den Anwender von besonderer Bedeutung sind, weil mit steigender Anzahl der Kennzahlen der Aufwand für die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren steigt und deren relative Bedeutung sinkt [KÜHNAPFEL 2014, S. 8].

Bereits im Tabellenblatt „R_X Analyse“ des Excel-Tools wurde die Anzahl der Kennzahlen, die im Rahmen der Wirkungsanalyse zur Kennzahlenaggregation berücksichtigt werden können, auf zehn begrenzt (vgl. Abschnitte 7.4.2.1.3 und 7.5.1.3 bzw. Datei „1_Routenzug-Tool Vorlage“ im Datenanhang). Dadurch sind einfache Gewichtungsverfahren umsetzbar (vgl. Abschnitt 8.4.2.2), die Bewertung ist für den Anwender mit wenig Aufwand durchzuführen und das Bewertungsergebnis ist nachvollziehbarer [REFA 1990, S. 102; KÜHNAPFEL 2014, S. 10 ff.]. Der Systematik des verwendeten zielorientierten Lösungsansatzes folgend (vgl. Abschnitt 4.2), ist es zweckmäßig, die entscheidungsrelevanten Kennzahlen bereits bei der Wirkungsanalyse zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 7.6).

8.4.2.2 Gewichtung der Bewertungskriterien

Bewertungskriterien haben mit Blick auf die Zielvorstellung des Anwenders in der Regel unterschiedliche Bedeutungen, weshalb eine entsprechende individuelle Gewichtung bei der Entscheidung zu berücksichtigen ist [REFA 1990, S. 102]. Gängige Gewichtungsverfahren, auf deren detaillierte Beschreibung an dieser Stelle verzichtet wird, sind die **einfache Prozentverteilung**, die **Notenvergabe**, die **hierarchische Gewichtung**, der **Paarvergleich**, der **differenzierte Paarvergleich** und die **Eigenvektormethode** [SAATY, VARGAS 1982; MARTINI 2009, S. 26 ff.; FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 390 f.; KÜHNAPFEL 2014, S. 10 ff.]. Der differenzierte Paarvergleich bietet gegenüber den anderen Verfahren die Möglichkeit auf der Basis relativer Präferenzen hinsichtlich der Bewertungskriterien, deren Gewichtungsfaktoren mit verhältnismäßig geringem Aufwand und einfachen Berechnungsweisen zu bestimmen. Aus diesem Grund wird die Anwendung dieses Verfahrens empfohlen.

Beim differenzierten Paarvergleich werden die entscheidungsrelevanten Kennzahlen einander in einer sogenannten Paarvergleichsmatrix gegenübergestellt und es wird je Kennzahl zeilenweise überprüft, ob sie im Vergleich zu einer anderen Kennzahl wichtiger, gleich wichtig oder

unwichtiger ist. In die Zellen oberhalb der Diagonalen der Matrix werden darauf basierend Punkte gemäß einer Punkteskala eingetragen, wobei diese Bedeutungsunterschiede der Kennzahlen berücksichtigt. Die Zellen unterhalb der Matrix beinhalten die reziproken Punktwerte je Kennzahlenkombination. Die Abb. 75 verdeutlicht die Punktevergabe für ein Beispiel mit drei Kennzahlen. Die Kennzahl K_1 ist in diesem Fall minimal wichtiger als die Kennzahl K_2 und wichtiger als die Kennzahl K_3 . Die Diagonale der Matrix enthält immer den Wert Eins (gleich wichtig).¹⁴⁵

Punkteskala	
7	erheblich wichtiger
5	wichtiger
3	minimal wichtiger
1	gleich wichtig
1/3	minimal unwichtiger
1/5	unwichtiger
1/7	erheblich unwichtiger

PAARVERGLEICHSMATRIX			
Kennzahl	K ₁	K ₂	K ₃
K ₁	1	3	5
K ₂	1/3	1	3
K ₃	1/5	1/3	1

Zeilensumme		Gewichtung	
	z _K		g _K
→	9,00	9,00/14,87 =	0,61
→	4,33	4,33/14,87 =	0,29
→	1,53	1,53/14,87 =	0,10
Σ	14,87		1

Abb. 75: Beispielhafte Kennzahlengewichtung mithilfe des differenzierten Paarvergleichs

Nachdem die Paarvergleichsmatrix komplett ausgefüllt ist, wird für jede Kennzahl die Zeilensumme nach der Formel (8) sowie die Gewichtung nach der Formel (9) berechnet.

$$z_K = \sum_{s=1}^{n_s} p_{K,s} \tag{8}$$

$$g_K = \frac{z_K}{\sum_{z=1}^{n_z} z_K} \tag{9}$$

- mit
- g_K = Gewichtungsfaktor der Kennzahl K
 - K = Index der Kennzahl
 - n_s = Anzahl der Spalten
 - n_z = Anzahl der Zeilen
 - $p_{K,s}$ = Punktwert der Kennzahl K in Spalte s
 - s = Index der Spalte
 - z = Index der Zeile
 - z_K = Zeilensumme der Kennzahl K

¹⁴⁵ Es ist ersichtlich, dass der Aufwand für die Kennzahlengewichtung mit deren Anzahl überproportional steigt (Anzahl Paarvergleiche = $(n_K^2 - n_K)/2$ mit n_K = Anzahl der Kennzahlen). Während für das Beispiel mit drei Kennzahlen lediglich drei Paarvergleiche vorzunehmen sind, sind es beim Anwendungsbeispiel mit sechs Kennzahlen bereits 15 (vgl. Abschnitt 8.5) und bei zehn Kennzahlen 45. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Begrenzung der Anzahl der zu betrachtenden Kennzahlen (vgl. Abschnitte 7.6 und 8.4.2.1).

Der Systematik des verwendeten zielorientierten Lösungsansatzes folgend (vgl. Abschnitt 4.2), ist es zweckmäßig, die Kennzahlengewichtung bereits bei der Wirkungsanalyse zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 7.6).

8.4.2.3 Bestimmung von Teilnutzwerten

Gemäß der allgemeinen Beschreibung der multiattributiven Nutzentheorie in Abschnitt 8.4.1.3, wird jeder bei der Entscheidung zu berücksichtigenden Merkmalsausprägung ein Teilnutzwert zwischen Null und Eins zugeordnet. Diesem Informationsverlust durch Aufgabe der originären Dimensionen der Bewertungskriterien steht der Vorteil der dimensionenunabhängigen Vergleichbarkeit gegenüber [ADAM 1996, S. 421].

Die Bestimmung der Teilnutzwerte erfolgt im Entscheidungsmodell durch Wertfunktionen, die für jede der relevanten Kennzahlen einen Zusammenhang zwischen Kennzahlwert und Teilnutzwert herstellen. Die Abb. 76 zeigt beispielhaft zwei gebräuchliche Wertfunktionen. Die lineare Wachstumsfunktion eignet sich für Kennzahlen, bei denen der Nutzen mit steigendem Kennzahlwert zunimmt (z. B. Durchsatz). Die lineare Straffunktion eignet sich für Kennzahlen, bei denen der Nutzen linear mit steigendem Kennzahlwert abnimmt (z. B. Betriebskosten).

Darüber hinaus können individuelle Wertfunktionen in Abhängigkeit der spezifischen Gegebenheiten oder Präferenzen des Anwenders erstellt werden (vgl. Abschnitt 8.5). Der Verlauf der Wertfunktion muss dabei nicht zwangsläufig mathematisch formulierbar sein, sondern kann auch geschätzt werden [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 384; ROTH 1998, S. 90]. Die Teilnutzwerte werden in diesem Fall nicht berechnet, sondern grafisch abgelesen.

Grundsätzlich ist es empfehlenswert die Wertfunktionen ohne Berücksichtigung der Kennzahlenwerte der zu bewertenden Soll-Zustände festzulegen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Wertfunktionen beispielsweise auf Basis des Ist-Zustands erstellt, der als Referenz für die Bewertung der Soll-Zustände dient (vgl. Abschnitt 8.5). Dadurch ist eine möglichst hohe Objektivität bei der Bestimmung der Teilnutzwerte gewährleistet.

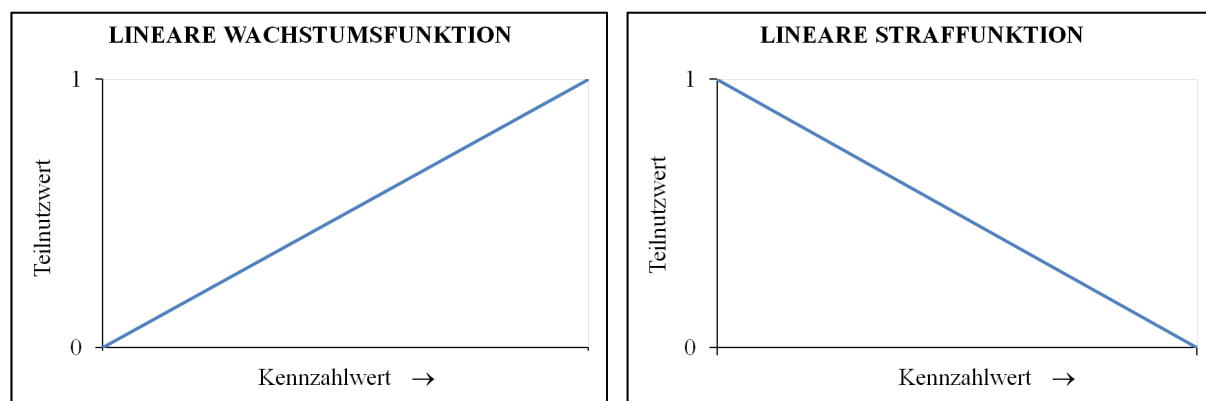


Abb. 76: Gebräuchliche lineare Wertfunktionen nach FELDHUSEN ET AL. [FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 384]

8.4.2.4 Berechnung von Gesamtnutzwerten

Die Grundversion der multiattributiven Nutzentheorie arbeitet mit einer additiven Verknüpfung der gewichteten Teilnutzwerte zu einem Gesamtnutzwert [KLEIN, SCHOLL 2004, S. 342]. Dieser verdichtet somit die aus den Merkmalsausprägungen abgeleiteten Teilnutzwerte zu einer Größe, die im Folgenden als Entscheidungsgrundlage dient.¹⁴⁶

Die Gesamtnutzwerte für den Ist- bzw. die Soll-Zustände berechnen sich nach der Formel (10) zu Werten zwischen Null (schlechtester möglicher Zustand) und Eins (Idealzustand). Damit sind die Zustände absolut wie auch relativ zueinander beurteilbar.

$$GNW = \sum_{K=1}^{n_K} (g_K \times TNW_K) \quad (10)$$

mit g_K = Gewichtungsfaktor der Kennzahl K
 GNW = Gesamtnutzwert
 K = Index der Kennzahl
 n_K = Anzahl der relevanten Kennzahlen
 TNW_K = Teilnutzwert der Kennzahl K

8.4.3 Entscheidungsfindung

Durch Anwendung einer Entscheidungsregel erfolgt die Entscheidungsfindung, d. h. die begründete Auswahl derjenigen Maßnahme, die die Zielvorstellung des Anwenders bestmöglich erfüllt [LAUX ET AL. 2014, S. 35]. Zu berücksichtigen ist dabei, dass das übergeordnete Ziel der entwickelten Methode das Aufzeigen von Optimierungspfaden durch die iterative Bewertung, Analyse und Optimierung eines Routenzugsystems ist (vgl. Abschnitt 4.2). Es handelt sich somit um ein mehrstufiges Entscheidungsproblem, für dessen Lösung und Darstellung Entscheidungsbaumverfahren geeignet sind [HILLIER, LIEBERMAN 2001, S. 764; ELLINGER ET AL. 2001, S. 12; WÖHE, DÖRING 2013, S. 514 ff.].

Der Grundgedanke eines Entscheidungsbaumverfahrens liegt darin, dass nicht alle möglichen Lösungen eines Entscheidungsproblems untersucht werden [ZIMMERMANN, STACHE 2001, S. 131]. Die gewählte Verfahrensweise ähnelt der begrenzten Enumeration, wobei die Entscheidungsregeln aufgrund der Charakteristik des Entscheidungsproblems individuell zu definieren sind.

Anhand des beispielhaften Entscheidungsbaums in der Abb. 77 ist ersichtlich, dass es unzweckmäßig ist, auf einer Stufe lediglich den Soll-Zustand mit dem höchsten resultierenden Gesamt-

¹⁴⁶ Dieses Vorgehen setzt die Substituierbarkeit von Merkmalsausprägungen voraus, d. h. die Verschlechterung hinsichtlich eines Kriteriums ist durch die Verbesserung hinsichtlich eines anderen Kriteriums ausgleichbar [ADAM 1996, S. 421].

8 Optimierungsmodell

nutzwert im Rahmen der Iteration zu betrachten, weil dadurch andere Optimierungspfade ausgeschlossen werden, die womöglich zu einer oder mehreren besseren Zuständen führen (unzweckmäßige Eingrenzung des Lösungsraumes). In diesem Fall würde beispielsweise auf der ersten Stufe der Soll-Zustand 1 mit einem Gesamtnutzwert von 0,56 für die erneute Anwendung der Methode ausgewählt und es wäre keine weitere Verbesserung möglich.

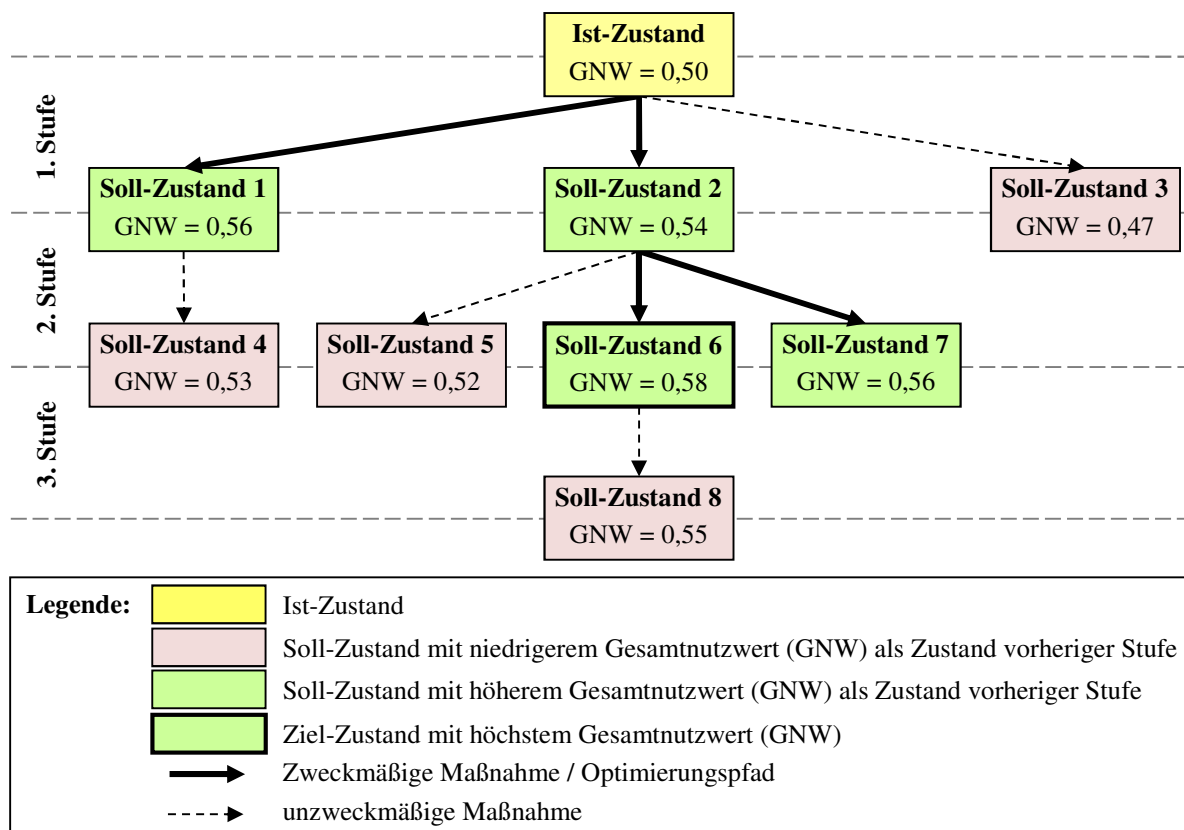


Abb. 77: Beispielhafte Darstellung der Entscheidungsfindung mittels Entscheidungsbaum

Wird hingegen der Soll-Zustand 2 ebenfalls für die erneute Anwendung der Methode ausgewählt, ist der Soll-Zustand 6 mit dem im Vergleich höchsten Gesamtnutzwert von 0,58 identifizierbar. Aus diesem Grund sind je Iteration stets alle Soll-Zustände zu berücksichtigen, die zu einem gleichen oder höheren Nutzwert gegenüber dem Zustand auf der vorherigen Stufe führen (1. Entscheidungsregel). Damit ist eine Aussage darüber möglich, welche potentiellen Optimierungsmaßnahmen tatsächlich zu einer Verbesserung im Sinne der Zielsetzung des Anwenders führen.

Maßnahmen, die zu einer Verschlechterung führen, werden ausgeschlossen, obwohl durch die erneute Anwendung der Methode ein verbesserter Soll-Zustand resultieren kann. Ein solches formales Abbruchkriterium ist notwendig, um die fortwährende Verzweigung der Äste des Entscheidungsbaums zu verhindern. Unabhängig davon ist es möglich, die Anzahl der zu betrachtenden Stufen zu begrenzen. Das ist beispielsweise sinnvoll, wenn die Anzahl der potentiellen

Optimierungsmaßnahmen je Zustand sehr hoch ist. Die Verzweigung der Äste des Entscheidungsbaums kann auch dadurch enden, dass keine potentiellen Optimierungsmaßnahmen mehr identifizierbar sind (Soll-Zustand 7).

Anhand der 1. Entscheidungsregel können die möglichen Optimierungspfade im Entscheidungsbaum aufgezeigt werden. Anhand dieser sind wiederum die resultierenden Soll-Zustände auf der jeweils höchsten Stufe identifizierbar (Soll-Zustände 1, 6 und 7). Der Soll-Zustand mit dem höchsten Gesamtnutzwert (Soll-Zustand 6) ist der gesuchte Ziel-Zustand, der die Zielvorstellung des Anwenders bestmöglich erfüllt (2. Entscheidungsregel). Weisen zwei oder mehr Soll-Zustände den gleichen Gesamtnutzwert auf, ist der Ziel-Zustand vom Anwender beispielsweise auf der Basis von qualitativen Kriterien bzw. individuellen Gegebenheiten (z. B. Transparenz oder Flexibilität hinsichtlich des Mitarbeiterereinsatzes) auszuwählen. Zudem ist der Ziel-Zustand abschließend nochmals hinsichtlich der Realisierbarkeit zu überprüfen.

8.5 Beispielhafte Anwendung des Optimierungsmodells

Bereits bei der Analyse wurden die Kennzahlen *Zykluszeit*, *Anzahl Mitarbeiter*, *Gesamtnutzungsgrad*, *Investitionskosten*, *Betriebskosten* und *Punktwert Multiple-Lasten-Tool* als Bewertungskriterien für das Anwendungsbeispiel ausgewählt, weil sie einerseits praxisrelevant sind und andererseits die Verdeutlichung unterschiedlicher Arten von Wertfunktionen ermöglichen (vgl. Abschnitt 7.6).

Die Abb. 78 zeigt für diese Kennzahlen die Paarvergleichsmatrix sowie die daraus resultierenden Gewichtungen.¹⁴⁷ Es ist erkennbar, dass den *Betriebskosten* im paarweisen Vergleich stets eine höhere Bedeutung beigemessen wird als den anderen Kennzahlen, was in einem Gewichtungsfaktor von 0,41 resultiert. Die zweitwichtigste Kennzahl ist der *Punktwert Multiple-Lasten-Tool* mit einem Gewichtungsfaktor von 0,24. Die indifferente Beurteilung von *Zykluszeit*, *Anzahl Mitarbeiter* und *Investitionskosten Gesamt* in der Paarvergleichsmatrix spiegelt sich in identischen Gewichtungsfaktoren von 0,10 wider. Dem *Gesamtnutzungsgrad* wird im paarweisen Vergleich stets eine geringere Bedeutung beigemessen als den anderen Kennzahlen, sodass sich ein Gewichtungsfaktor von 0,04 ergibt.

Die für die Teilnutzwertbestimmung erforderlichen Wertfunktionen werden für das Beispiel ausschließlich auf Basis der Kennzahlenwerte des Ist-Zustands unter Berücksichtigung individueller Gegebenheiten festgelegt (vgl. Abschnitt 8.4.2.3). Da die sechs ausgewählten Kennzahlen unterschiedliche Einheiten und Optimierungsrichtungen aufweisen (vgl. Abschnitt 7.6), resultieren daraus verschiedene Arten von Wertfunktionen, deren Verläufe aufgrund abschnittsweiser Linearität mathematisch formulierbar sind (vgl. Abb. 79 auf S. 217).

¹⁴⁷ Durchführung nach Ermessen des Autors.

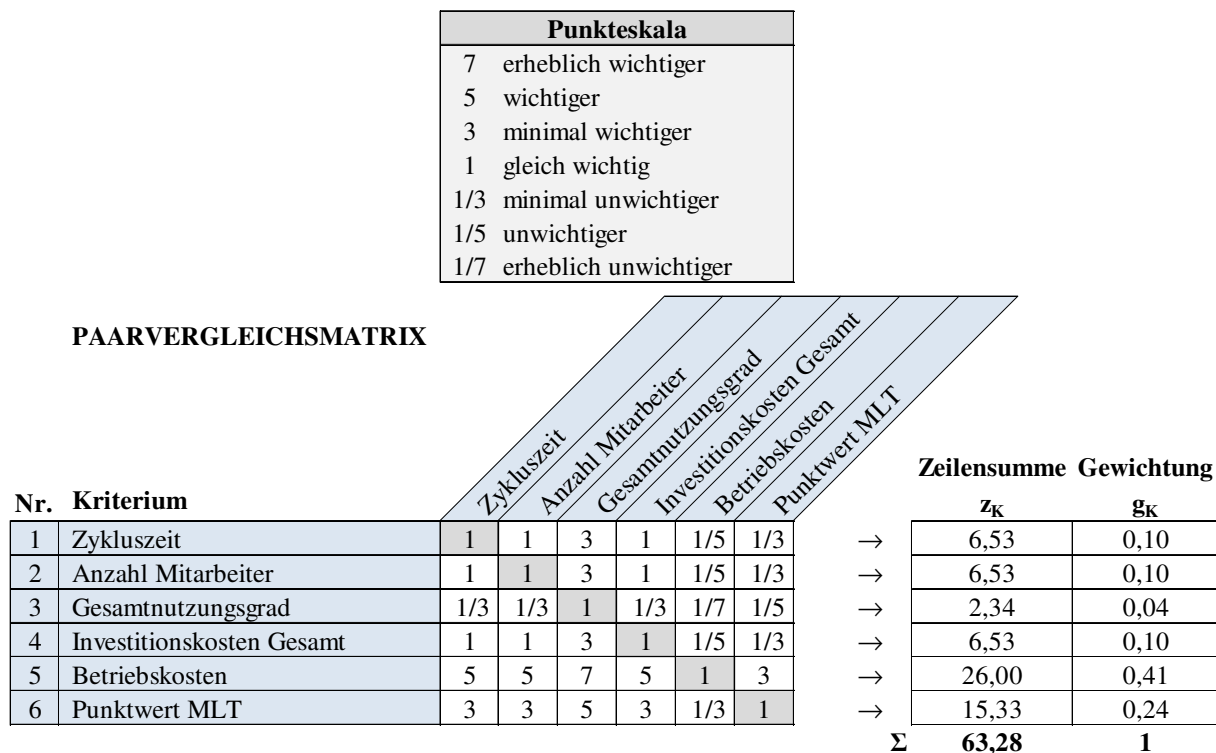


Abb. 78: Kennzahlengewichtung für das Anwendungsbeispiel

Der *Zykluszeit* wird basierend auf der Optimierungsrichtung (Minimierung) eine lineare Straffunktion zugrunde gelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teilnutzwert von Null zumindest theoretisch erreichbar sein sollte. Da die Zykluszeit immer aus der unvermeidbaren Fahrzeit, mindestens einer Be- und Entladung sowie einem Halt besteht, wird in diesem Fall einer Zykluszeit bis zehn Minuten der Teilnutzwert Eins zugeordnet. Eine Zykluszeit von mindestens 30 min soll mit Blick auf den im Ist-Zustand *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstand* (30 min) einem Teilnutzwert von Null entsprechen.

Der linearen Straffunktion der *Anzahl Mitarbeiter* ist der Teilnutzwert Eins zuzuordnen, wenn kein Mitarbeiter benötigt wird. Bei dieser Kennzahl bietet es sich an, dem Kennzahlwert im Ist-Zustand (1,91 Stk) einen Teilnutzwert von 0,5 zuzuweisen, sodass diesbezüglich Verbesserungen und Verschlechterungen gleichermaßen berücksichtigt werden können. Somit ergibt sich eine Funktion, bei der ab einem Kennzahlwert von 3,82 Stk ein Teilnutzwert von Null resultiert.

Der *Gesamtnutzungsgrad* ist zu maximieren und weist demzufolge eine lineare Wachstumsfunktion auf, wobei zu berücksichtigen ist, dass eine sehr hohe zeitliche und kapazitive Auslastung des Routenzugs kaum Reserven bei Schwankungen des Transportbedarfs bietet (vgl. Abschnitt 6.7). Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, geht die Wertfunktion in eine lineare Straffunktion über. Es ist davon auszugehen, dass ein bestimmter Wertebereich des Gesamtnutzungsgrades als ideal anzusehen ist, weshalb die Wertfunktion ein Plateau aufweist, dessen Eckpunkte auf Basis des Kennzahlwerts im Ist-Zustand bestimmt werden (75 % ± 10 %).

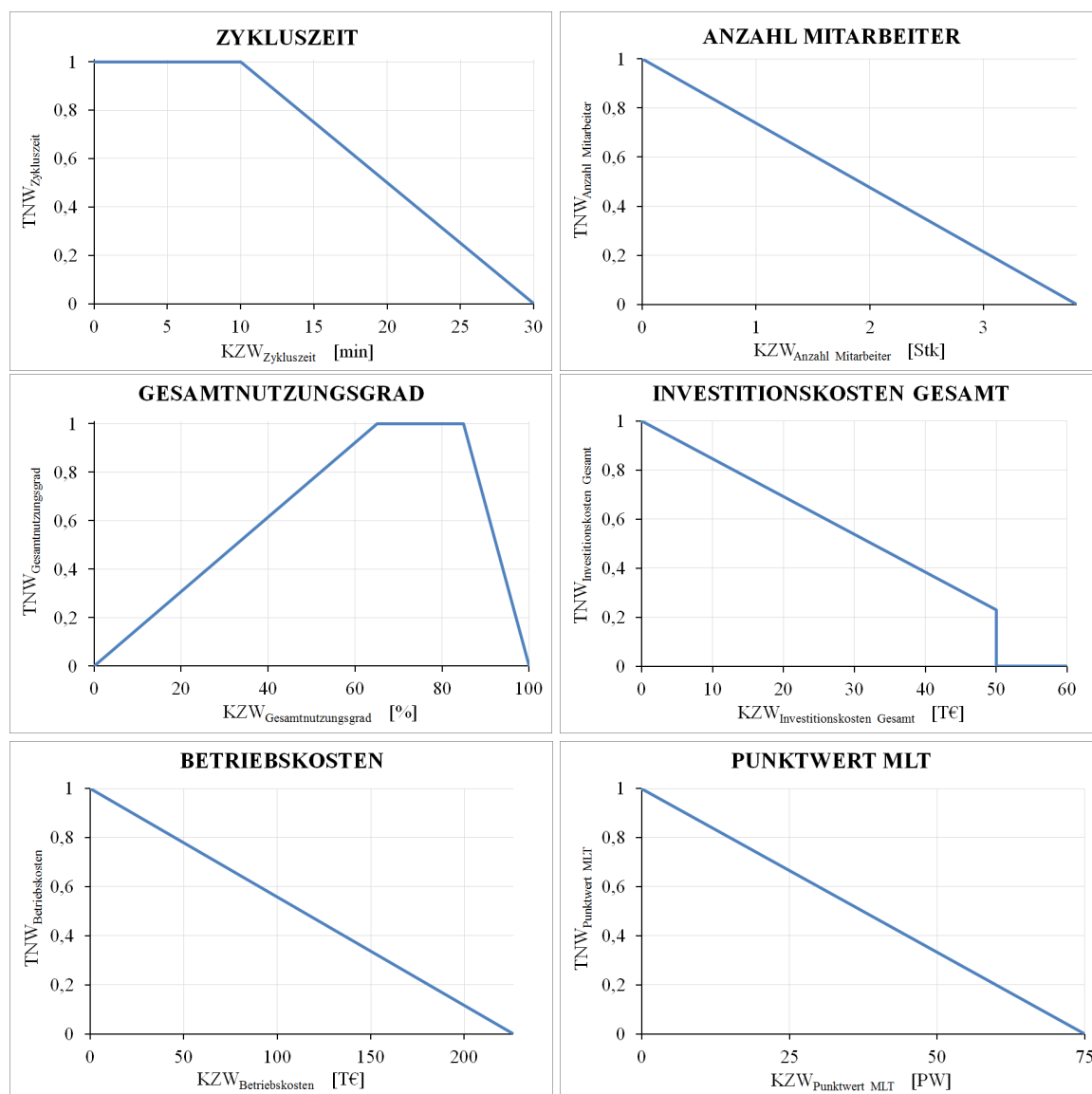


Abb. 79: Wertfunktionen der Kennzahlen für das Anwendungsbeispiel

Den *Investitionskosten Gesamt* wird eine lineare Straffunktion beginnend bei Null Euro unter Berücksichtigung des Kennzahlwerts im Ist-Zustand (32.500 €) mit einem Teilnutzwert von 0,5 zugrunde gelegt. Mit Blick auf die Annahme, dass das Investitionsbudget auf 50.000 € limitiert ist (vgl. Abschnitt 8.2.2), wird die Wertfunktion bei diesem Wert „abgeschnitten“ und allen höheren Kennzahlwerten ein Teilnutzwert von Null zugeordnet. Des Weiteren ist diese Restriktion bei der abschließenden Realisierbarkeitsprüfung des Ziel-Zustands zu berücksichtigen.

Die *Betriebskosten* weisen eine lineare Straffunktion basierend auf dem Kennzahlwert im Ist-Zustand (113.078 €) auf. Somit bekommen Betriebskosten ab 226.156 € den Teilnutzwert Null zugeordnet.

Die lineare Straffunktion der Kennzahl *Punktwert Multiple-Lasten-Tool* fußt auf der Ampel-Bewertung des MLT [IAD 2010b, S. 9], die auch im Bewertungsmodell bzw. Excel-Tool verwendet wird (vgl. Abschnitt 6.7 bzw. Datei „1_Routenzug-Tool Vorlage“ im Datenanhang).

8 Optimierungsmodell

Demnach sinkt der Teilnutzwert linear von Eins (Punktwert = 0) bis Null (Punktwert = 75). Darüberliegenden Punktwerten ist der Teilnutzwert Null zuzuordnen und es ist zu überprüfen, ob die Umsetzung des Zustands aus ergonomischer Sicht realisierbar ist.

Anhand der Wertfunktionen und der in Abschnitt 8.3.2 berechneten Kennzahlenwerte je Soll-Zustand sind die Teilnutzwerte bestimmbar. Die Abb. 80 verdeutlicht dies grafisch durch die beispielhafte Gegenüberstellung der Zykluszeiten des Ist-Zustands und des Soll-Zustands 1. So ergibt sich für die Zykluszeit im Ist-Zustand von 16,5 min ein Teilnutzwert von 0,67. Die Zykluszeit im Soll-Zustand 1 von 13,9 min resultiert in einem Teilnutzwert von 0,80. Das vollständige grafische Ergebnis der Teilnutzwertbestimmung für die Soll-Zustände 1 bis 4 findet sich im Anhang C.7. Die numerische Bestimmung der Teilnutzwerte ist anhand der Dateien „3_Nutzwerte Soll-Zustand 1“ bis „6_Nutzwerte Soll-Zustand 4“ im Datenanhang nachvollziehbar.

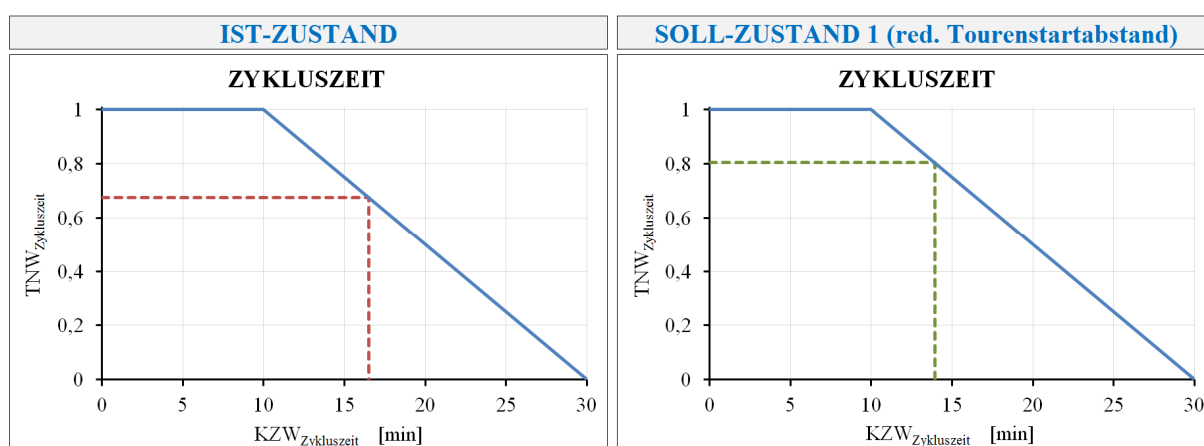


Abb. 80: Beispielhafte Teilnutzwertbestimmung für die Kennzahl *Zykluszeit* (Ist- und Soll-Zustand 1)

Die Gesamtnutzwerte des Ist-Zustands und der Soll-Zustände 1 bis 4 ergeben sich gemäß der Formel (10) (S. 213) durch Addition der mit den Kennzahlengewichtungen multiplizierten Teilnutzwerte (vgl. Abschnitt 8.4.2.4). Die Tab. 70 zeigt dies beispielhaft für den Ist-Zustand und den Soll-Zustand 1. Für den Ist-Zustand ergibt sich ein Gesamtnutzwert von 0,60, wohingegen der Soll-Zustand 1 lediglich mit einem Gesamtnutzwert von 0,52 bewertet wird. Es ist erkennbar, dass der geringfügigen Verbesserung hinsichtlich der *Zykluszeit* und des *Punktwerts MLT* eine massive Verschlechterung der *Anzahl Mitarbeiter* und insbesondere der *Betriebskosten* gegenübersteht. Die Reduzierung des *realisierten bzw. festgelegten Tourenstartabstands* führt demnach in der Gesamtschau zu einer Verschlechterung, sodass die Maßnahme mit Blick auf die Zielsetzung des Anwenders unzweckmäßig ist (vgl. Abschnitt 6.7).

Die Gesamtnutzwertberechnungen für die Soll-Zustände 2 bis 4 können dem Anhang C.7 entnommen werden. Während der Soll-Zustand 2 mit einem Gesamtnutzwert von 0,53 ebenfalls als unzweckmäßig zu beurteilen ist, sind die Soll-Zustände 3 und 4 mit einem Gesamtnutzwert von jeweils 0,61 als zweckmäßig zu beurteilen und somit als neue Ausgangszustände für die iterative Optimierung zu verwenden (1. Entscheidungsregel).

8.5 Beispielhafte Anwendung des Optimierungsmodells

Tab. 70: Beispielhafte Gesamtnutzwertberechnung für den Ist- und Soll-Zustand 1

Kennzahl	Einheit	g _K	IST-ZUSTAND			SOLL-ZUSTAND 1 (red. Tourenstartabstand)		
			KZW _{K,Ist}	TNW _{K,Ist}	g _K x TNW _{K,Ist}	KZW _{K,Soll 1}	TNW _{K,Soll 1}	g _K x TNW _{K,Soll 1}
Zykluszeit	[min]	0,10	16,5	0,67	0,07	13,9	0,80	0,08
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,91	0,50	0,05	2,74	0,28	0,03
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	75,0	1,00	0,04	70,2	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	32.500	0,50	0,05	32.500	0,50	0,05
Betriebskosten	[€]	0,41	113.078	0,50	0,21	156.070	0,31	0,13
Punktwert MLT	[PW]	0,24	19	0,75	0,18	15	0,79	0,19

$$\text{GNW}_{\text{Ist}} = 0,60 \qquad \qquad \qquad \text{GNW}_{\text{Soll 1}} = 0,52$$

Die Analyse des Soll-Zustands 3 (Selbstbeladung) führt zu dem Ergebnis, dass unter Beibehaltung des Grenzwerts der absoluten Wirkintensität von fünf Prozent (vgl. Abschnitt 7.6), acht Eingabeparameter als relevant einzustufen sind (vgl. Anhang C.8). Unter Berücksichtigung der Realisierbarkeit und Zweckmäßigkeit von Veränderungen der Eingabeparameterwerte, scheint in diesem Fall lediglich die Verkürzung der *Dauer eines Beladevorgangs (integriert)* als potentielle Optimierungsmaßnahme in Frage zu kommen. Dies könnte im Anwendungsbeispiel dadurch realisiert werden, dass dem Routenzugfahrer z. B. über ein Tablet Informationen über die Lagerorte der zu verladenden Ladungsträger im Lager zur Verfügung gestellt werden, um Informations- und Suchzeiten zu reduzieren (vgl. Abschnitt 8.2.2). Unter der Annahme, dass daraus je Beladevorgang eine Zeitersparnis von ca. 15 s sowie zusätzliche Investitionen, Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten gemäß der Tab. 71 resultieren¹⁴⁸, ergibt sich das im Anhang C.1 dargestellte Bewertungsergebnis. Der Gesamtnutzwert für den Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet) berechnet sich darauf basierend zu 0,62 (vgl. Anhang C.11). Die Maßnahme ist somit als zweckmäßig zu beurteilen und wiederum als neuer Ausgangszustand für die iterative Optimierung zu verwenden.

Tab. 71: Veränderte Eingangsgrößen des Soll-Zustands 5 gegenüber dem Soll-Zustand 3

Merkmal	Merkmalsausprägung	
	Soll-Zustand 3 (Selbstbeladung)	Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet)
SYSTEMPROZESSE		
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	4,8	4,8
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	150 s	135 s
WEITERE EINGABEPARAMETER		
Summe sonstiger Investitionen	2.000 €	6.000 €
Summe sonstiger Abschreibungen	500 €	1.300 €
Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	200 €	800 €

Legende: Eingabefeld im Excel-Tool Berechnungsfeld im Excel-Tool

¹⁴⁸ Annahmen: 1.000 € Investition für Hardware, 3.000 € Investition für Software und Programmierung, fünf Jahre Nutzungsdauer (≙ 800 € Abschreibung), 15 % Wartungs- und Reparaturfaktor (≙ 600 € Wartungs- und Reparaturkosten).

Unter der Annahme, dass basierend auf dem Analyseergebnis des Soll-Zustands 5 (vgl. Anhang C.12 bzw. Datei „7_Nutzwerte Soll-Zustand 5“ im Datenanhang) keine weiteren potentiellen Optimierungsmaßnahmen identifizierbar sind, ergibt sich der in der Abb. 81 dargestellte Entscheidungsbaum mit den Optimierungspfaden zu den Soll-Zuständen 4 und 5. Der Soll-Zustand 5 weist mit 0,62 den höchsten Gesamtnutzwert auf und ist damit der gesuchte Ziel-Zustand, der die Zielvorstellung bestmöglich erfüllt (2. Entscheidungsregel) und zudem unter Berücksichtigung vorhandener Restriktionen (z. B. Begrenzung des Investitionsbudgets) realisierbar ist. Die Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand resultiert überwiegend aus der Senkung des Mitarbeiterbedarfs um ca. 18 % und der damit einhergehenden Betriebskostensenkung um ca. 14 %, die aufgrund ihrer hohen Bedeutung die Zykluszeiterhöhung von knapp 28 % kompensiert.

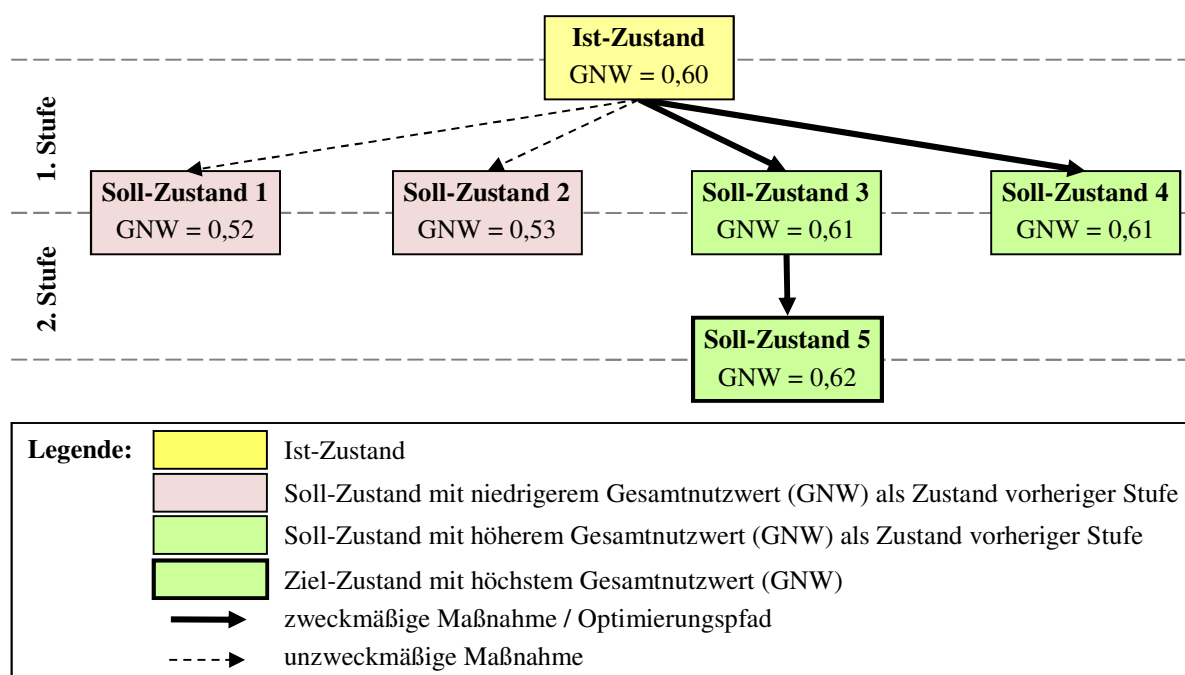


Abb. 81: Entscheidungsbaum für das Anwendungsbeispiel

8.6 Verifikation und Validierung

Die V&V weist einen verhältnismäßig geringen Umfang auf, weil das Optimierungsmodell einerseits die bereits validierten Modelle zur Bewertung und Analyse integriert und andererseits aufgrund einfacher Berechnungsweisen im Entscheidungsmodell keine umfangreiche softwaretechnische Umsetzung erfordert (vgl. Abschnitt 8.1).

Die Verifikation im Zuge der Definition von Soll-Zuständen erfolgt implizit durch die im Bewertungsmodell implementierten Konsistenzprüfungen zur Aufdeckung von Widersprüchen (vgl. Abschnitt 6.6.2.3). Die jeweiligen Eingabeparameterwerte werden zudem qualitativ und nach Möglichkeit quantitativ hinsichtlich ihrer Erklärbarkeit überprüft. Dies ist aufgrund der Individualität der Randbedingungen und Zielvorstellung (vgl. Abschnitt 8.2.1) für das Anwendungsbeispiel bereits im Abschnitt 8.3.1 erfolgt. Zudem sind die auf Basis der definierten Soll-

Zustände 1 und 2 berechneten Kennzahlenwerte in Abschnitt 8.3.2, aufgrund der singulären Variation eines Eingabeparameterwerts hinsichtlich ihres Wirkungstrends, mit dem Wirkungsanalyseergebnis im Anhang C.3 zu vergleichen.

Die Verifikation des Entscheidungsmodells umfasst zunächst die Prüfung der formalen Korrektheit der Kennzahlengewichtung dahingehend, ob die Gewichtungsfaktoren Werte zwischen Null und Eins annehmen und ob die Summe der Gewichtungsfaktoren Eins beträgt. Die Überprüfung der Teilnutzwertbestimmung erfolgt durch den Vergleich der numerisch berechneten Teilnutzwerte mit den grafisch ermittelten Teilnutzwerten gemäß Anhang C.7 und C.11. Für die Teil- und Gesamtnutzwerte ist überdies sicherzustellen, dass stets Werte zwischen Null und Eins resultieren.

Die Konsistenz und Erklärbarkeit der Kennzahlengewichtung ist anhand der Werte in den Feldern der Paarvergleichsmatrix und der Rangordnung der Gewichtungsfaktoren beurteilbar. Beispielsweise weist die Zeile der Kennzahl *Betriebskosten* in der Paarvergleichsmatrix für das Anwendungsbeispiel durchgängig Werte größer Eins auf, sodass daraus zwangsläufig der höchste Gewichtungsfaktor resultieren muss (vgl. Abb. 78 auf S. 216). Gleichermaßen muss der *Gesamtnutzungsgrad* im Vergleich den niedrigsten Gewichtungsfaktor aufweisen usw.

Die Konsistenzprüfung der Gesamtnutzwertberechnung erfolgt durch Grenzwerttests (Variation der Gewichtungsfaktoren und Kennzahlen- bzw. Teilnutzwerte). Die Tab. 72 zeigt einen solchen Grenzwerttest für die Kennzahlen- bzw. Teilnutzwerte ausgehend vom Ist-Zustand des Anwendungsbeispiels. Dadurch kann die Frage beantwortet werden, ob das Modellverhalten erklärbar ist. Beispielsweise muss sich die Verbesserung eines Kennzahlwerts innerhalb der Grenzwerte in der Verbesserung des Teil- und Gesamtnutzwerts widerspiegeln. Des Weiteren müssen sich die Teil- und Gesamtnutzwerte im gleichen Verhältnis wie die Kennzahlengrenzwerte verändern, weil einerseits die Wertfunktionen abschnittsweise linear sind (vgl. Abb. 79 auf S. 217) und andererseits die Teilnutzwerte einer additiven Verknüpfung unterliegen (vgl. Formel (10) auf S. 213).

Zusätzlich erfolgen Sensitivitätsanalysen zum Vergleich von mehreren Systemzuständen hinsichtlich der Entwicklung ihrer Gesamtnutzwerte und Rangfolgen bei Veränderung mehrerer Kennzahlenwerte. Dadurch wird insbesondere die Substituierbarkeit von Kennzahlenwerten verifiziert. Darunter ist die für additive Nutzwertmodelle charakteristische Fähigkeit zu verstehen, die Verschlechterung eines Kennzahlwerts durch die Verbesserung eines anderen Kennzahlwerts ausgleichen zu können [ADAM 1996, S. 421].

Der Einsatz der V&V-Techniken stellt sicher, dass dem Entscheidungsmodell erklärbare Eingangsdaten aus dem Bewertungs- und Analysemodell zugrunde liegen und diese korrekt in das Entscheidungsmodell transformiert werden. Zudem ist sichergestellt, dass das Entscheidungsmodell formallogisch korrekt umgesetzt ist und dass die Kennzahlengewichtungen, Teil- und Gesamtnutzwerte konsistent, widerspruchsfrei und nachvollziehbar sind. Abschließend ist zu

8 Optimierungsmodell

beurteilen, ob das Modell grundsätzlich für die Optimierung von Routenzugsystemen geeignet ist.

Tab. 72: Beispielhafter Grenzwertest der Kennzahlenwerte des Ist-Zustands für das Anwendungsbeispiel

<i>Teilnutzwerte</i>		<i>Zykluszeit</i>			...	<i>Gesamtnutzungsgrad</i>					...	<i>Punktwert MLT</i>		
<i>Ist-Zustand</i>		<i>[min]</i>			...	<i>[%]</i>					...	<i>[PW]</i>		
<i>Kennzahl</i>	<i>g_K</i>	10	16,5	30	...	0	65	75	85	100	...	0	19	75
Zykluszeit	0,10	1	0,67	0	...	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	...	0,67	0,67	0,67
Anzahl Mitarbeiter	0,10	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50
Gesamtnutzungsgrad	0,04	1,00	1,00	1,00	...	0	1,00	1,00	1,00	0	...	1,00	1,00	1,00
Investitionskosten	0,10	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50
Betriebskosten	0,41	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	...	0,50	0,50	0,50
Punktwert MLT	0,24	0,75	0,75	0,75	...	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	...	1	0,75	0
		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Gesamtnutzwert =		0,63	0,60	0,53	...	0,56	0,60	0,60	0,60	0,56	...	0,66	0,60	0,42

Legende:

- = Verbesserung des Teil- bzw. Gesamtnutzwerts
- = keine Veränderung des Teil- bzw. Gesamtnutzwerts
- = Verschlechterung des Teil- bzw. Gesamtnutzwerts

Die vorgestellte Verfahrensweise bietet die Möglichkeit, gezielt potentielle Optimierungsmaßnahmen zur Beeinflussung relevanter Eingabeparameterwerte eines Routenzugsystems zu identifizieren und deren Wirkungen auf Kennzahlenwerte abzuschätzen. Darauf aufbauend lassen sich die entscheidungsrelevanten Kennzahlenwerte objektiv hinsichtlich ihres Zielerfüllungsgrades beurteilen und ein dimensionsloser Gesamtnutzwert berechnen, der die aus den Maßnahmen resultierenden Systemzustände hinsichtlich ihrer Güte absolut und relativ vergleichbar macht. Die formulierten Entscheidungsregeln erlauben zum einen die Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade und zum anderen die Auswahl des Ziel-Zustands, der der Zielvorstellung des Anwenders am ehesten entspricht. Das Optimierungsmodell ist somit validiert und für die zielorientierte Identifizierung und Auswahl von Optimierungsmaßnahmen geeignet.

9 Schlussbetrachtung

9.1 Beurteilung der Ergebnisse

Beginnend mit den theoretischen Grundlagen in Kapitel 1 wurde das über die Informationen zum Verständnis der Arbeit hinausgehende Know-how, beispielsweise zu Zielen oder routenzugspezifischen Vor- und Nachteilen, aus der einschlägigen Literatur zusammengetragen und steht nun komprimiert zur Verfügung. Die Beschreibungen und der Vergleich der bedeutenden Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen in Kapitel 1 haben zum einen der Identifizierung der Forschungslücke für die vorliegende Arbeit gedient, zeigen zum anderen aber auch die grundlegenden Defizite des Forschungsfeldes auf (vgl. Abschnitt 1.1). Als wertvoller Beitrag ist die umfangreiche Wissensbasis der Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen in Kapitel 0 zu verstehen. Das diesbezügliche, fachspezifische Know-how ist sowohl von Planern und Betreibern von Routenzugsystemen in der Praxis wie auch von Wissenschaftlern in der Forschung, unabhängig von der entwickelten Methode, nutzbar.

Dem **Bewertungsmodell** liegt ein routenzugspezifisches Kennzahlensystem basierend auf einem hierarchischen Zielsystem zugrunde (vgl. Abschnitte 6.2 und 6.3). Die hergeleiteten Kennzahlen decken dadurch verschiedene Zieldimensionen ab und ermöglichen die multikriterielle Bewertung von Routenzugsystemen. Zudem sind sie unabhängig von der entwickelten Methode in der Praxis universell einsetzbar. Die jeweiligen Definitionsblätter im Anhang A.1 bis A.4 dienen in diesem Zusammenhang der Standardisierung, insbesondere wenn bisher kein Monitoring und keine Kennzahlenerfassung erfolgt ist. Der Objektivität des entwickelten Kennzahlensystems aufgrund der Eingrenzung auf mess- und kalkulierbare Kennzahlen steht der Nachteil gegenüber, dass qualitative Kriterien in der Regel nicht in die Bewertung einbezogen werden können (vgl. Abschnitt 6.3.2).

Die Berechnungsweise der Kennzahlen basiert auf dem statischen Dimensionierungsansatz der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 [VDI 2016c, S. 6 ff.]. Dieser entspricht dem Stand der Technik und weist den Vorteil auf, dass die Berechnungen auf deterministischen Eingangsdaten beruhen, sodass aufwendige Simulationen mit dynamischen Modellen vermieden werden können [RITTER ET AL. 2016, S. 35]. Demgegenüber müssen Einschränkungen des Anwendungsbereichs in Kauf genommen werden. Beispielsweise sind Routenzugsysteme für die kombinierte Ver- und Entsorgung oder mit dynamisch festgelegten Routen nicht abbildbar (vgl. Abschnitt 6.6.2.1). Zudem ist vorausgesetzt, dass das zu betrachtende Routenzugsystem tatsächlich planungskonform umgesetzt wurde bzw. wird (vgl. Abschnitt 6.6). Positiv hervorzuheben ist wiederum die Weiterentwicklung des ursprünglichen Dimensionierungsansatzes dahingehend, dass nun auch Mehrtroutensysteme mit Fahrzeug-Pooling dimensionierbar sind (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Die Umsetzung des Bewertungsmodells im entwickelten Excel-Tool vereinfacht die Dimensionierung bzw. Bewertung von Routenzugsystemen maßgeblich durch die Unterstützung des

9 Schlussbetrachtung

Anwenders bei der Kennzahlenberechnung sowie der Ergebnisdarstellung (vgl. Abschnitt 6.6). Ein weiterer Vorteil ist die Abbildung anhand eindeutiger, formelmäßiger Zusammenhänge zwischen Eingabeparameter- und Kennzahlenwerten, wodurch Wechselwirkungen im Modell implizit berücksichtigt werden. Gleichzeitig erhöht die softwaretechnische Umsetzung den Abstraktionsgrad, was einerseits den getroffenen Annahmen bei der Modellbildung und andererseits dem hohen Implementierungsaufwand geschuldet ist. Aus diesem Grund werden beispielsweise sortenreine Routenzüge vorausgesetzt oder der Durchsatz nicht auf Artikel-ebene, sondern auf Haltepunktebene betrachtet (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Ebenso werden Einflussfaktoren nur insofern berücksichtigt, als sie die Eingangsgrößen des Modells beeinflussen (z. B. Beeinflussung der mittleren Fahrgeschwindigkeit durch die Anzahl der Kreuzungen).

Das **Analysemodell** basiert auf einer systematischen Sensitivitätsanalyse, in der die Eingabeparameterwerte des Bewertungsmodells „ceteris paribus“ in definierten Wertebereichen variiert werden (vgl. Abschnitt 7.2.2). Dadurch lassen sich Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Eingabeparametern und Kennzahlen für eine bestimmte Systemkonfiguration eindeutig identifizieren [MARTINI ET AL. 2015, S. 66]. Diese Vorgehensweise führt allerdings auch dazu, dass Wechselwirkungen zwischen den Eingabeparametern im Zuge der Analyse zwangsläufig unberücksichtigt bleiben. Zudem ist bei der Ergebnisinterpretation zu beachten, dass messbare Kennzahlen (z. B. Unfallhäufigkeit) im Bewertungsmodell direkt auf Basis der Angaben der relevanten Eingabewerte berechnet werden und in der Regel kein Bezug zum Dimensionierungsansatz vorliegt. Infolgedessen sind indirekte Einflüsse anderer Eingabeparameter nicht identifizierbar (z. B. Erhöhung der Unfallhäufigkeit bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit).

Die Wirkintensität dient als Maßzahl zur Quantifizierung der Wirkung einer Eingabeparameterwertveränderung auf einen Kennzahlwert (vgl. Abschnitt 7.3). Sie ermöglicht nicht nur die detaillierte Analyse einer einzelnen Wirkung im Rahmen der Parameteranalyse (vgl. Abschnitt 7.4.1), sondern darüber hinaus auch den dimensionenunabhängigen Vergleich aller Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen im Rahmen der Wirkungsanalyse (vgl. Abschnitt 7.4.2). Diesbezüglich ist als Nachteil der Informationsverlust durch die Kennzahlenaggregation zu nennen (vgl. Abschnitt 7.6). Diese ist wiederum notwendig, um diejenigen Stellgrößen identifizieren zu können, die im Sinne der Zielvorstellung und Präferenzen des Anwenders auf die relevanten Kennzahlen wirken (vgl. Abschnitt 7.6).

Die Umsetzung des Analysemodells im Excel-Tool vereinfacht die Durchführung der umfangreichen Sensitivitätsanalyse und Wirkintensitätenberechnung durch die automatisierte Datenübermittlung mit dem Bewertungsmodell (vgl. Abschnitt 7.1). Die darauf aufbauende Parameter- und Wirkungsanalyse ermöglicht zudem die übersichtliche Ergebnisdarstellung durch die automatisierte Generierung von Tabellen und Diagrammen unter Berücksichtigung der für den Anwender relevanten Kennzahlen (vgl. Abschnitt 7.4). Mit der Verwendung der Software MS Excel geht der Nachteil einher, dass Analysen, die über den benötigten Funktionsumfang des entwickelten Modells hinaus gehen sollen, nur bedingt umsetzbar sind. Während die Makro-Laufzeiten bei der Einparameteranalyse mit 470 Systemkonfigurationen vertretbar sind (vgl.

Abschnitt 7.7), lässt bereits die Zweiparameteranalyse mit 220.900 Systemkonfigurationen (470^2) eine Gesamtlaufzeit von knapp einem Tag erwarten.

Das **Optimierungsmodell** basiert auf den in der Analyse ermittelten relevanten Eingabeparametern (vgl. Abschnitt 7.6), anhand derer potentielle Optimierungsmaßnahmen unter Zuhilfenahme der Wissensbasis in Kapitel 0 und der Definitionsblätter der Kennzahlen im Anhang A.1 bis A.4 zu identifizieren sind. Diese Vorgehensweise verdeutlicht die Zielorientierung des Lösungsansatzes, da lediglich solche Maßnahmen bezüglich ihrer Eignung zu überprüfen sind, die tatsächlich auf die relevanten Stellgrößen Einfluss nehmen (vgl. Abschnitt 8.2). Der Berücksichtigung gestalterischer Aspekte bei der Optimierung wird durch die Einbeziehung der Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen Rechnung getragen, deren Beschreibungen den Anwender bei der Auswahl von gestalterischen Maßnahmen unterstützen (vgl. Kapitel 0).

Die Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen stellt innerhalb des Lösungsansatzes die höchsten Anforderungen an den Anwender, weil dieser das Analyseergebnis sowie die Wissensbasis richtig interpretieren und somit planerische Fähigkeiten beweisen muss. Das Gleiche gilt, wenn auch in verringertem Maße, für die Abschätzung der Einflüsse von Maßnahmen auf unterschiedliche Eingangsgrößen (Systemgestaltung und Eingabeparameter) gemäß Abschnitt 8.3.1. Demgegenüber sind die darauf basierenden Wirkungen auf die Kennzahlenwerte durch die Integration des Bewertungsmodells eindeutig bestimmbar (vgl. Abschnitt 8.3.2).

Der Einsatz der multiattributiven Nutzentheorie im Zuge der Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade erlaubt einerseits die Berücksichtigung der Zielvorstellung des Anwenders bei der Kennzahlenauswahl und -gewichtung (vgl. Abschnitte 8.4.2.1 und 8.4.2.2), stellt andererseits aber sicher, dass die Bewertung von Ist- und Soll-Zuständen durch die Verwendung von Wertfunktionen möglichst objektiv erfolgt (vgl. Abschnitt 8.4.2.3). Als kritisch ist diesbezüglich die Tatsache zu beurteilen, dass der Anwender durch die Bestimmung der Arten und Verläufe der Wertfunktionen das Bewertungsergebnis beeinflussen kann. Das Entscheidungsmodell stellt schließlich auf der Basis der berechneten Gesamtnutzwerte einfache und eindeutige Entscheidungsregeln zur Verfügung, mit denen es möglich ist, sowohl sinnvolle Optimierungspfade zu identifizieren als auch den Ziel-Zustand zu bestimmen, der die Zielvorstellung des Anwenders bestmöglich erfüllt (vgl. Abschnitt 8.4.3).

9.2 Fazit

Wie eingangs beschrieben, sehen sich Planer von Routenzugsystemen in der Praxis zwei wesentlichen Herausforderungen gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 1.1). Zum einen ist die Systemfindung aufgrund zahlreicher Gestaltungsalternativen und Einflussfaktoren eine komplexe Aufgabe, die es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, logistischer und qualitativer Ziele zu lösen gilt. Zum anderen stehen dafür, hinsichtlich der Vorgehensweise, unterschiedliche Planungsansätze zur Verfügung, deren Ergebnisgüte wiederum maßgeblich vom Know-how des

9 Schlussbetrachtung

Planers abhängt. In der Folge ist zu vermuten, dass Routenzugsysteme oftmals suboptimal geplant und bestehende Systeme ineffizient betrieben werden, zumal aus Anwendersicht der Fokus meist auf der Entwicklung funktionierender Lösungen liegt. Das äußert sich auch dadurch, dass die Optimierung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen, trotz substanzieller Potentiale, aus anwendungsbezogener Sicht bisher kaum Beachtung findet und keine methodische Unterstützung für diese Aufgabe zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 3.3).

Die vorliegende Dissertation begegnet diesem Problem mit der Entwicklung einer Methode zur anwendungsorientierten Optimierung von geplanten bzw. bestehenden Routenzugsystemen, um die Hebung vorhandener Potentiale zu unterstützen (vgl. Abschnitt 1.2). Der zugrunde gelegte anwendungsorientierte und zielgerichtete Lösungsansatz umfasst die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen mithilfe von drei separaten, zum Teil softwaretechnisch in MS Excel umgesetzten, Modellen (vgl. Abschnitt 4.2). Deren erfolgreiche Validierung bestätigt die Erfüllung der in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen an die Funktionalität der Methode, sodass das übergeordnete Ziel der Arbeit erreicht wurde.

Das Bewertungsmodell befähigt den Anwender, trotz der eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten aufgrund des gewählten Dimensionierungsansatzes und der softwaretechnischen Umsetzung des Modells (vgl. Abschnitt 9.1), eine Vielzahl der in der Praxis relevanten Routenzugsysteme abzubilden und anhand von Kennzahlen multidimensional zu bewerten. Dies ermöglicht erstmals die systematische Analyse eines Routenzugsystems mit dem Ziel der Identifizierung, Quantifizierung und Darstellung von Wirkungen, um die für die Optimierung relevanten Stellgrößen unter Berücksichtigung der individuellen Zielvorstellung des Anwenders zu bestimmen. Das Analyseergebnis sowie die Wissensbasis der Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen unterstützen den Anwender schließlich maßgeblich bei der Identifizierung von potentiellen Optimierungsmaßnahmen und der Bestimmung sinnvoller Optimierungspfade.

Über diesen originären Einsatzzweck der Methode hinaus sind die innerhalb der Modelle verwendeten methodischen Ansätze aufgrund deren separater Umsetzung vielfältig nutzbar. Das Bewertungsmodell bzw. das Excel-Tool sind beispielsweise unabhängig von der entwickelten Methode für die softwaregestützte Dimensionierung von Routenzugsystemen geeignet. Ebenso ist der kombinierte Einsatz aus multiattributiver Nutzentheorie und Entscheidungsbaumverfahren im Zuge der Systemfindung denkbar. Zudem weist der modulare Aufbau des Lösungsansatzes die notwendige Flexibilität auf, um diesen anforderungsgerecht erweitern oder anpassen zu können (vgl. Abschnitt 9.3).

Dem Nutzen der Methode stehen einige grundsätzliche Nachteile gegenüber, die der Verfahrensauswahl innerhalb der Modelle geschuldet sind. So ist die Anwendbarkeit der Methode beispielsweise durch die Einsatzgrenzen des Dimensionierungsansatzes im Bewertungsmodell eingeschränkt. Gleiches gilt für das Analysemodell aufgrund der Durchführung von „ceteris paribus“-Analysen, wodurch Wechselwirkungen bei der Identifizierung relevanter Stellgrößen

unberücksichtigt bleiben. Der Optimierungsansatz ist dahingehend zu kritisieren, dass die Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen sowie die Definition von Soll-Zuständen, trotz entsprechender Unterstützung, ein hohes Maß an planerischer Fähigkeit vom Anwender verlangt. Vor dem Hintergrund der heuristischen Entscheidungsfindung ist es somit offensichtlich, dass die entwickelte Methode lediglich das Auffinden eines lokalen Optimums ermöglicht (vgl. Abschnitt 8.4.1.1).

Mit Blick auf die existierenden Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen (vgl. Kapitel 1) widmet sich die vorliegende Arbeit mit einer über den Stand der Technik hinausgehenden Tiefe der Optimierung von Routenzugsystemen unter Berücksichtigung gestalterischer Aspekte aus Anwendersicht. Der Vergleich der entwickelten Methode mit ausgewählten, existierenden Ansätzen sowie zwei Software-Tools aus dem Bereich Produktionstechnik verdeutlicht, dass einerseits die in der Regel nur ansatzweise betrachtete Optimierung abdeckt wird, andererseits aber auch die Funktionsbereiche Gestaltung, Dimensionierung und Bewertung intensiv behandelt werden (vgl. Tab. 73). Die Arbeit leistet mit der umfangreichen Übersicht der Gestaltungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 0), dem entwickelten Kennzahlensystem (vgl. Abschnitt 6.3), dem weiterentwickelten Dimensionierungsansatz (vgl. Abschnitt 6.4) sowie dem Excel-Tool (vgl. Datei „1_Routenzug-Tool Vorlage“ im Datenanhang) folglich auch einen Beitrag zur Unterstützung der Planung und Bewertung von Routenzugsystemen.

Tab. 73: Vergleich der vorliegenden Arbeit mit ausgewählter Literatur und Software aus dem Bereich Produktionstechnik

Legende:

- ansatzweise behandelt
- behandelt

	Funktion					Transportbedarf	Verfahren														
	Gestaltung	Dimensionierung	Disposition	Bewertung	Optimierung		konstant	variabel	Empfehlung	Wissensbasis	Berechnungsvorschrift	Exakter Algorithmus	Heuristik	Graphentheoretisches Verfahren	Naturanaloges Verfahren	Simulation	Kriterienkatalog	Kennzahlen	Sensitivitätsanalyse	Multikriterielle Bewertung	Investitionsrechnung
[BRUNGS 2012]	●	●		○		●		●	●	●						○	○				
[DROSTE 2013]	●	●		○	○	●		●	●	●	●					○	○	○			
[WUSTMANN 2014] (Software)	○	●		●	○	●		●	●	●	●	●	●			○	●	○	○	○	○
[VDI 2016b] & [VDI 2016c]	●	●		○		●		●	●	●							●				
[GÜNTNER, KEUNTJE 2016] (Software)	●	●		●	○	●		●	●	●						●	●	●	●	●	●
[MARTINI 2017]	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●					●	●	●	●	○

Mit Blick auf die verfolgte Zielsetzung und die Ergebnisse dieser Arbeit ist die Auswahl sowie der Einsatz der Verfahren, trotz verfahrens- und anwendungsspezifischer Nachteile (vgl. Abschnitt 9.1), als zweckmäßig zu beurteilen. Es ist insbesondere positiv hervorzuheben, dass die Weiterentwicklung existierender Verfahrensweisen bzw. deren kombinierte Anwendung die Ausweitung der Betrachtung hinsichtlich der Funktionsbereiche ermöglicht hat. Zudem ist in

diesem Zusammenhang der hohe Detaillierungsgrad zu nennen, mit dem die Verfahren behandelt wurden und nun für die Anwendung zur Verfügung stehen. Die softwaretechnische Umsetzung des Bewertungs- und Analysemodells in MS Excel ist vor dem Hintergrund des gewählten methodischen Ansatzes und der damit verfolgten Zielsetzung ebenfalls als zweckmäßig zu beurteilen, für umfangreichere Analysen erscheint das Programm allerdings ungeeignet.

Die vorliegende Dissertation verdeutlicht, dass ineffizient geplante bzw. betriebene Routenzugsysteme durch methodische und softwaretechnische Unterstützung anwendungsorientiert optimiert werden können. Mit Blick auf die Unzulänglichkeiten bei der Planung von Routenzugsystemen (vgl. Abschnitt 1.1) sollte es allerdings das übergeordnete Ziel sein, Routenzugsysteme bereits zielorientiert und somit effizient zu planen. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zuge die Kenntnis von systemabhängigen Wirkungszusammenhängen bei der Gestaltung. Die vorliegende Arbeit legt mit dem entwickelten methodischen Ansatz zur systematischen Wirkungsanalyse einen ersten Grundstein für weitere Bemühungen in diese Richtung. Dabei sollten die Bestrebungen insbesondere dahingehen, die Lücke zwischen den Bereichen Produktionstechnik und Operations Research zu schließen und das Know-how beider Seiten synergetisch zu nutzen (vgl. nachfolgende Ausführungen).

9.3 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Aus der Kritik an der entwickelten Methode im vorherigen Abschnitt sowie den eingangs dargelegten Defiziten existierender Planungsansätze leitet sich direkt weiterer Forschungsbedarf ab. Der eingeschränkten Anwendbarkeit des vorgestellten Lösungsansatzes kann beispielsweise mit der Weiterentwicklung und softwaretechnischen Umsetzung der Dimensionierungsverfahren von Routenzugsystemen begegnet werden. Diesbezüglich ist insbesondere auf die anschließende Verankerung in entsprechenden Normen oder Richtlinien zu achten, um das Wissen öffentlich zugänglich zu machen. Darüber hinaus ist aus Anwendersicht die Einbeziehung zusätzlicher finanzwirtschaftlicher Kennzahlen durch die Erweiterung des Lösungsansatzes um die gängigen Investitionsrechenverfahren empfehlenswert [WÖHE, DÖRING 2013, S. 471 ff.; BECKER 2013, S. 41 ff.; ZANTOW, DINAUER 2011, S. 425 ff.].

Im Rahmen der Analyse von Routenzugsystemen ist die Identifizierung von Wechselwirkungen durch Variation mehrerer Eingabeparameterwerte des Modells anzustreben, um daraus weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Systemverhaltens ableiten zu können [MARTINI ET AL. 2015, S. 70]. Die vollständige Untersuchung erscheint allerdings aufgrund der Vielzahl möglicher Systemkonfigurationen, trotz zunehmender Rechenleistungen von Computersystemen, nicht zweckmäßig. Abhilfe könnte in diesem Fall die statistische Versuchsplanung schaffen, bei der lediglich eine begrenzte Anzahl der Systemkonfigurationen hinsichtlich der Wirkungszusammenhänge untersucht wird (vgl. Abschnitt 7.2.1.3). Diesbezüglich besteht die Aufgabe zunächst darin, die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens zu untersuchen, indem die Wirkungszusammenhänge für eine begrenzte Anzahl Eingabeparameter und -werte anhand der exakten Ergebnisse des Bewertungsmodells verifiziert werden.

Die Notwendigkeit weiterer Forschung zeigt sich im Optimierungsmodell vor allem bei der Identifizierung potentieller Optimierungsmaßnahmen sowie der Definition entsprechender Soll-Zustände. Wünschenswert ist die Entwicklung einer Wissensbasis im Sinne eines Maßnahmenkatalogs, idealerweise mitsamt Angaben zum jeweiligen Einflussbereich einer Maßnahme. Da deren Wirkungen in aller Regel nicht allgemeingültig mathematisch formulierbar und quantifizierbar sind, bietet sich die verbale Beschreibung der Optimierungsmaßnahmen an. Basierend darauf ist die Erstellung qualitativer Einflussmatrizen vorstellbar (vgl. Abschnitt 7.2.1.3), die wiederum mittels Fuzzy-Logik in das Entscheidungsmodell des Lösungsansatzes integrierbar sind [BOTHE 1995; ROTH 1998, S. 224 ff.].

Bereits im vorherigen Abschnitt wurde das Erfordernis zur disziplinenübergreifenden Methodenentwicklung mit dem Ziel der Planungsunterstützung zum Ausdruck gebracht. Auffällig ist, dass bisherige Ansätze zur Planung von Routenzugsystemen mit dem Schwerpunkt auf deren Gestaltung fast ausschließlich konstante und determinierte Transportbedarfe berücksichtigen und Dispositionsaufgaben folglich von der Betrachtung ausgrenzen (vgl. Abschnitt 3.3). Da reale Produktionssysteme allerdings von einer hohen Dynamik der Produktionsprozesse geprägt sind und somit schwankende Transportbedarfe aufweisen [WIEGEL ET AL. 2013, S. 52], führt diese Vorgehensweise zwangsläufig zu suboptimal geplanten Routenzugsystemen (vgl. Abschnitt 1.1). Demgegenüber ist durch die Berücksichtigung entsprechender Optimierungsverfahren und Erkenntnisse aus der Disposition bei der Systemfindung ein ganzheitlicher Planungsansatz realisierbar, der alle Planungsfunktionen abdeckt.

Eine Möglichkeit variable und stochastisch auftretende Transportbedarfe im Zuge der Planung einzubeziehen, besteht in der Anwendung der Simulation (vgl. Abschnitt 3.1.3). Diese ermöglicht durch Beobachtungen beispielsweise auch Wirkungszusammenhänge in komplexen Routenzugsystemen (z. B. Mehrrountensysteme und kombinierte Ver- und Entsorgung), die nicht rein analytisch abbildbar sind [STAAB ET AL. 2013, S. 176], zu identifizieren. Die zentralen Aufgabenstellungen für die Zukunft bestehen insbesondere in der Vereinfachung der Modellbildung und der Aufnahme von Optimierungsverfahren in die Simulation. Die anschließende Forschungsaufgabe ist die Bestimmung der besten Systemkonfiguration im Sinne der simulationsbasierten Optimierung (SBO) [MÄRZ ET AL. 2011; VDI 2016a]. Für die im Vorfeld aufgrund der Gestaltungsvielfalt notwendige Bestimmung der jeweils zu untersuchenden Systemkonfigurationen sind evolutionäre Algorithmen, der Monte Carlo-Algorithmus oder Multiagentensysteme denkbar [MÜLLER-GRONBACH ET AL. 2012; WEICKER 2015; ELLINGER 2015].

Während die Gestaltung von Routenzugsystemen oftmals auf der Basis von Empfehlungen, Wissensdatenbanken und/oder Erfahrungen beruht, kommen für die Dimensionierung – und insbesondere für die Disposition – überwiegend rechenintensive Verfahren zum Einsatz (vgl. Abschnitt 3.3). Wie auch die vorliegende Arbeit zeigt, erfolgt deren Umsetzung sinnvollerweise computergestützt, weshalb analog zu artverwandten Problemstellungen, wie beispielsweise der Kommissioniersystemplanung [MARTINI ET AL. 2017], zukünftig mit einer zunehmenden Anzahl EDV-basierter Planungsansätze zu rechnen ist. Dieser Entwicklungstendenz folgend ist der

9 Schlussbetrachtung

nächste Schritt, hin zu einem ganzheitlichen Blick auf die zu planenden Routenzugsysteme, die Betrachtung der Prozesse und insbesondere der Transportbedarfe in einer dynamischen Sicht.

Einen ersten Schritt in diese Richtung geht das aktuelle Forschungsprojekt „Dynamische Routenzugsteuerung für kurzfristig schwankende Transportbedarfe“ der TU München, wenn auch unter weitestgehender Vernachlässigung gestalterischer Aspekte [LIEB 2017]. Den Defiziten der statischen Planungsverfahren wird in diesem Fall durch die EDV-gestützte Koordinierung des operativen Betriebs im Sinne eines Routenzugleitsystems begegnet. Mit Blick auf das Effizienzsteigerungspotential von vorausplanenden Dispositionsverfahren in Staplerleitsystemen [MIRLACH ET AL. 2013] ist das Forschungsvorhaben vielversprechend. Die darauf aufbauende Forschungsaufgabe wird es sein, die Erkenntnisse auf die Gestaltung von Routenzugsystemen zu übertragen, um letztlich der Vision einer automatischen Planung einen Schritt näher zu kommen.

Literaturverzeichnis

- ABELE, EBERHARD; BRUNGS, FELIX: Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung mittels Milkrun - Vorgehensweise zur Erstausslegung und kontinuierlichen Verbesserung. In: *Industrie Management* 25 (2009), Nr. 5, S. 61–64.
- ADAM, DIETRICH: *Planung und Entscheidung - Modelle - Ziele - Methoden - Mit Fallstudien und Lösungen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 1996.
- ALMERT, TONI H.: *Planung von Routenzugsystemen*. Persönliche Mitteilung. Adressat: MARTINI, ANDREAS. Stuttgart, 2015.
- ALNAHHAL, MOHAMMED: *Efficient material flow in mixed model assembly lines*. Dissertation. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen, 2015.
- ALNAHHAL, MOHAMMED; NOCHE, BERND: Efficient material flow in mixed model assembly lines. In: *SpringerPlus* 2 (2013), Nr. 415, S. 1–12.
- ALNAHHAL, MOHAMMED; RIDWAN, ASEP; NOCHE, BERND: In-plant milk run decision problems. In: BENADADA, YOUSSEF (Hrsg.): *Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Logistics Operations Management - GOL 2014*. Piscataway (NJ), 2014, S. 85–92.
- ALVAREZ, ROBERTO ET AL.: Redesigning an assembly line through lean manufacturing tools. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43 (2009), Nr. 9-10, S. 949–958.
- ANONYM: *H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen*. Beschreibung Forschungsprojekt, 2015. URL: <http://www.h2intradrive.de/> (abgerufen am: 21.03.2017).
- ANONYM: Geregelter Nachschub für den Getriebebau im Stundentakt. In: *Logistik für Unternehmen* (2011), Nr. 6, S. 44–45.
- AQS: *Durchlaufregale für Routenzüge*. Präsentationsfolien. Neunkirchen: AQS Logistic Systems GmbH, 2013.
- ARNDT, HOLGER: *Supply Chain Management - Optimierung logistischer Prozesse*. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- ARNOLD, DIETER ET AL.: *Handbuch Logistik*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008.
- ASER: *Belastungs-Dokumentations-System (BDS)*. Informationsbroschüre des Instituts für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e.V. Wuppertal, 2017. URL: http://www.gewiteb.de/pdf_files/BAB-BDS-Broschuere-Web-Version.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- BAERWOLFF, CHRISTIAN: Routenzüge - Ein prozessorientierter Ansatz. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2136 - 16. Flurförderzeugtagung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 159–168.
- BALAZOVA, MARIA: *Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung*. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn, 2004.

- BALCI, OSMAN: Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. In: CHICK, STEPHEN ET AL. (Hrsg.): *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*. Piscataway (NJ), 2003, S. 150–158.
- BATTINI, DARIA; BOYSEN, NILS; EMDE, SIMON: Just-in-time supermarkets for part supply in the automobile industry. In: *Journal of Management Control* 24 (2013), Nr. 2, S. 209–217.
- BATTISTON, STEFANO ET AL.: DebtRank: too central to fail? Financial networks, the FED and systemic risk. In: *Scientific Reports* 2 (2012), Nr. 541, S. 1–6.
- BAUA BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN: *Gefährdungsbeurteilung mithilfe der Leitmerkmalmethode*. Dortmund, 2014. URL: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefahrungsbeurteilung.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- BAUDIN, MICHEL: *Lean logistics - The nuts and bolts of delivering materials and goods*. New York: Productivity Press, 2004.
- BAUM, MARTIN: *Gesamtkostenvergleich von zwei innerbetrieblichen Transportkonzepten in einem kunststoffverarbeitenden Unternehmen*. Studienarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2012.
- BEASLEY, JOHN E.: Fixed Routes. In: *The Journal of the Operational Research Society* 35 (1984), Nr. 1, S. 49–55.
- BECKER, BERND-DIETMAR: *Simulationssystem für Fertigungsprozesse mit Stückgutcharakter - Ein gegenstandsorientiertes System mit parametrisierter Netzwerkmodellierung*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1991.
- BECKER, HANS PAUL: *Investition und Finanzierung - Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft*. 6., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2013.
- BELLMANN, KLAUS; HIMPEL, FRANK; BÖHM, ANDREAS: Messung von Flexibilität in der Produktion. In: STROHHECKER, JÜRGEN; GRÖBLER, ANDREAS (Hrsg.): *Strategisches und operatives Produktionsmanagement - Empirie und Simulation*. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 221–240.
- BELTON, VALERIE; GEAR, TONY: On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. In: *Omega* 11 (1983), Nr. 3, S. 228–230.
- BIEGALE, MAURICE: *Marktstudie - Technik von Routenzugsystemen in der Intralogistik*. Studienarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2014.
- BMW BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Autonomik - Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand - Die Projekte*. Berlin, 2013. URL: http://www.autonomik.de/documents/AN_Band_1_AS_bf_130325.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- BOPPERS, JULIA: *Entwicklung eines wissensorientierten Konzepts zur adaptiven Logistikplanung*. Dissertation. München: Technische Universität München, 2008.

- BOSSMANN, MARC: Neue Produktionsversorgung in einem Automobilwerk mittels Kommissionierstapler. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *13. Heidelberger Flurförderzeug-Tagung - Wirtschaftlichkeit - Sicherheit - Technik*. Heidelberg, 2005, S. 23–32.
- BOTHE, HANS-HEINRICH: *Fuzzy Logic - Einführung in Theorie und Anwendungen*. 2., erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 1995.
- BOZER, YAVUZ A.; CIEMNOCZOŁOWSKI, DAVID D.: Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing - Part 1: system stability and distribution of container starts. In: *International Journal of Production Research* 51 (2013), Nr. 2, S. 555–567.
- BRANS, JEAN-PIERRE; MARESCHAL, BERTRAND: Promethee methods. In: FIGUEIRA, JOSÉ; GRECO, SALVATORE; EHROGOTT, MATTHIAS (Hrsg.): *Multiple criteria decision analysis - State of the art surveys*. New York: Springer, 2005, S. 163–195.
- BRUNGS, FELIX: *Der Milkrun in der Produktionslogistik*. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2012.
- BULLINGER, HANS-JÖRG: *Ergonomie - Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Stuttgart: Teubner, 1994.
- BULLINGER, HANS-JÖRG; LUNG, MARTIN M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Stuttgart: Teubner, 1994.
- BUNGARTZ, HANS-JOACHIM: *Einführung in die mathematische Modellierung*. Präsentationsfolien zur Vorlesung Modellbildung und Simulation. München: Institut für Informatik, 2005. URL: https://www5.in.tum.de/lehre/vorlesungen/mod_sim/SS05/ModSim_01_2auf1.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- CARDAUN, UWE: Bei Bosch hat es gefunkt. In: *AUTOMOBIL PRODUKTION* 21 (2007), Nr. 4, S. 88–90.
- CHAPPELL, LINDSAY: Make room for hybrids. In: *Automotive News* 80 (2006), Nr. 6206, S. 16A-16B.
- CHEN, PETER P.: The entity-relationship model - Toward a unified view of data. In: *ACM Transactions on Database Systems* 1 (1976), Nr. 1, S. 9–36.
- CHRISTIAN, CLAUDIO: *Konzepte der Produktionsversorgung in der Intralogistik*. Studienarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2013.
- CIEMNOCZOŁOWSKI, DAVID D.: *Performance evaluation and planning for cyclic, route-based material distribution systems in lean manufacturing*. Dissertation. Michigan: University of Michigan, 2007.
- CIEMNOCZOŁOWSKI, DAVID D.; BOZER, YAVUZ A.: Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing - Part 2: number of Kanban and workstation starvation. In: *International Journal of Production Research* 51 (2013), Nr. 2, S. 568–581.

- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W.: Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. In: *Operations Research* 12 (1964), Nr. 4, S. 568–581.
- COIMBRA, EUCLIDES A.: *Total flow management - Achieving excellence with Kaizen and lean supply chains*. Howick (NZ): Kaizen Institute, 2009.
- COIMBRA, EUCLIDES A.: *Kaizen in logistics and supply chains*. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- COSTA, BRUNO ET AL.: Simulation as a tool for planning a material delivery system to manufacturing lines. In: *IEEE International Engineering Management Conference Europe - Managing Engineering, Technology and Innovation for Growth*. Piscataway (NJ), 2008, S. 439–443.
- CRGRAPH: *Systemanalyse*. Starnberg, 2012. URL: www.crgraph.de/Systemanalyse.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- DANIEL, MICHAEL W.: Umsetzung neuer Prozesse im Brose-Werk Tschechien - Ein Erfahrungsbericht. In: GÜNTNER, WILLIBALD A.; BOPPERT, JULIA (Hrsg.): *Lean Logistics - Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*. Berlin; Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 213–226.
- DEWITZ, MARCO; GALKA, STEFAN: *Drive-Thru loading concept for in-plant milk runs*. Präsentationsfolien zur XX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad, 2012. URL: ilias310.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/2012_10_03_Vortrag_MHCL.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- DEWITZ, MARCO; GALKA, STEFAN; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Drive-Thru loading concept for in-plant milk runs. In: BOŠNJAK, SRĐAN; KARTNIG, GEORG; ZRNIC, NENAD (Hrsg.): *Proceedings of the XX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics*. Belgrad: Universität Belgrad, 2012, S. 237–242.
- DEWITZ, MARCO; GÜNTNER, WILLIBALD A.; ARLT, THOMAS: Der Verbrauch bestimmt den Takt - Erstellung von Fahrplänen für getaktete Routenzüge. In: *Fördern und Heben* 65 (2015), Nr. 1-2, S. 16–19.
- DEWITZ, MARCO; GÜNTNER, WILLIBALD A.; ARLT, THOMAS: Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre. In: WGTL WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE LOGISTIK E. V. (Hrsg.): *Logistics Journal - Proceedings*. Rostock-Warnemünde, 2014, S. 1–14. URL: https://www.logistics-journal.de/proceedings/2014/4056/dewitz_2014wgctl.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- DICKMANN, EVA: EDV-Unterstützung in der Produktion und im Materialfluss. In: DICKMANN, PHILIPP (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss*. 2., aktual. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009, S. 375–463.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN ISO 5053 - Kraftbetriebene Flurförderzeuge - Begriffe*. Berlin: Beuth, 1994.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN-Norm 15155 - Paletten - Gitterboxpalette mit 2 Vorderwandklappen*. Berlin: Beuth, 1986.

- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN-Norm 15172 - Kraftbetriebene Flurförderzeuge - Schlepper und schleppende Flurförderzeuge - Zugkraft, Anhängelast*. Berlin: Beuth, 1988.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN-Norm 30781 - Transportkette - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth, 1989.
- DITTES, FRANK-MICHAEL: *Optimierung - Wie man aus allem das Beste macht*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2015.
- DOBERMANN, MARCUS: *Planung der Materialbereitstellung in der Produktion - Entwicklung einer Methodik zur Planung von Logistikstrukturen und -prozessen am Beispiel eines Automobilzulieferers*. Saarbrücken: VDM, 2011.
- DOMBROWSKI, UWE; EBENTREICH, DAVID; STEENWERTH, PHILIPP: Auswirkungsmodell Ganzheitliches Produktionssystem. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014), Nr. 12, S. 904–908.
- DOMINGO, ROSARIO ET AL.: Materials flow improvement in a lean assembly line: a case study. In: *Assembly Automation* 27 (2007), Nr. 2, S. 141–147.
- DOMSCHKE, WOLFGANG; DREXL, ANDREAS: *Einführung in Operations Research*. 6., überarb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005.
- DOMSCHKE, WOLFGANG; SCHOLL, ARMIN: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. 3., verb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005.
- DORIGO, MARCO; STÜTZLE, THOMAS: *Ant colony optimization*. Cambridge; Massachusetts; London: MIT Press, 2004.
- DREHER, STEFAN; NÜRNBERGER, ALEXEJ; KULUS, DENNIS: Routenoptimierung in der Produktionslogistik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 3, S. 131–135.
- DROSTE, MARKUS: *Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2013.
- DROSTE, MARKUS; DEUSE, JOCHEN: A planning approach for in-plant milk run processes to optimize material provision in assembly systems. In: ELMARAGHY, HODA (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability - Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011, S. 605–611.
- DROSTE, MARKUS; HASSELMANN, VEIT-ROBERT; DEUSE, JOCHEN: Optimierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme. In: *Productivity Management* 17 (2012), Nr. 1, S. 25–28.
- DUNKLER, OLAF: *Daimler - Effiziente Logistik*. Präsentationsfolien zum 6. Branchenforum Automobil-Logistik. Neckarsulm, 2008.
- DUPPERIN, JEAN-CLAUDE; GODET, MICHEL: A method for constructing and ranking scenarios. In: *Futures* 7 (1975), Nr. 4, S. 302–312.

- DÜRRSCHMIDT, STEPHAN: *Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion*. München: Herbert Utz, 2001.
- ELLINGER, MARITA: *Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen*. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2015.
- ELLINGER, THEODOR; BEUERMANN, GÜNTER; LEISTEN, RAINER: *Operations Research - Eine Einführung*. 5. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2001.
- ELSNER, REINHARD: *Strategische Routenplanung für Schlepplugsysteme unter Berücksichtigung von Mehrfachanfahrten und Depot-Freiheit*. Dissertation. Göttingen: Universität Göttingen, 1991.
- EMDE, SIMON: *Feeding parts to mixed-model assembly lines in the automotive industry with tow trains*. Dissertation. Jena: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2011.
- EMDE, SIMON; BOYSEN, NILS: Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines. In: *International Journal of Production Economics* 135 (2012a), Nr. 1, S. 393–402.
- EMDE, SIMON; BOYSEN, NILS: Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. In: *European Journal of Operational Research* 217 (2012b), S. 287–299.
- EMDE, SIMON; FLIEDNER, MALTE; BOYSEN, NILS: Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines. In: *IIE Transactions* 44 (2012), Nr. 2, S. 121–135.
- EMDE, SIMON; SCHOLL, ARMIN; BOYSEN, NILS: Balancing mixed-model assembly lines - A computational evaluation of objectives to smoothen workload. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010), Nr. 11, S. 3173–3191.
- ERIKSSON, KRISTINA M.; HANSON, ROBIN: Performance impact of options for routing and delivery initiation in tugger train delivery systems. In: THE SWEDISH PRODUCTION ACADEMY (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd Swedish Production Symposium*. Stockholm, 2008, S. 345–351.
- ERLACH, KLAUS: *Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010.
- EßER, GERD; NÜRNBERGER, ALEXEJ: Einflussfaktoren im Innovationsprozess der Produktionsplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (2011), Nr. 3, S. 166–170.
- FACCIO, MAURIZIO ET AL.: Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains - A general framework. In: *Journal of Management Control* 24 (2013a), Nr. 2, S. 187–208.
- FACCIO, MAURIZIO; GAMBERI, MAURO; PERSONA, ALESSANDRO: Kanban number optimisation in a supermarket warehouse feeding a mixed-model assembly system. In: *International Journal of Production Research* 51 (2013b), Nr. 10, S. 2997–3017.
- FATHI, MASOOD ET AL.: A multiobjective optimization algorithm to solve the part feeding problem in mixed-model assembly lines. In: *Mathematical Problems in Engineering* 25 (2014a), S. 1–12.

- FATHI, MASOOD; RODRIGUEZ, VICTORIA; ALVAREZ, MARIA JESUS: A novel memetic ant colony optimization-based heuristic algorithm for solving the assembly line part feeding problem. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75 (2014b), Nr. 1, S. 629–643.
- FEIL, ANDREAS: *Entwicklung eines Tools zur Modellierung und Analyse von Routenzugsystemen*. Masterarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2016.
- FELDHUSEN, JÖRG ET AL.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: FELDHUSEN, JÖRG; GROTE, KARL-HEINRICH (Hrsg.): *Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013, S. 291–410.
- FIGUEIRA, JOSÉ; MOUSSEAU, VINCENT; ROY, BERNARD: Electre methods. In: FIGUEIRA, JOSÉ; GRECO, SALVATORE; EHROGOTT, MATTHIAS (Hrsg.): *Multiple criteria decision analysis - State of the art surveys*. New York: Springer, 2005, S. 133–162.
- FIRLBECK, GERHARD; ISENSEE, RONNY; BECKER, TORSTEN: Überraschend deutliche Ergebnisse beim Planen der Montagebandversorgung mit Zügen. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2136 - 22. Deutscher Materialfluss-Kongress*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 87–97.
- FISCHER, HERBERT: *Möglichkeiten zur Automatisierung von Routenzügen - Automatisierungsstufen und Anforderungen zur Realisierung*. Präsentationsfolien zum VDI-Wissensforum. Garching, 2016.
- FLEISCHMANN, BERNHARD; MEYR, HERBERT; WAGNER, MICHAEL: Advanced planning. In: STADTLER, HARTMUT; KILGER, CHRISTOPH (Hrsg.): *Supply chain management and advanced planning - Concepts, models, software and case studies*. 3. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005, S. 81–106.
- GALKA, STEFAN; DEWITZ, MARCO; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Drive-Thru für Routenzüge - Effizienzsteigerung bei der Beladung. In: WOLF-KLUTHAUSEN, HANNE (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2013*. Korschbroich: free beratung GmbH, 2013a, S. 128–132.
- GALKA, STEFAN; KLENK, EVA; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Exakt im Takt - Optimales Zusammenspiel von Automatiklagern und Routenzügen. In: *Industrie Management* 31 (2015), Nr. 2, S. 57–60.
- GALKA, STEFAN; KLENK, EVA; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Routenzüge nehmen Fahrt auf. In: *Logistik für Unternehmen* 15 (2013b), Nr. 6, S. 55–56.
- GAUSEMEIER, JÜRGEN; PLASS, CHRISTOPH; WENZELMANN, CHRISTOPH: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. München; Wien: Hanser, 2009.
- GEIGER, WALTER; KOTTE, WILLI: *Handbuch Qualität - Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven*. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2008.

- GERBERICH, THORSTEN: *Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie - Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl*. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- GERHARD, EDMUND: *Entwickeln und Konstruieren mit System - Wege zur rationellen Lösungsfindung*. 2., aktual. und erg. Aufl. Renningen: Expert, 1988.
- GLEIBNER, HARALD; FEMERLING, CHRISTIAN: *Logistik - Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- GOLZ, JENNY ET AL.: Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 24 (2012), Nr. 2, S. 119–141.
- GOLZ, JENNY: *Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2014.
- GORECKI, PAWEL; PAUTSCH, PETER: Anwendung des Small Trains innerhalb des Pull-Systems. In: *Productivity Management* 16 (2001), Nr. 4, S. 16–19.
- GRIFFENBERG, STEFFEN: *Methodenentwicklung in Wirtschaft und Verwaltung*. Hamburg: Verlag Dr. Kovac, 2004.
- GRIENITZ, VOLKER; SCHMIDT, ANDRÉ-MARCEL: *Scenariobased complexity management by adapting the methods of social network analysis*. Artikel ohne weitere Angabe. Siegen, 2010. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.1707&rep=rep1&type=pdf> (abgerufen am: 21.03.2017).
- GRIENITZ, VOLKER; SCHMIDT, ANDRÉ-MARCEL: Entwurf von nachhaltigen Produktionssystemen mit Hilfe der Szenariotechnik. In: MÜLLER, EGON; SPANNER-ULMER, BIRGIT (Hrsg.): *Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs*. Chemnitz, 2011, S. 383–392.
- GROTE, KARL-HEINRICH; FELDHUSEN, JÖRG: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24., aktual. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014.
- GUDEHUS, TIMM: *Logistik 2 - Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012.
- GÜNTNER, WILLIBALD A. ET AL.: *Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport*. Ergebnisse einer Studie. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2012a.
- GÜNTNER, WILLIBALD A. ET AL.: *Schlanke Logistikprozesse - Handbuch für den Planer*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013a.
- GÜNTNER, WILLIBALD A.; GALKA, STEFAN; ATZ, T.: Immer in der richtigen Reihenfolge - Sortierstrategien für die sequenzgenaue Bereitstellung aus dem automatischen Kleinteilelager. In: *Fördern und Heben* 62 (2012b), Nr. 4, S. 22–24.
- GÜNTNER, WILLIBALD A.; GALKA, STEFAN; KLENK, EVA: Mehr Zeit für die Materialversorgung. In: *Logistik für Unternehmen* 14 (2012c), Nr. 3, S. 38–40.

- GÜNTNER, WILLIBALD A.; KEUNTJE, CHRISTOPHER: *IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung - Integrierte Bewertung von Prozess und Technik*. Forschungsbericht. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2016.
- GÜNTNER, WILLIBALD A.; KLENK, EVA; GALKA, STEFAN: Drive-Thru für Routenzüge. In: *Log.Kompass* (2012d), Nr. 3, S. 28–29.
- GÜNTNER, WILLIBALD A.; KLENK, EVA; GALKA, STEFAN: Routenzüge sind kein Schonarbeitsplatz. In: *Logistik für Unternehmen 15* (2013b), Nr. 9, S. 55–57.
- GYULAI, DÁVID ET AL.: Milkrun vehicle routing approach for shop-floor logistics. In: CUNHA, PEDRO F. (Hrsg.): *Procedia CIRP - Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Setubal, 2013, S. 127–132.
- HALIM, NURUL H. A. ET AL.: Gravity flow rack's material handling system for just-in-time (JIT) production. In: MAKHTAR, AHMAD K. ET AL. (Hrsg.): *Procedia Engineering - International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*. Amsterdam: Elsevier, 2012, S. 1714–1720.
- HANSON, ROBIN: Effects of using minomi in in-plant materials supply. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 22 (2011), Nr. 1, S. 90–106.
- HANSON, ROBIN; FINNSGÅRD, CHRISTIAN: Impact of unit load size on in-plant materials supply efficiency. In: *International Journal of Production Economics* 147 (2012), A, S. 46–52.
- HARRIS, CHRIS; HARRIS, RICK: *5 steps to implementing a lean material handling system*. Artikel ohne weitere Angabe, 2014. URL: https://www.lean.org/Downloads/5_Steps_to%20Implementing_a_Lean_Material_Handling%20System.doc (abgerufen am: 21.03.2017).
- HARRIS, RICK; HARRIS, CHRIS; WILSON, EARL: *Making materials flow - A lean material-handling guide for operations, production-control, and engineering professionals*. Cambridge (MA): Lean Enterprise Institute, 2003.
- HARTEL, MARKO; LOTTER, BRUNO: Planung und Bewertung von Montagesystemen. In: LOTTER, BRUNO; WIENDAHL, HANS-PETER (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012, S. 365–388.
- HARTMANN, MATTHIAS: *Dynapro 1 - Erfolgreich produzieren in turbulenten Märkten - Anforderungen und industrielle Lösungsansätze*. Stuttgart: LOGIS-Verlag für Wissenstransfer, 1996.
- HÄSSIG, KURT: *Graphentheoretische Methoden des Operations Research*. Wiesbaden: Teubner, 1979.
- HAUFE: *Unfallstatistik: Kennzahlen für mehr Sicherheit ermitteln - 3.6 Unfallschwere*. Internetartikel: Haufe, 2017. URL: https://www.haufe.de/arbeitschutz/arbeitschutz-office/unfallstatistik-kennzahlen-fuer-mehr-sicherheit-ermitteln-36-unfallschwere_i-desk_PI957_HI1170893.html (abgerufen am: 21.03.2017).

- HAUSMANN, ACHIM: Schleppzüge zum Materialtransport bei Ford - Sinnvolle Alternative zum Stapler. In: *Hebezeuge Fördermittel* 47 (2007a), Sonderheft Flurförderzeuge, S. 32–34.
- HAUSMANN, ACHIM: Schleppergebundener Materialtransport - Am Beispiel Presswerk und Rohbau Ford-Werke GmbH. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 1977 - 14. Heidelberger Flurförderzeug-Tagung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2007b, S. 19–28.
- HILLIER, FREDERICK S.; LIEBERMAN, GERALD J.: *Introduction to operations research*. 7. Aufl. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- HOFMANN, MICHAEL: *Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells für Projekte der statistischen Versuchsplanung*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2011.
- HOLZER, BORIS: Netzwerkanalyse. In: KÜHL, STEFAN; STRODTOLZ, PETRA; TAFFERTSHOFER, ANDREAS (Hrsg.): *Handbuch Methoden der Organisationsforschung - Quantitative und Qualitative Methoden*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 668–695.
- HOMOLKA, KLAUS: *Routenzüge in der Werkslogistik Wolfsburg*. Präsentationsfolien zum VDI-Wissensforum. Garching, 2016.
- HORVÁTH, PÉTER: *Controlling*. 11., vollst. überarb. Aufl. München: Vahlen, 2009.
- HUCKE, KLAUS; BEER, RAINER; HÖROLD, SEBASTIAN: Umsetzung des roll-on-roll-off-Prinzips in der Intralogistik mit einem Shuttle-Konzept. In: SCHENK, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *16. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik*. Magdeburg, 2011, S. 229–234.
- HWANG, CHING-LAI; YOON, KWANGSUN: *Multiple attribute decision making - Methods and applications - A state-of-the-art survey*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1981.
- IAD: *Multiple-Lasten-Tool - Einstufungshilfe zur Tool-Version 1.4*. Informationsmaterial des Instituts für Arbeitswissenschaft. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2010a. URL: <http://www.kobra-projekt.de/download/multiple-lasten-tool> (abgerufen am: 21.03.2017).
- IAD: *Multiple-Lasten-Tool - Hintergrundinformation zur Tool-Version 1.4*. Informationsmaterial des Instituts für Arbeitswissenschaft. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2010b. URL: <http://www.kobra-projekt.de/download/multiple-lasten-tool> (abgerufen am: 21.03.2017).
- ICHIKAWA, HIDETAKA: Simulating an applied model to optimize cell production and parts supply (Mizusumashi) for laptop assembly. In: ROSSETTI, MANUEL; HILL, RAYMOND R.; JOHANSSON, BJÖRN (Hrsg.): *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Austin (TX), 2009, S. 2272–2280.
- INFORM: *Routenzug-Modul für SynchronTESS - Routenzüge optimiert planen und steuern*. Produktbeschreibung, 2013. URL: <https://www.inform-software.de/news/news-details/news/routenzug-modul-fuer-syncrotess-routenzuege-optimiert-planen-und-steuern> (abgerufen am: 21.03.2017).

- INPRO: *inpro-Route*. Produktbeschreibung, 2013. URL: <https://www.inpro.de/de/?q=supply-chain-management-0> (abgerufen am: 21.03.2017).
- JANSEN, DOROTHEA: *Einführung in die Netzwerkanalyse - Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Opladen: Leske+Budrich, 1999.
- JÜNEMANN, REINHARDT ET AL.: *Materialfluss und Logistik - Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1989.
- JÜNEMANN, REINHARDT: Logistiksysteme. In: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER (Hrsg.): *Produktion und Management - Teil 2*. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999, S. 16-1 bis 16-119.
- KEENEY, RALPH L.; RAIFFA, HOWARD: *Decisions with multiple objectives - Preferences and value tradeoffs*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1993.
- KELTERBORN, MICHAEL; KOCH, MYRIAM; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Physische Belastung in der Produktionslogistik - Geeignete Verfahren zur Beurteilung der physischen Belastung für Arbeitsplätze in der Produktionslogistik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013), Nr. 11, S. 846–849.
- KENNING, PETER; KRIEGER, WINFRIED: *Lieferservice*. Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). Wiesbaden: Springer Gabler, 2017. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56407/lieferservice-v9.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- KEUNTJE, CHRISTOPHER: *Forschungsprojekt IntegRoute - Integrierte Planung von Routenzugsystemen*. Präsentationsfolien zum VDI-Wissensforum. Garching, 2016.
- KEUNTJE, CHRISTOPHER ET AL.: Experimentelle Untersuchungen zur Ergonomie von Handschiebewagen in Routenzugsystemen. In: BRUNS, RAINER; ULRICH, STEPHAN (Hrsg.): *11. Hamburger Staplertagung*. Hamburg, 2016a, S. 139–156.
- KEUNTJE, CHRISTOPHER; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Forschungsprojekt IntegRoute - Integrierte Planung von Routenzugsystemen. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2275 - 25. Deutscher Materialfluss-Kongress*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016a, S. 203–213.
- KEUNTJE, CHRISTOPHER; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung. In: BRUNS, RAINER (Hrsg.): *Forschungskatalog Flurförderzeuge 2016 - Aktuelle Projekte im Kurzporträt*, 2016b, S. 15–16. URL: www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/dev...de/files/HF0616_Forschungskatalog.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- KEUNTJE, CHRISTOPHER; KELTERBORN, MICHAEL; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Integrierte Planung von Routenzugsystemen - Entwicklung einer Methodik zur integrierten Planung von Routenzugsystemen unter ganzheitlichen Aspekten. In: *Industrie 4.0 Management* (2016b), Nr. 5, S. 32–36.
- KEUNTJE, CHRISTOPHER; THOMASER, PATRICK; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Ermittlung der Zykluszeit von Routenzügen - Zeitbausteinsystem auf Basis von MTM-Analysen und

- Probandenstudien. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016c), Nr. 10, S. 618–620.
- KIEWITT, A.: Weniger Stapler. In: *Logistik Heute* 33 (2011), Nr. 9, S. 38–39.
- KILIC, HUSEYIN S.; DURMUSOGLU, M. BULENT; BASKAK, MURAT: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62 (2012), 9-12, S. 1135–1146.
- KIRCHNER, SÖREN: *Ein Verfahren zur situationsgerechten Gestaltung der Bevorratungsebene in einer variantenreichen Serienproduktion*. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2004.
- KLAUS, PETER: *Gabler-Lexikon Logistik - Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2012.
- KLEIN, ROBERT; SCHOLL, ARMIN: *Planung und Entscheidung - Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. München: Vahlen, 2004.
- KLENK, EVA; GALKA, STEFAN: Das Hauptziel: Dynamische und flexible Systeme. In: *Hebezeuge Fördermittel* 53 (2013), Nr. 7-8, S. 386–388.
- KLENK, EVA; GALKA, STEFAN; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Operating strategies for in-plant milk-run systems. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015), Nr. 3, S. 1882–1887.
- KLENK, EVA; GALKA, STEFAN; GÜNTNER, WILLIBALD A.: Routenzüge - im Takt der Produktion? In: *Logistik für Unternehmen* 15 (2013), Nr. 7/8, S. 55–57.
- KLUG, FLORIAN: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010.
- KLÜVER, CHRISTINA; KLÜVER, JÜRGEN; SCHMIDT, JÖRN: *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren - Soft Computing und verwandte Techniken*. 2., erw. und aktual. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- KNEHR, GERD: Effizienter Sektionsbau mit Routenzügen. In: *Schiff & Hafen* 65 (2013), Nr. 4, S. 38–40.
- KNOEFLER, K. H.: Ein algorithmiertes Modell zur Rationalisierung der innerbetrieblichen Transportprozesse zwischen den Struktureinheiten von Maschinenbaubetrieben. In: *Fertigungstechnik und Betrieb* 22 (1972), Nr. 11, S. 662–664.
- KNOF, HEIDE-LORE: *CIM und organisatorische Flexibilität*. München: VVF, 1992.
- KÖBER, JONATHAN: Zug um Zug zur schlanken Produktion. In: *Logistik für Unternehmen* 14 (2012), Nr. 4, S. 32–36.
- KOCH, RÜDIGER: *Fronius und Linde zeigen gemeinsamen Brennstoffzellen-Schlepper*. Internet-artikel: MaschinenMarkt, 2011. URL: <http://www.mm-logistik.vogel.de/foerdertech-nik/articles/314306/> (abgerufen am: 21.03.2017).
- KOETHER, REINHARD: *Technische Logistik*. 3. Aufl. München: Hanser, 2007.

- KOPECEK, PAVEL: Selected heuristic methods used in industrial engineering. In: KATALINIC, BRANKO (Hrsg.): *Procedia Engineering - 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Zadar, 2013, S. 622–629.
- KOPPE, ROLAND: *Eine Methodik zur strategischen Einflussbewertung von Methodenänderungen in Entwicklungsprozessen*. Dissertation. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2012.
- KOPPENLEITNER, REINHARD ET AL.: *Wirkungsanalyse und Wirkungsmessung in Gesundheitsvorhaben der deutschen Entwicklungszusammenarbeit - Verbesserungsbedarf vor dem Hintergrund internationaler Erfahrungen und Entwicklungen*. Berlin: GIZ, 2012.
- KOVÁCS, ANDRÁS: Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics. In: *International Journal of Production Economics* 133 (2011), Nr. 1, S. 312–318.
- KRAFCIK, JOHN F.: Triumph of the lean production system. In: *Sloan Management Review* 30 (1988), Nr. 1, S. 41–52.
- KRAMPS, BENEDIKT: *Entwicklung eines Planungskonzepts zur parameterbasierten Zeitermittlung innerbetrieblicher Milkruns in der Lean Production*. München: GRIN, 2012.
- KRAUSE, ANDREAS; MÜLLER, EGON; STRAUCH, JÖRG: Methodischer Ansatz zur ganzheitlichen Planung von Routenzugsystemen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses im Automobilbau. In: SCHENK, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *19. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik*. Magdeburg, 2014, S. 93–100.
- KRAUSE, ANDREAS; MÜLLER, EGON; STRAUCH, JÖRG: Routenzüge in der variantenreichen Großserienfertigung - Wandlungsfähigkeit als Schlüssel zur Effizienz. In: SCHENK, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *20. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik*. Magdeburg, 2015, S. 97–102.
- KRAUSE, ANDREAS; MÜLLER, EGON; STRAUCH, JÖRG: Routenzüge in der variantenreichen Großserienfertigung - Wandlungsfähigkeit als Schlüssel zur Effizienz. In: SCHENK, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *21. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik*. Magdeburg, 2016, S. 39–48.
- KRAUSE, ANDREAS; STRAUCH, JÖRG: Aspekte der Planung und des Betriebs von Routenzügen in der automobilen Endmontage. In: MÜLLER, EGON (Hrsg.): *Trends und Strategien für die Produktion von morgen - Vernetzt planen und produzieren*. Chemnitz, 2013, S. 311–320.
- KÜHNAPFEL, JÖRG B.: *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- LAPPE, DENNIS ET AL.: Vernetzte Steuerung einer schlanken Intralogistik. In: *Werkstattstechnik online* 104 (2014), Nr. 3, S. 112–117.
- LAUCHT, OLIVER; LOHSE, ARMIN; WESTKÄMPER, ENGELBERT: Werkstransport eines ostdeutschen Unternehmens reorganisiert - Kurzfristige Optimierung durch effiziente Transportorganisation. In: *Logistik im Unternehmen* 8 (1994), Nr. 11/12, S. 42–45.

- LAUX, HELMUT; GILLENKIRCH, ROBERT M.; SCHENK-MATHES, HEIKE Y.: *Entscheidungstheorie*. 9., vollst. überarb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014.
- LAZERICK, CAROL: Lean thinking in lean times. In: *Material Handling Management* 65 (2010), Nr. 4, S. 41–44.
- LIEB, CHRISTIAN: *Dynamische Routenzugsteuerung für kurzfristig schwankende Transportbedarfe*. Beschreibung Forschungsprojekt. München: TU München, 2017. URL: http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Forschung/Dynamische%20Routenzugsteuerung/Projektblatt_Routenzugsteuerung_Lieb.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- LIEBETRUTH, THOMAS: *Prozessmanagement in Einkauf und Logistik - Instrumente und Methoden für das Supply Chain Process Management*. Wiesbaden: Gabler, 2016.
- LIKER, JEFFREY K.; MEIER, DAVID: *The Toyota way fieldbook - A practical guide for implementing Toyota's 4Ps*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- LIMÈRE, VERONIQUE ET AL.: Optimising part feeding in the automotive assembly industry: deciding between kitting and line stocking. In: *International Journal of Production Research* 50 (2012), Nr. 15, S. 4046–4060.
- LÖDDING, HERMANN: *Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 2., erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008.
- LOGSOL: *RoutMan - Effiziente Materialbeförderung durch optimal getaktete Routenzüge*. Produktbeschreibung. Dresden: LOGSOL GmbH, 2014. URL: http://www.logsowa.de/tl_files/logsowa/routman/handout.pdf.
- LR INTRALOGISTIK: *Automatisierung von Routenzuganhängern*. Produktinformation. Wörth an der Isar: LR Intralogistik GmbH, 2014. URL: <http://www.lrintralogistik.de/index.php/de/produkte/40-automatisierung-von-routenzuganhaengern.html>.
- LÜBBECKE, MARCO: *Metaheuristik*. Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). Wiesbaden: Springer Gabler, 2017. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/611774910/metaheuristik-v2.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- MAG, WOLFGANG: Planung und Kontrolle. In: BITZ, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *Vahlens Kompendium der Betriebswirtschaftslehre*. 4., völlig überarb. Aufl. München: Franz Vahlen, 1999, S. 1–63.
- MARCHWINSKI, CHET: *Following four steps to a lean material-handling system leads to a leap in performance*. Internetartikel. Cambridge (MA): Lean Enterprise Institute, 2003. URL: <https://www.lean.org/common/display/?o=788> (abgerufen am: 21.03.2017).
- MARCHWINSKI, CHET; SHOOK, JOHN; SCHROEDER, ALEXIS: *Lean lexicon - A graphical glossary for lean thinkers*. Cambridge (MA): Lean Enterprise Institute, 2008.
- MARKL-GRAETZ, KERSTIN ET AL.: Neue Wege in der Automobilindustrie. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2145 - 20. Deutscher Materialfluss-Kongress*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 191–201.
- MARTIN, HEINRICH: *Transport- und Lagerlogistik - Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

- MARTINI, ANDREAS: *Gestaltungsmöglichkeiten und Einflussfaktoren bei der Planung und Optimierung von Routenzugsystemen*. Präsentationsfolien zur UKUS-Veranstaltung „Routenzüge und betriebliche Intralogistik“. Siegen, 2014. URL: [https://www.uni-siegen.de/smi/aktuelles/ukus-vortrag_routenzugsysteme_\(martini\).pdf](https://www.uni-siegen.de/smi/aktuelles/ukus-vortrag_routenzugsysteme_(martini).pdf) (abgerufen am: 21.03.2017).
- MARTINI, ANDREAS: *Factors of influence in tuggler train systems*. Präsentationsfolien zur ICIEOM-CIO-IIIE International Conference 2015. Aveiro, 2015.
- MARTINI, ANDREAS: *Application-oriented optimization of internal milk-run systems*. Präsentationsfolien zur CIO-ICIEOMIISE-AIM International Joint Conference 2016. Donostia-San Sebastian, 2016.
- MARTINI, ANDREAS: *Bewertungsmethoden in der Produktentwicklung - Untersuchung, Vergleich und praktische Anwendungen*. Bachelorarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2009.
- MARTINI, ANDREAS; MAUKSCH, TOBIAS; STACHE, ULRICH: Ansätze zur Planung von Kommissioniersystemen. In: *Werkstattstechnik online* 107 (2017), (Veröffentlichung Ende 2017), S. ---.
- MARTINI, ANDREAS; MAUKSCH, TOBIAS; STACHE, ULRICH: Anwendungsorientierte Optimierung von Routenzugsystemen. In: SCHENK, MICHAEL ET AL. (Hrsg.): *21. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik*. Magdeburg, 2016, S. 19–28.
- MARTINI, ANDREAS; STACHE, ULRICH; TRENKER, FLORIAN: Einflussfaktoren in Routenzugsystemen. In: *Werkstattstechnik online* 105 (2015), 1/2, S. 65–71.
- MARTINI, ANDREAS; STACHE, ULRICH; TRENKER, FLORIAN: Planung von Routenzugsystemen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014a), 1-2, S. 50–55.
- MARTINI, ANDREAS; STACHE, ULRICH; TRENKER, FLORIAN: Automatisierung von Routenzugsystemen - Teil I: Alternative Automatisierungskonzepte und deren Kategorisierung. In: *Fördern und Heben* 64 (2014b), Nr. 9, S. 16–19.
- MARTINI, ANDREAS; STACHE, ULRICH; TRENKER, FLORIAN: Automatisierung von Routenzugsystemen - Teil II: Automatisierungsgrade mit Vergleichsanalyse in Bezug auf ihre Wirtschaft. In: *Fördern und Heben* 64 (2014c), Nr. 10, S. 10–13.
- MÄRZ, LOTHAR ET AL.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik - Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011.
- MATTERN, FRIEDEMANN; MEHL, HORST: Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. In: *Informatik Spektrum* 12 (1989), Nr. 4, S. 198–210.
- MEINHARDT, INGOLF; SCHMIDT, THORSTEN: Einsatzplanung für Routenzugsysteme. In: SCHMAUDER, MARTIN; SCHMIDT, THORSTEN (Hrsg.): *Institutskolloquium 2012 - Information als Veränderungstreiber*. Dresden, 2012, S. 58–73.
- MEINHARDT, INGOLF; SCHMIDT, THORSTEN; DAFERNER, MARTIN: Einsatz von Routenzügen ohne Simulation planen. In: *Hebezeuge Fördermittel* 50 (2011), Nr. 10, S. 512–515.

- MEIßNER, SEBASTIAN ET AL.: Lean Supply Chain Management - Einstufige Materialbereitstellungskonzepte zur Versorgung der variantenreichen Automobilproduktion. In: *Industrie Management* 28 (2012), Nr. 6, S. 14–18.
- MERTENS, PETER: Funktionen und Phasen der Produktionsplanung und -steuerung. In: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER (Hrsg.): *Produktion und Management - Teil 2*. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999, S. 14-11 bis 14-60.
- MICROSOFT: *Excel 2010: Verbessern der Berechnungsleistung*. Internetartikel, 2011. URL: [https://msdn.microsoft.com/de-de/library/office/ff700515\(v=office.14\).aspx](https://msdn.microsoft.com/de-de/library/office/ff700515(v=office.14).aspx) (abgerufen am: 21.03.2017).
- MIRLACH, MICHAEL ET AL.: Auftragszuteilungsverfahren für Staplerleitsysteme. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *17. Flurförderzeugtagung - VDI-Berichte Nr. 2201*. Baden-Baden, 2013, S. 67–78.
- MÜLLER, EGON: *Energieeffizienz im Kontext innovativer Logistiklösungen*. Präsentationsfolien zum TOP 200 Meeting. Bremen, 2014. URL: http://top200.enersysbatterien.de/downloads/Mueller_without_video.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- MÜLLER-GRONBACH, THOMAS; NOVAK, ERICH; RITTER, KLAUS: *Monte Carlo-Algorithmen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- MÜLLER-STEWENS, GÜNTER: *Sensitivitätsanalyse*. Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). Wiesbaden: Springer Gabler, 2017. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13847/sensitivitaetsanalyse-v7.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- NIEMANN, W.: Rationalisieren im innerbetrieblichen Transport. In: *Hebezeuge Fördermittel* 17 (1977), Nr. 1, S. 24–25.
- NOMURA, J.; TAKAKUWA, SOEMON: Optimization of a number of containers for assembly lines - The fixed-course pick-up system. In: *International Journal of Simulation Modelling* 5 (2006), Nr. 4, S. 155–166.
- NYHUIS, PETER ET AL.: Materialbereitstellung in der Montage. In: LOTTER, BRUNO; WIENDAHL, HANS-PETER (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006, S. 323–351.
- OELTJENBRUNS, HENNING: *Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas - Analyse, Vorteile und detaillierte Voraussetzungen sowie die Vorgehensweise zur erfolgreichen Einführung am Beispiel eines globalen Automobilkonzerns*. Dissertation. Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2000.
- OHNO, TAIICHI: *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt am Main; New York: Campus, 2009.
- OLSCHEWSKI, ROBERT: *Konzept zur Entwicklung eines Logistikzuges*. Diplomarbeit. Offenburg: Fachhochschule Offenburg, 2005.
- PANDZHAROVA, EVGENIYA: *Stand der Technik der innerbetrieblichen Materialversorgung per Routenzug*. Studienarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2013.

- PAPAGEÖRGIU, MARKOS; LEIBOLD, MARION; BUSS, MARTIN: *Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 4., korr. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2015.
- PFENNIG, VOLKER: *Bestimmung des Automatisierungsgrades der rechnergestützten NC-Programmierung*. Berlin; New York: Springer, 1988.
- PFOHL, HANS-CHRISTIAN; STÖLZLE, WOLFGANG: *Planung und Kontrolle - Konzeption, Gestaltung, Implementierung*. 2. neu bearb. Aufl. München: Vahlen, 1997.
- PIATKOWSKI, MAREK: *Tugger deliveries - Implementation guidelines*. Projektbeschreibung, 2013. URL: <http://www.twinetwork.com/files/upload/articles/Tugger%20Deliveries%20-%20Implemetation%20Guidelines.pdf> (abgerufen am: 21.03.2017).
- PIEPENBURG, BJÖRN ET AL.: Simulationsgestützte Untersuchung der Spurtreue von Routenzügen. In: WGTL WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE LOGISTIK E. V. (Hrsg.): *Logistics Journal - Proceedings*. Rostock-Warnemünde, 2014, S. 1–11. URL: https://www.logistics-journal.de/proceedings/2013/3788/bruns2_2013wgtl.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- PLOWMAN, E. GROSVENOR: *Lectures on elements of business logistics*. Stanford: Stanford University, 1964.
- RABE, MARKUS; SPIEKERMANN, SVEN; WENZEL, SIGRID: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik - Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008.
- RAPOSO, RICARDO; PEREIRA, GUILHERME; DIAS, LUIS: Simulation of a milk run material transportation system in the semiconductors industry. In: DAS, DIGANTA B.; NASSEHI, VAHID; DEKA, LIPIKA (Hrsg.): *7th International Industrial Simulation Conference*. Loughborough, 2009, S. 144–151.
- REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation - Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*. 2. Aufl. München: Hanser, 1990.
- REICHMANN, THOMAS: *Controlling mit Kennzahlen und Management-Tools - Die systemgestützte Controlling-Konzeption*. 7., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, 2006.
- REUTER, CHRISTIAN: *Logistikrelevante Lösungen auf der Basis von Lean-Management bei kleinen Losgrößen und hoher Variantenvielfalt*. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2009.
- RICHTER, MICHAEL: *Adaptive Liefer- und Bereitstellungskonzepte für wandlungsfähige Montagesysteme zur Ausschöpfung der logistischen Leistungsfähigkeit*. Schlussbericht Forschungsprojekt. Hannover: Institut für integrierte Produktion Hannover GmbH, 2012. URL: http://www.bvl.de/files/441/481/Abschlussbericht_Lowamos_15991.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- RICHTER, TOBIAS: *Vergleich von Methoden zur Planung von Routenzugsystemen*. Studienarbeit. Siegen: Universität Siegen, 2014.

- RITTER, CORNELIUS ET AL.: Softwaregestützte Routenzugplanung - Analytische Dimensionierungsverfahren für den innerbetrieblichen Transport. In: BRUNS, RAINER (Hrsg.): *Forschungskatalog Flurförderzeuge 2016 - Aktuelle Projekte im Kurzporträt*, 2016, S. 35. URL: www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/dev...de/files/HF0616_Forschungskatalog.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- ROTH, BRITTA: *Lösungsverfahren für mehrkriterielle Entscheidungsprobleme - Klassische Verfahren, neuronale Netze und Fuzzy Logic*. Frankfurt am Main; New York: Lang, 1998.
- ROTHER, TIM: Produktion mit Routenzügen - Wenger Leerfahrten durch Milkrun-Systeme. In: *Logistik für Unternehmen* 14 (2012), Nr. 3, S. 42–43.
- ROZMAN, CRTOMIR ET AL.: The development of sugar beet production and processes simulation model - A system dynamics approach to support decision-making processes. In: *Organizacija* 47 (2014), Nr. 2, S. 99–105.
- SAATY, THOMAS L.: *The analytic hierarchy process - Planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, THOMAS L.: The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: FIGUEIRA, JOSÉ; GRECO, SALVATORE; EHROGOTT, MATTHIAS (Hrsg.): *Multiple criteria decision analysis - State of the art surveys*. New York: Springer, 2005, S. 345–407.
- SAATY, THOMAS L.; VARGAS, LUIS G.: *The logic of priorities - Applications in business, energy, health, and transportation*. Boston: Kluwer-Nijhoff, 1982.
- SAILE, PETER; WUNDERLICH, RAINER: Flexibel einsetzbar. In: *Logistik Heute* 30 (2008), Nr. 4, S. 50–51.
- SARGENT, ROBERT G.: Verification and validation of simulation models. In: HENDERSON, SHANE G. ET AL. (Hrsg.): *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. Washington, 2007, S. 124–137.
- SATOGLU, SULE ITIR; SAHIN, ETHEM: Design of a just-in-time periodic material supply system for the assembly lines and an application in electronics industry. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 65 (2013), 1-4, S. 319–332.
- SAVELSBERGH, MARTIN W.P; GOETSCHALCKX, MARC: A comparison of the efficiency of fixed versus variable vehicle routes. In: *Journal of Business Logistics* 16 (1995), Nr. 1, S. 163–187.
- SCHAFFNER, MICHAEL; STURZ, WOLFGANG: *Aufbau eines Kennzahlensystems für Technische Kommunikation - Grundlagen Kennzahlensysteme und praktische Übungen*. Präsentationsfolien zur tekomp Jahrestagung. Wiesbaden, 2012. URL: http://tagungen.tekom.de/fileadmin/tx_doccon/slides/133_Aufbau_eines_Kennzahlensystems_als_Argumentationshilfe_f_r_die_Technische_Kommunikation.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- SCHAUB, KARL-HEINZ: Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS). In: LANDAU, KURT (Hrsg.): *Montageprozesse gestalten - Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation*. Stuttgart: ergonomia, 2004, S. 91–111.

- SCHEDLBAUER, MICHAEL J.: *Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts*. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2008.
- SCHENK, MICHAEL; MÜLLER, EGON; WIRTH, SIEGFRIED: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014.
- SCHLICK, JOCHEN ET AL.: Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: BAUERNHANSL, THOMAS (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik - Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 57–84.
- SCHMIDT, KLAUS-J: *Innovative Kommissionier- und Bereitstellsystematiken*. Präsentationsfolien. Saarbrücken, 2012. URL: http://www.autouni.de/content/master/de/home/Veranstaltungen/institute/institut-fuer-produktion/veranstaltungen-produktion-archiv2012/Trends_in_der_Produktionsforschung/jcr%3Acontent/container/eventdownload_6/file.res/autouni_download_tpf_schmidt_23-02-12.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- SCHMIDT, THORSTEN; MEINHARDT, INGOLF: Berechnen statt simulieren. In: *Logistik Heute* 34 (2012), 1-2, S. 30–31.
- SCHNEIDER, MARKUS: Routenzug 4.0 - Digitalisierung der Bewegungsdaten von Routenzügen durch Echtzeitortung. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2275 - 25. Deutscher Materialfluss-Kongress*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016, S. 227–234.
- SCHOENFELD, L.: Innerbetrieblicher Transport zwischen Struktureinheiten im Routenverkehr. In: *Hebezeuge Fördermittel* 12 (1972), Nr. 3, S. 80–83.
- SCHULTE, CHRISTOF: *Logistik - Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 5. Aufl. München: Vahlen, 2009.
- SCHÜRLE, PHILIPP: Kanban - der Weg ist das Ziel. In: DICKMANN, PHILIPP (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss*. 2., aktual. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009, S. 227–303.
- SCHWARZ, MATTHIAS: *Schleppzugsysteme als alternatives Konzept einer staplerfreien Fertigung*. Artikel ohne weitere Angabe. Zwickau: Forschungs- und Transferzentrum e.V., 2007. URL: http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Projekte_pdf/Wirtschaft/Schleppzugsysteme.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- SCHWARZER, WOLFGANG: *Entwicklung eines Analysetools als Beitrag zur Bewertung von Distributionszentren*. Dissertation. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen, 2010.
- SIEBERTZ, KARL; VAN BEBBER, DAVID; HOCHKIRCHEN, THOMAS: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: Springer, 2010.
- SIEPERMANN, MARKUS ; LACKES, RICHARD: *Greedy-Algorithmus* - Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2080945372/greedy-algorithmus-v1.html> – Überprüfungsdatum 2017-03-21.

- SLY, DAVE: *Techniques for the evaluation, reduction, and elimination of excess material flow within industrial facilities*. Artikel ohne weitere Angabe, 2006. URL: http://www.proplanner.com/documents/filelibrary/documents/papers_case_studies/SLY_2012_Flow_Techniques_BF8BD45519999.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- SLY, DAVE: *Systematic design of tugger delivery routes*. Präsentationsfolien zur IIE Research Conference, 2008. URL: <https://de.slideshare.net/proplannerasia/tugger-route-generation-flow-planner-dr-dave-sly> (abgerufen am: 21.03.2017).
- SPATH, DIETER: *Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung*. Stuttgart: Logis, 2003.
- SPICAR, RADIM: System dynamics archtypes in capacity planning. In: KATALINIC, BRANKO (Hrsg.): *Procedia Engineering - 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Zadar, 2013, S. 1350–1355.
- STAAB, TOBIAS ET AL.: Effizienzsteigerung für Routenzüge - Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität. In: DANGELMAIER, WILHELM; LAROQUE, CHRISTOPH; KLAAS, ALEXANDER (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013 - Tagungsband 15. ASIM-Fachtagung*. Paderborn, 2013, S. 167–176.
- STAAB, TOBIAS ET AL.: Modelling and simulating the assembly line supply by tugger trains. In: BRUZZONE, AGOSTINO G. ET AL. (Hrsg.): *The 8th International Workshop on Applied Modeling and Simulation*. Rende, 2015, S. 22–31.
- STEPHAN, PETER; SCHLICK, JOCHEN: Reduzierung organisatorischer Verluste durch den Einsatz von Cyber-Physischen-Systemen in der Zahnradfertigung der WITTENSTEIN bastian GmbH. In: WITTENSTEIN, MANFRED ET AL. (Hrsg.): *Intelligente Vernetzung in der Fabrik - Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, S. 363–385.
- STERMAN, JOHN: *Business dynamics - Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- SULE, DILEEP R.: *Manufacturing facilities - Location, planning, and design*. 3. Aufl. Boca Raton (FL): CRC Press, 2009.
- SYSKA, ANDREAS: *Kennzahlen für die Logistik*. Berlin; New York: Springer, 1990.
- TAKEDA, HITHOSHI: *Das System der Mixed Production - Personal-Order-Prinzip für kundenorientierte Produktion*. Landsberg am Lech: moderne Industrie, 2008.
- TEN HOMPEL, MICHAEL; SADOWSKY, VOLKER; BECK, MARIA: *Kommissionierung - Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011.
- TEN HOMPEL, MICHAEL; SCHMIDT, THORSTEN: *Warehouse management - Automation and organisation of warehouse and order picking systems*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2007.

- TEN HOMPEL, MICHAEL; SCHMIDT, THORSTEN: *Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010.
- TEN HOMPEL, MICHAEL; SCHMIDT, THORSTEN; NAGEL, LARS: *Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik*. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2007.
- TRIANAPHYLLOU, EVANGELOS: *Multi-criteria decision making methods: a comparative study*. Dordrecht: Kluwer, 2000.
- TYLER, LARRY: Tugger and cart system is green approach to in-plant material transport. In: *Green Manufacturer* (2011), S. 38–42.
- ULLRICH, GÜNTER: *Fahrerlose Transportsysteme - Ein Leitfaden - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- ULRICH, STEPHAN; BRUNS, RAINER; KRIVENKOV, KONSTANTIN: Universelle selbstlenkende Routenzugachse mit höchster Spurtreue. In: BRUNS, RAINER (Hrsg.): *Forschungskatalog Flurförderzeuge 2016 - Aktuelle Projekte im Kurzporträt*, 2016, S. 37. URL: www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/dev...de/files/HF0616_Forschungskatalog.pdf (abgerufen am: 21.03.2017).
- UNRUH, VOLKER: *Effiziente Arbeitsplatzversorgung mit Routenzügen*. Internetartikel: MaschinenMarkt, 2010. URL: <http://www.mm-logistik.vogel.de/foerdertechnik/articles/252209/> (abgerufen am: 21.03.2017).
- VAIDYANATHAN, BHARATH S. ET AL.: A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. In: *IIE Transactions* 31 (1999), Nr. 11, S. 1083–1092.
- VDA VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *VDA 4500 - Kleinladungsträger (KLT)-System*. Berlin: VDA, 2013a.
- VDA VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.: *VDA 4520 - Großladungsträger (GLT)-System*. Berlin: VDA, 2013b.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 2225 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Blatt 3: Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth, 1998.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 2406 - Anhänger für Flurförderzeuge (Entwurf)*. Berlin: Beuth, 2013.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 2510 - Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth, 2005.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 2710 - Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)*. Berlin: Beuth, 2007-2014.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Blatt 1: Grundlagen*. Berlin: Beuth, 2014.

- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Blatt 12: Simulation und Optimierung (Entwurf)*. Berlin: Beuth, 2016a.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 3973 - Kraftbetriebene Flurförderzeuge - Schleppzüge mit ungebremsten Anhängern*. Berlin: Beuth, 1990.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 4400 - Blatt 1: Logistikkennzahlen für die Beschaffung*. Berlin: Beuth, 2001.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 4400 - Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion*. Berlin: Beuth, 2004.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 4400 - Blatt 3: Logistikkennzahlen für die Distribution*. Berlin: Beuth, 2002.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 4451 - Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)*. Berlin: Beuth, 1995-2005.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 5586 - Routenzugsysteme - Blatt 1: Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele (Entwurf)*. Berlin: Beuth, 2016b.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 5586 - Routenzugsysteme - Blatt 2: Planung und Dimensionierung (Entwurf)*. Berlin: Beuth, 2016c.
- VEIGT, MARIUS ET AL.: Entwicklung und Potenziale Cyber-Physischer Logistiksysteme am Beispiel eines Zahnradfertigers. In: WITTENSTEIN, MANFRED ET AL. (Hrsg.): *Intelligente Vernetzung in der Fabrik - Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, S. 213–225.
- VESTER, FREDERIC: *Die Kunst vernetzt zu denken - Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität*. München: dtv, 2002.
- VITALI, STEFANIA; GLATTFELDER, JAMES B.; BATTISTON, STEFANO: *The network of global corporate control*. Internetartikel, 2011. URL: <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0025995> (abgerufen am: 18.03.2013).
- WANNER, MARTIN; SENDER, JAN; HERZIG, OLIVER: Schlanke Intralogistik bei ungerichteten Materialflüssen. In: *Productivity Management* 17 (2012), Nr. 3, S. 47–50.
- WEBER, JÜRGEN: *Kennzahlensystem*. Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). Wiesbaden: Springer Gabler, 2016. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/12964/kennzahlensystem-v4.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- WEBER, JÜRGEN: *Expertensystem*. Eintrag im Gabler Wirtschaftslexikon (online). Wiesbaden: Springer Gabler, 2017. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57388/expertensystem-v9.html> (abgerufen am: 21.03.2017).
- WEBER, JÜRGEN: *Logistik-Controlling*. 3. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993a.
- WEBER, KARL: *Mehrkriterielle Entscheidungen*. Berlin; Boston: De Gruyter Oldenbourg, 1993b.

- WECK, MANFRED: Konventionelle Fertigungssysteme. In: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER (Hrsg.): *Produktion und Management - Teil 2*. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999, S. 10-11 bis 10-13.
- WEICKER, KARSTEN: *Evolutionäre Algorithmen*. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- WEISSBECK, H.: Rationalisierung des Transports zwischen Struktureinheiten in Maschinenbaubetrieben. In: *Hebezeuge Fördermittel* 16 (1976), Nr. 11, S. 334–336.
- WERNER, HARTMUT: *Supply Chain Management - Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling*. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
- WIEDENMANN, HARALD: *Modellierung von Produktionsprozessen als Beitrag zur Generierung von Termin- und Kapazitätsplanungs-Systemen bei variantenreicher Serienfertigung*. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2001.
- WIEGEL, FELIX ET AL.: Simulationsgestützte Optimierung innerbetrieblicher Milkruns - Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Optimierung der Materialbereitstellung. In: *Productivity Management* 18 (2013), Nr. 1, S. 51–54.
- WIENDAHL, HANS-PETER: Ausgewählte Strategien und Verfahren der Produktionsplanung und -steuerung. In: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER (Hrsg.): *Produktion und Management - Teil 2*. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999, S. 14-83 bis 14-114.
- WIENDAHL, HANS-PETER: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 6., aktual. Aufl. München: Hanser, 2008.
- WILDEMAN, HORST: *KANBAN-Produktionssteuerung - Leitfaden zur Einführung des Hol-Prinzips*. 4. Aufl. München: TCW, 1996.
- WÖHE, GÜNTER; DÖRING, ULRICH: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 25., überarb. und aktual. Aufl. München: Vahlen, 2013.
- WUSTMANN, DAVID: *Routenzugplanung mit RoutMan*. Präsentationsfolien zur UKUS-Veranstaltung „Routenzüge und betriebliche Intralogistik“. Siegen, 2014.
- WUSTMANN, DAVID: *Planung von Routenzugsystemen - Softwaregestützte Routenzugplanung am Beispiel Automobilindustrie*. Präsentationsfolien zum VDI-Wissensforum. Garching, 2016.
- WUSTMANN, DAVID; SCHMIDT, THORSTEN; MEINHARDT, INGOLF: Softwaregestützte Routenzugplanung - „Best Practice“ anhand von Beispielen aus der Automobilindustrie. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (Hrsg.): *VDI-Berichte Nr. 2275 - 25. Deutscher Materialfluss-Kongress*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016, S. 191–202.
- ZANGEMEISTER, CHRISTOF: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. 4. Aufl. Hamburg: Zangemeister & Partner, 1976.
- ZANTOW, ROGER; DINAUER, JOSEF: *Finanzwirtschaft des Unternehmens - Die Grundlagen des modernen Finanzmanagements*. 3., aktual. Aufl. München: Pearson Studium, 2011.

- ZIERHUT, TOBIAS: Effiziente Materialbereitstellung per Routenzug. In: *Dhf: Intralogistik* (2012), Nr. 6, S. 20–22.
- ZIMMERLING, ROLAND; HÖLSCHER, JAN HENDRIK: Intelligente Intralogistik zur bedarfsgerechten Materialversorgung der Produktion vernetzt mit der Transportlogistik. In: WITTENSTEIN, MANFRED ET AL. (Hrsg.): *Intelligente Vernetzung in der Fabrik - Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015, S. 353–360.
- ZIMMERMANN, HANS-JÜRGEN; GUTSCHE, LOTHAR: *Multi-Criteria Analyse - Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1991.
- ZIMMERMANN, WERNER; STACHE, ULRICH: *Operations-Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*. 10., überarb. Aufl. München; Wien: Oldenbourg, 2001.
- ZIP: *Quick and strategic factory management*. E-Mail mit Präsentationsfolien zur Software MALAGA. Adressat: MARTINI, ANDREAS, 2013.
- ZÜLCH, GERT: Arbeitswirtschaft. In: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER (Hrsg.): *Produktion und Management - Teil 2*. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999, S. 12-94 bis 12-124.

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

A.1 Definitionsblätter Strukturkennzahlen

S-1	Anzahl der Routen
Definition	$n_R = \text{Anzahl der Routen}$
Beschreibung	Die Kennzahl gibt an, wie viele Routen ein Routenzugsystem umfasst.
Zweck	Die Anzahl der Routen eines Routenzugsystems ist abhängig von der Routenplanung und dient u. a. als Indikator für die „Größe“ eines Routenzugsystems. Mit steigender Anzahl der Routen erhöht sich in der Regel die Komplexität des Gesamtsystems, weil die Abhängigkeiten der Routen untereinander zunehmen (z. B. durch gemeinsame und konkurrierende Nutzung von Verkehrsflächen). Die Anzahl der Routen ermöglicht die Bestimmung von routenbezogenen Durchschnittskennzahlen (z. B. mittlerer Durchsatz pro Route) zwecks internem (Abweichungsanalyse) oder externem Vergleich (Benchmarking).
Daten	Ergebnis der Routenplanung
Beeinflussung durch	Routenplanung
Beeinflusst	„Größe“ des Routenzugsystems / Transparenz / routenbezogene Kennzahlen
Bemerkung	Im Zuge des Bewertungsmodells dient die Angabe der Anzahl der Routen insbesondere der Abbildung der Systemstruktur im Excel-Tool durch die Erstellung der jeweiligen routenspezifischen Eingabe-, Berechnungs- und Ausgabefelder.

S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)
Definition	$n_{B,Q} = \text{Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)}$
Beschreibung	Die Kennzahl gibt an, wie viele einer Quelle zugeordnete Bereitstellorte ein Routenzugsystem oder eine einzelne Route umfasst.
Zweck	Die Anzahl der Bereitstellorte (Quelle) eines Routenzugsystems ist abhängig von der Routenplanung und dient in Kombination mit der Anzahl der Bereitstellorte (Senke) eines Routenzugsystems u. a. als Indikator dessen „Größe“. Die Anzahl der Bereitstellorte (Quelle) einer Route in Bezug zur Anzahl der Bereitstellorte (Senke) bestimmt die primäre Transportaufgabe (Versorgung, Entsorgung oder Ver- und Entsorgung). Die Anzahl der Bereitstellorte ermöglicht die Bestimmung von bereitstellungsbezogenen Durchschnittskennzahlen (z. B. mittlerer Durchsatz pro Bereitstellort) zwecks internem (Abweichungsanalyse) oder externem Vergleich (Benchmarking).
Daten	Ergebnis der Routenplanung
Beeinflussung durch	Routenplanung
Beeinflusst	„Größe“ des Routenzugsystems / primäre Transportaufgabe / bereitstellungsbezogene Kennzahlen

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)
Definition	
$n_{B,S} = \text{Anzahl der Bereitstellorte (Senke)}$	
Beschreibung	
Die Kennzahl gibt an, wie viele einer Senke zugeordnete Bereitstellorte ein Routenzugsystem oder eine einzelne Route umfasst.	
Zweck	
Die Anzahl der Bereitstellorte (Senke) eines Routenzugsystems ist abhängig von der Routenplanung und dient in Kombination mit der Anzahl der Bereitstellorte (Quelle) eines Routenzugsystems u. a. als Indikator für die dessen „Größe“.	
Die Anzahl der Bereitstellorte (Quelle) einer Route in Bezug zur Anzahl der Bereitstellorte (Senke) bestimmt die primäre Transportaufgabe (Versorgung, Entsorgung oder Ver- und Entsorgung).	
Die Anzahl der Bereitstellorte ermöglicht die Bestimmung von bereitstellungsbezogenen Durchschnittskennzahlen (z. B. mittlerer Durchsatz pro Bereitstellort) zwecks internem (Abweichungsanalyse) oder externem Vergleich (Benchmarking).	
Daten	
Ergebnis der Routenplanung	
Beeinflussung durch	
Routenplanung	
Beeinflusst	
„Größe“ des Routenzugsystems / primäre Transportaufgabe / bereitstellungsbezogene Kennzahlen	

S-4	Anzahl der Haltepunkte
Definition	
$n_H = \text{Anzahl der Haltepunkte}$	
Beschreibung	
Die Kennzahl gibt an, wie viele Haltepunkte ein Routenzugsystem oder eine einzelne Route umfasst.	
Zweck	
Die Anzahl der Haltepunkte eines Routenzugsystems ist abhängig von der Routenplanung und dient u. a. als Indikator für die „Größe“ eines Routenzugsystems.	
Die Anzahl der Haltepunkte einer Route in Kombination mit den jeweiligen Haltewahrscheinlichkeiten ist relevant für die Bestimmung der Haltepunktzeit im Zuge der Zykluszeitberechnung.	
Die Anzahl der Haltepunkte ermöglicht die Bestimmung von haltepunktbezogenen Durchschnittskennzahlen (z. B. mittlerer Durchsatz pro Haltepunkt) zwecks internem (Abweichungsanalyse) oder externem Vergleich (Benchmarking).	
Daten	
Ergebnis der Routenplanung	
Beeinflussung durch	
Routenplanung	
Beeinflusst	
„Größe“ des Routenzugsystems / L-Z-10: Haltepunktzeit / haltepunktbezogene Kennzahlen	

S-5	Routenlänge
Definition $s_R = \text{Routenlänge}$	
Beschreibung Die <i>Routenlänge</i> gibt die Länge des Fahrwegs entlang einer Route eines Routenzugsystems an.	
Zweck Die Routenlänge ist abhängig von der Routenplanung und dient u. a. als Indikator für die „Größe“ eines Routenzugsystems. Die Routenlänge in Kombination mit der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit des Routenzugs ist relevant für die Bestimmung der Fahrzeit im Zuge der Zykluszeitberechnung.	
Daten Ergebnis der Routenplanung / Layout	
Beeinflussung durch Routenplanung	
Beeinflusst „Größe“ des Routenzugsystems / L-Z-9: Fahrzeit	

A.2 Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen

L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand
Definition	
$t_{TA,max} = \frac{K_{RZ}}{\Lambda_R} = \frac{1}{f_{R,min}}$	
$f_{R,min}$	mindestens erforderliche Routenfrequenz
K_{RZ}	Routenzugkapazität (maximale Anzahl Normladungsträger (NLT) pro Tour)
$t_{TA,max}$	maximal möglicher Tourenstartabstand
Λ_R	auf NLT normierter Durchsatz der Route
Beschreibung	
<p>Der maximal mögliche Tourenstartabstand ist der größtmögliche zeitliche Abstand zwischen den Tourenstarts, um den Durchsatz für die gesamte Route unter Annahme einer 100 %igen Auslastung der Transportkapazität zu erreichen.</p> <p>Der Kehrwert entspricht der minimalen Routenfrequenz als Anzahl an Touren, die pro Zeiteinheit mindestens erforderlich sind.</p>	
Zweck	
<p>Der maximal mögliche Tourenstartabstand gibt im Rahmen der Dimensionierung die obere Grenze bei der Festlegung des tatsächlichen Tourenstartabstands an. Für ein bestehendes Routenzugsystem ist dies die obere Grenze bis zu der eine Erhöhung des Tourenstartabstands möglich ist.</p>	
Daten	
Technikdaten Routenzug / Durchsatzanforderungen	
Beeinflussung durch	
L-R-9: Routenzugkapazität / L-M-1: Durchsatz	
Beeinflusst	
L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand / L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	
Bemerkung	
<p>Das NLT-Äquivalent gibt an, wie viele Ladungsträger des Typs It einem NLT entsprechen (vgl. auch Kennzahl L-M-1 Durchsatz) [VDI 2016c, S. 3].</p>	

A.2 Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen

L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand
Definition	$t_{TA,min} = \frac{t_{zyk}}{n_{RZ}}$
<i>n_{RZ}</i> Anzahl Routenzüge <i>t_{TA,min}</i> mindestens erforderlicher Tourenstartabstand <i>t_{zyk}</i> Zykluszeit	
Beschreibung	<p>Der <i>mindestens erforderliche Tourenstartabstand</i> ist der kleinstmögliche zeitliche Abstand zwischen den Tourenstarts, um den Durchsatz für die gesamte Route unter Annahme einer 100 %igen zeitlichen Auslastung der Routenzüge zu erreichen.</p> <p>Der Kehrwert entspricht der maximalen Routenfrequenz als Anzahl an Touren, die pro Zeiteinheit maximal realisierbar sind.</p>
Zweck	<p>Der mindestens erforderliche Tourenstartabstand gibt im Rahmen der Dimensionierung die untere Grenze bei der Festlegung des tatsächlichen Tourenstartabstands in Abhängigkeit der minimalen Anzahl der Routenzüge an.</p> <p>In einem bestehenden Routenzugsystem ist dies die untere Grenze bis zu der eine Erhöhung des Tourenstartabstands möglich ist, ohne dass ein weiterer Routenzug eingesetzt werden muss.</p>
Daten	Dimensionierungsergebnisse / Anzahl Routenzüge
Beeinflussung durch	L-Z-4: Zykluszeit / L-R-2: Anzahl Transportmittel
Beeinflusst	L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand
Bemerkung	<p>Da der mindestens erforderliche Tourenstartabstand durch die Erhöhung der Anzahl der Routenzüge theoretisch kontinuierlich reduziert werden kann, ist diese bei der Anwendung der Kennzahl sinnvoll zu begrenzen. Praktikabel ist in der Regel die Begrenzung auf die minimal erforderliche Anzahl Routenzüge zuzüglich einem weiteren Routenzug ($n_{RZ,min} + 1$).</p>

L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand
Definition	$t_{TA,min} \leq t_{TA} \leq t_{TA,max}$
<i>t_{TA}</i> realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand <i>t_{TA,min}</i> mindestens erforderlicher Tourenstartabstand <i>t_{TA,max}</i> maximal möglicher Tourenstartabstand	
Beschreibung	<p>Der <i>tatsächliche Tourenstartabstand</i> entspricht dem im Betrieb eines Routenzugsystems realisierten oder dem bei der Dimensionierung festgelegten Tourenstartabstand. Der Wert liegt zwischen dem mindestens erforderlichen und dem maximal möglichen Tourenstartabstand.</p>
Zweck	<p>Der tatsächliche Tourenstartabstand gibt im Rahmen der Dimensionierung den geplanten zeitlichen Abstand zwischen zwei Tourenstarts an und ermöglicht damit die Berechnung der Anzahl der erforderlichen Routenzüge sowie die Bestimmung der routenzugbezogenen Nutzungsgrade.</p> <p>Im Betrieb dient die Kennzahl z. B. der Festlegung von Fahrplänen und der Kontrolle der Einhaltung derselben.</p>
Daten	Dimensionierungsergebnisse / Zeitaufnahmen und -analysen
Beeinflussung durch	L-Z-1: Maximal möglicher Tourenstartabstand / L-Z-2: Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand
Beeinflusst	L-Z-16: Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug / L-R-2: Anzahl Transportmittel / L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug / L-M-5: Anzahl Touren

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-Z-4	Zykluszeit
Definition	
$t_{zyk} = t_B + t_F + t_H + t_E$	
t_B	Beladezeit
t_E	Entladezeit
t_F	Fahrzeit
t_H	Haltepunktzeit
t_{zyk}	Zykluszeit
Beschreibung	
Die <i>Zykluszeit</i> ist die Zeit, die ein Routenzug (bzw. der Fahrer) im Mittel für die Durchführung aller zugehörigen Tätigkeiten auf einer Tour benötigt. Sie setzt sich aus der Beladezeit t_B , der Fahrzeit t_F , der Haltepunktzeit t_H sowie der Entladezeit t_E zusammen.	
Zweck	
Die Zykluszeit dient im Rahmen der Dimensionierung der Berechnung der Anzahl der erforderlichen Routenzüge und des zeitlichen Nutzungsgrades derselben. Des Weiteren dient sie der Bestimmung des mindestens erforderlichen Tourenstartabstands.	
Daten	
Siehe L-Z-8 bis L-Z-11	
Beeinflussung durch	
L-Z-8 bis L-Z-11: Beladezeit / Fahrzeit / Haltepunktzeit / Entladezeit	
Beeinflusst	
L-Z-2: Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand / L-Z-16: Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug / L-R-2: Anzahl Transportmittel	

L-Z-5	Wartezeit
Definition	
$t_w = t_{TA} \times n_{RZ} - t_{zyk}$	
n_{RZ}	Anzahl Routenzüge
t_{TA}	realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand
t_w	Wartezeit
t_{zyk}	Zykluszeit
Beschreibung	
Die <i>Wartezeit</i> ist die Zeit, die ein Routenzug (bzw. der Fahrer) zwischen der Beendigung einer Tour und dem Start der nächsten Tour wartet. Sie ergibt sich als Differenz von tatsächlichem Tourenstartabstand multipliziert mit der Anzahl der Routenzüge und der Zykluszeit.	
Zweck	
Die Wartezeit ist ein Indikator für Verschwendung durch nicht optimal genutzte Ressourcen im betrachteten Routenzugsystem.	
Daten	
Siehe L-Z-3, L-Z-4 und L-R-2	
Beeinflussung durch	
L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand / L-Z-4: Zykluszeit / L-R-2: Anzahl Transportmittel	
Beeinflusst	
L-Z-7: Anteil Wartezeit / L-Z-16: Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug / L-Z-17: Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	
Bemerkung	
Prozessbedingte Wartezeiten, z. B. für das Passieren von Toren oder aufgrund von Blockaden an Kreuzungen, werden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 der Fahrzeit zugerechnet [VDI 2016c, S. 8].	

L-Z-6	Anteil Zykluszeit
Definition	
$t_{zyk,\%} = \frac{t_{zyk}}{t_{TA}} \times 100 \%$	
t_{TA}	<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>
t_{zyk}	<i>Zykluszeit</i>
$t_{zyk,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Zykluszeit am Tourenstartabstand</i>
Beschreibung	
Der Anteil Zykluszeit entspricht dem prozentualen Anteil der Zykluszeit am Tourenstartabstand.	
Zweck	
Die anteilige Zykluszeit ermöglicht Aussagen über das Verhältnis von genutzten zu nicht genutzten Ressourcen sowie diesbezüglich den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-3 und L-Z-4	
Beeinflussung durch	
L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand / L-Z-4: Zykluszeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten	

L-Z-7	Anteil Wartezeit
Definition	
$t_{w,\%} = \frac{t_w}{t_{TA}} \times 100 \%$	
t_{TA}	<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>
t_w	<i>Wartezeit</i>
$t_{w,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Wartezeit am Tourenstartabstand</i>
Beschreibung	
Der Anteil Wartezeit entspricht dem prozentualen Anteil der Wartezeit am Tourenstartabstand.	
Zweck	
Die anteilige Wartezeit ermöglicht Aussagen über das Verhältnis von genutzten zu nicht genutzten Ressourcen sowie diesbezüglich den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-3 und L-Z-5	
Beeinflussung durch	
L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand / L-Z-5: Wartezeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-Z-8	Beladezeit
Definition	
$t_B = n_B \times t_b$	
n_B	Anzahl Beladevorgänge pro Tour
t_b	Dauer eines Beladevorgangs
t_B	Beladezeit
Beschreibung	
Die <i>Beladezeit</i> ist die Zeit, die benötigt wird, um den Routenzug an den entsprechenden Haltepunkten mit allen Ladungsträgern einer Tour zu beladen. Sie ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Beladevorgänge und der Dauer eines Beladevorgangs. Die Anzahl der Beladevorgänge variiert zwischen Eins und der Anzahl an Ladungsträgern pro Tour als Maximum.	
Zweck	
Die Beladezeit geht im Rahmen der Dimensionierung in die Zykluszeit ein. Sie dient im Vergleich mit den anderen Zykluszeitbestandteilen als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Beladung des Routenzugs.	
Daten	
Prozessbeschreibung Beladung / Daten zur Beladetechnik / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
Anzahl Beladevorgänge pro Tour / Dauer eines Beladevorgangs	
Beeinflusst	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-12: Anteil Beladezeit	
Bemerkung	
Gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 schließt die Beladezeit auch die Zeit für die Entladung von beispielsweise Leergut an den entsprechenden Haltepunkten mit ein (1:1-Tausch) [VDI 2016c, S. 9].	

L-Z-9	Fahrzeit
Definition	
$t_F = \frac{s_R}{v_{RZ}} + t_{zu}$	
s_R	Routenlänge
t_F	Fahrzeit
t_{zu}	Zeitzuschlag
v_{RZ}	Fahrgeschwindigkeit Routenzug
Beschreibung	
Die <i>Fahrzeit</i> ist die Zeit, die der Routenzug benötigt, um die Route abzufahren. Sie ergibt sich aus einer gleichförmigen Bewegung des Routenzugs mit einer konstanten Geschwindigkeit entlang des Fahrwegs. Zusätzlich werden Zeitzuschläge für prozessbedingte Wartezeiten, z. B. für das Passieren von Toren oder Rampen, berücksichtigt.	
Zweck	
Die Fahrzeit geht im Rahmen der Dimensionierung in die Zykluszeit ein. Sie dient im Vergleich mit den anderen Zykluszeitbestandteilen als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Fahrt des Routenzugs.	
Daten	
Siehe S-5 / Technikdaten Routenzug / Unternehmensvorgaben / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
S-5: Routenlänge / Fahrgeschwindigkeit Routenzug / prozessbedingte Wartezeiten	
Beeinflusst	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-13: Anteil Fahrzeit	

L-Z-10	Haltepunktzeit
Definition	
$t_H = n_h \times t_h$	
n_h	Anzahl Haltevorgänge pro Tour
t_h	Dauer eines Haltevorgangs
t_H	Haltepunktzeit
Beschreibung	
Die Haltepunktzeit ist die Zeit, die der Routenzug für alle Haltevorgänge einer Tour benötigt. Sie ergibt sich aus der Summe der Anzahl der Haltevorgänge für die Be- und Entladung multipliziert mit der Dauer eines Haltevorgangs. Sie berücksichtigt Nebenzeiten, die bei einem Halt des Routenzugs auftreten, z. B. Zeitschläge für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge des Routenzugs, Zeiten für manuelle Operationen des Bedieners, wie Absteigen vom Routenzug und Gehen zum Ladungsträger, der zu be- oder entladen ist. Die Be- und Entladevorgänge zählen nicht zur Haltepunktzeit.	
Zweck	
Die Haltepunktzeit geht im Rahmen der Dimensionierung in die Zykluszeit ein. Sie dient im Vergleich mit den anderen Zykluszeitbestandteilen als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich des Haltens des Routenzugs.	
Daten	
Siehe L-M-6 / Prozessbeschreibung Halten / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
L-M-6: Anzahl Haltevorgänge pro Tour / Dauer eines Haltevorgangs	
Beeinflusst	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-14: Anteil Haltepunktzeit	
Bemerkung	
Die Anzahl der Haltevorgänge entspricht nicht der Anzahl der Haltepunkte. Gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 wird die Anzahl an Haltevorgängen bestimmt, indem je Haltepunkt die Wahrscheinlichkeit für einen Halt ermittelt und diese für alle Haltepunkte der Route summiert wird [VDI 2016c, S. 8 f.].	

L-Z-11	Entladezeit
Definition	
$t_E = n_E \times t_e$	
n_E	Anzahl Entladevorgänge pro Tour
t_e	Dauer eines Entladevorgangs
t_E	Entladezeit
Beschreibung	
Die Entladezeit ist die Zeit, die benötigt wird, um den Routenzug an den entsprechenden Haltepunkten mit allen Ladungsträgern einer Tour zu entladen. Sie ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Entladevorgänge und der Dauer eines Entladevorgangs. Die Anzahl der Entladevorgänge variiert zwischen Eins und der Anzahl an Ladungsträgern pro Tour als Maximum.	
Zweck	
Die Entladezeit geht im Rahmen der Dimensionierung in die Zykluszeit ein. Sie dient im Vergleich mit den anderen Zykluszeitbestandteilen als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Entladung des Routenzugs.	
Daten	
Prozessbeschreibung Entladung / Daten zur Entladetechnik / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
Anzahl Entladevorgänge pro Tour / Dauer eines Entladevorgangs	
Beeinflusst	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-15: Anteil Entladezeit	
Bemerkung	
Gemäß der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 schließt die Entladezeit auch die Zeit für die Beladung von beispielsweise Leergut an den entsprechenden Haltepunkten mit ein (1:1-Tausch) [VDI 2016c, S. 9].	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-Z-12	Anteil Beladezeit
Definition	
$t_{B,\%} = \frac{t_B}{t_{zyk}} \times 100 \%$	
t_B	<i>Beladezeit</i>
$t_{B,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Beladezeit an der Zykluszeit</i>
t_{zyk}	<i>Zykluszeit</i>
Beschreibung	
Der Anteil Beladezeit entspricht dem prozentualen Anteil der Beladezeit an der Zykluszeit.	
Zweck	
Die anteilige Beladezeit dient als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Beladung des Routenzugs und ermöglicht den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-4 und L-Z-8	
Beeinflussung durch	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-8: Beladezeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten / Zusammensetzung der Zykluszeit	

L-Z-13	Anteil Fahrzeit
Definition	
$t_{F,\%} = \frac{t_F}{t_{zyk}} \times 100 \%$	
t_F	<i>Fahrzeit</i>
$t_{F,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Fahrzeit an der Zykluszeit</i>
t_{zyk}	<i>Zykluszeit</i>
Beschreibung	
Der Anteil Fahrzeit entspricht dem prozentualen Anteil der Fahrzeit an der Zykluszeit.	
Zweck	
Die anteilige Fahrzeit dient als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Fahrt des Routenzugs und ermöglicht den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-4 und L-Z-9	
Beeinflussung durch	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-9: Fahrzeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten / Zusammensetzung der Zykluszeit	

A.2 Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen

L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit
Definition	
$t_{H,\%} = \frac{t_H}{t_{zyk}} \times 100 \%$	
t_H	<i>Haltepunktzeit</i>
$t_{H,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Haltepunktzeit an der Zykluszeit</i>
t_{zyk}	<i>Zykluszeit</i>
Beschreibung	
Der Anteil Haltepunktzeit entspricht dem prozentualen Anteil der Haltepunktzeit an der Zykluszeit.	
Zweck	
Die anteilige Haltepunktzeit dient als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich des Haltens des Routenzugs und ermöglicht den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-4 und L-Z-10	
Beeinflussung durch	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-10: Haltepunktzeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten / Zusammensetzung der Zykluszeit	

L-Z-15	Anteil Entladezeit
Definition	
$t_{E,\%} = \frac{t_E}{t_{zyk}} \times 100 \%$	
t_E	<i>Entladezeit</i>
$t_{E,\%}$	<i>prozentualer Anteil der Entladezeit an der Zykluszeit</i>
t_{zyk}	<i>Zykluszeit</i>
Beschreibung	
Der Anteil Entladezeit entspricht dem prozentualen Anteil der Entladezeit an der Zykluszeit.	
Zweck	
Die anteilige Entladezeit dient als Indikator für Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Entladung des Routenzugs und ermöglicht den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen.	
Daten	
Siehe L-Z-4 und L-Z-11	
Beeinflussung durch	
L-Z-4: Zykluszeit / L-Z-11: Entladezeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten / Zusammensetzung der Zykluszeit	

L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug
Definition	
$\eta_{T,RZ} = \frac{\text{Einsatzzeit Routenzug}}{\text{Zeitangebot Routenzug}} \times 100 \%$	
$\eta_{T,RZ}$ zeitlicher Nutzungsgrad des Routenzugs	
Beschreibung	
<p>Der <i>zeitliche Nutzungsgrad des Routenzugs</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Zeit je Routenzug, der für Routenzugtätigkeiten genutzt wird.</p> <p>Zur Einsatzzeit gehören z. B. die Zeitanteile der Zykluszeit. Wartezeiten außerhalb der Zykluszeit, z. B. die Wartezeit bis zum Start der nächsten Tour, gehören nicht zur Einsatzzeit.</p> <p>Das Zeitangebot ist die theoretisch nutzbare Zeit bezogen auf einen bestimmten Zeitraum, in der Regel die Arbeitszeit je Schicht.</p>	
Zweck	
<p>Der zeitliche Nutzungsgrad gibt Aufschluss darüber, inwieweit ein Routenzug in der zur Verfügung stehenden Zeit für Routenzugtätigkeiten genutzt wird. Je höher der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto besser ist die zur Verfügung stehende Zeit „produktiv“ genutzt. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel den Routenzug möglichst hoch auszulasten.</p> <p>Des Weiteren dient der zeitliche Nutzungsgrad der Beurteilung, ob und in welchem Umfang zeitliche Reserven zur Verfügung stehen (vgl. Kennzahl <i>zeitliche Flexibilität</i>). Je niedriger der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto höher ist die Flexibilität bezogen auf den Routenzugeinsatz und desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten. Beispielsweise können durch zeitliche Reserven Zykluszeitschwankungen aufgrund von schwankenden Transportbedarfen je Tour abgefangen werden. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel den Routenzug möglichst niedrig auszulasten.</p>	
Daten	
Siehe L-Z-5 und L-Z-8 bis L-Z-11 / Tätigkeitsaufnahmen und -analysen / Schicht- und Arbeitszeitdaten	
Beeinflussung durch	
L-Z-5: Wartezeit / L-Z-8 bis L-Z-11: Beladezeit / Fahrzeit / Haltepunktzeit / Entladezeit / Arbeitszeiten	
Beeinflusst	
Q-F-1: Zeitliche Flexibilität Routenzug	

L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter
<p>Definition</p> $\eta_{T,M} = \frac{\text{Einsatzzeit Mitarbeiter}}{\text{Zeitangebot Mitarbeiter}} \times 100 \%$ <p>$\eta_{T,M}$ zeitlicher Nutzungsgrad des Mitarbeiters</p>	
<p>Beschreibung</p> <p>Der <i>zeitliche Nutzungsgrad des Mitarbeiters</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Zeit je Mitarbeiter, der für die Ausübung von Tätigkeiten genutzt wird.</p> <p>Zur Einsatzzeit gehören z. B. die Zeitanteile der Zykluszeit, sofern diese von einem Mitarbeiter ausgeführt werden. Wartezeiten außerhalb der Zykluszeit, z. B. die Wartezeit bis zum Start der nächsten Tour, gehören nicht zur Einsatzzeit.</p> <p>Das Zeitangebot ist die Arbeitszeit des Mitarbeiters bezogen auf einen bestimmten Zeitraum, z. B. die Arbeitszeit je Schicht.</p>	
<p>Zweck</p> <p>Der zeitliche Nutzungsgrad gibt Aufschluss darüber, inwieweit ein Mitarbeiter die zur Verfügung stehende Arbeitszeit für „produktive“ Tätigkeiten nutzt. Je höher der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto besser ist die Arbeitszeit eingesetzt. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel die Mitarbeiter möglichst hoch auszulasten.</p> <p>Des Weiteren dient der zeitliche Nutzungsgrad der Beurteilung, ob und in welchem Umfang zeitliche Reserven zur Verfügung stehen (vgl. Kennzahl <i>zeitliche Flexibilität</i>). Je niedriger der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto höher ist die Flexibilität bezogen auf den Mitarbeiterereinsatz und desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten. Beispielsweise können durch zeitliche Reserven Zykluszeitschwankungen aufgrund von schwankenden Transportbedarfen je Tour abgefangen werden. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel die Mitarbeiter möglichst niedrig auszulasten.</p>	
<p>Daten</p> <p>Siehe L-Z-5 und L-Z-8 bis L-Z-11 / Tätigkeitsaufnahmen und -analysen / Schicht- und Arbeitszeitdaten</p>	
<p>Beeinflussung durch</p> <p>L-Z-5: Wartezeit / L-Z-8 bis L-Z-11: Beladezeit / Fahrzeit / Haltepunktzeit / Entladezeit / sonstige Tätigkeiten / Arbeitszeiten</p>	
<p>Beeinflusst</p> <p>Q-F-2: Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter</p>	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit
Definition	
$WBZ_{min} = \min(t_K + t_{\ddot{U}} + t_V + t_T)$	
t_K	Erkennungszeit
t_T	Transportzeit
$t_{\ddot{U}}$	Übermittlungszeit
t_V	Zeit für vorgelagerte Prozesse (z. B. Beladung oder Pufferung)
WBZ_{min}	minimale Wiederbeschaffungszeit
Beschreibung	
<p>Die <i>minimale Wiederbeschaffungszeit</i> ist die kürzest mögliche Zeitspanne zwischen der Signalisierung eines Transportbedarfs und der Bereitstellung des zugehörigen Transportguts am Bereitstellort. Sie umfasst die Zeit für die Erkennung des Transportbedarfs, die Übermittlung des Nachschubauftrags, vorgelagerte Prozesse, z. B. Auslagern und Puffern von Transportgütern, und die Transportzeit des Transportmittels.</p>	
Zweck	
<p>Die minimale Wiederbeschaffungszeit definiert die mindestens erforderliche Pufferreichweite und ist damit im Rahmen der Pufferdimensionierung an den Bereitstellorten relevant.</p>	
Daten	
<p>Prozessbeschreibung Wiederbeschaffung / Daten zur Informationstechnik / Daten zur Materialflusssteuerung / Daten zur Integration/Entkopplung der Be- und Entladung / Zeitaufnahmen und -analysen</p>	
Beeinflussung durch	
<p>Erkennungszeit / Übermittlungszeit / Zeit für vorgelagerte Prozesse / Transportzeit</p>	
Beeinflusst	
<p>Pufferdimensionierung</p>	
Bemerkung	
<p>Die Wiederbeschaffungszeit ist für jeden Bereitstellort separat zu bestimmen. Für den praktischen Einsatz als Kennzahl ist hingegen die Berechnung der Wiederbeschaffungszeit für einen Referenz-Bereitstellort sowie die überschlägige Bestimmung der jeweiligen Zeitanteile anhand der Zykluszeit sinnvoll.</p>	

L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit
Definition	
$WBZ_{max} = \max(t_K + t_{\ddot{U}} + t_V + t_T)$	
t_K	Erkennungszeit
t_T	Transportzeit
$t_{\ddot{U}}$	Übermittlungszeit
t_V	Zeit für vorgelagerte Prozesse (z. B. Beladung oder Pufferung)
WBZ_{max}	maximale Wiederbeschaffungszeit
Beschreibung	
Die <i>maximale Wiederbeschaffungszeit</i> ist die längst mögliche Zeitspanne zwischen der Signalisierung eines Transportbedarfs und der Bereitstellung des zugehörigen Transportguts am Bereitstellort. Sie umfasst die Zeit für die Erkennung des Transportbedarfs, die Übermittlung des Nachschubauftrags, vorgelagerte Prozesse, z. B. Auslagern und Puffern von Transportgütern, und die Transportzeit des Transportmittels.	
Zweck	
Die maximale Wiederbeschaffungszeit definiert die maximal erforderliche Pufferreichweite und ist damit im Rahmen der Pufferdimensionierung an den Bereitstellorten relevant.	
Daten	
Prozessbeschreibung Wiederbeschaffung / Daten zur Informationstechnik / Daten zur Materialflusssteuerung / Daten zur Integration/Entkopplung der Be- und Entladung / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
Erkennungszeit / Übermittlungszeit / Zeit für vorgelagerte Prozesse / Transportzeit	
Beeinflusst	
Pufferdimensionierung	
Bemerkung	
Die Wiederbeschaffungszeit ist für jeden Bereitstellort separat zu bestimmen. Für den praktischen Einsatz als Kennzahl ist hingegen die Berechnung der Wiederbeschaffungszeit für einen Referenz-Bereitstellort sowie die überschlägige Bestimmung der jeweiligen Zeitanteile anhand der Zykluszeit sinnvoll.	

L-R-1	Anzahl Ladungsträger
Definition	
$n_{LT} = \sum_{lt=1}^{u_{lt}} n_{lt}$	
lt	Index des Ladungsträgers (z. B. KLT oder GLT)
n_{lt}	Anzahl der Einheiten von Ladungsträger lt
n_{LT}	Anzahl aller Ladungsträger
u_{lt}	Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger
Beschreibung	
Die <i>Anzahl Ladungsträger</i> entspricht der Summe der Ladungsträgeranzahl über alle Ladungsträgerarten.	
Zweck	
Die Anzahl der Ladungsträger ist im Zuge der Berechnung der Investitionskosten für Ladungsträger notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Ladungsträgereinsatzes.	
Daten	
Ladungsträgerübersicht	
Beeinflussung durch	
Art der Ladungsträger / Anzahl der Einheiten je Ladungsträgerart	
Beeinflusst	
W-I-2: Investitionskosten Ladungsträger	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-R-2	Anzahl Transportmittel
Definition	
$n_{TM} = \sum_{tm=1}^{u_{tm}} n_{tm}$	
n_{tm}	Anzahl der Einheiten von Transportmittel tm
n_{TM}	Anzahl aller Transportmittel
tm	Index des Transportmittels (z. B. Fahrzeug oder Anhänger)
u_{tm}	Anzahl unterschiedlicher Transportmittel
Beschreibung	
Die Anzahl Transportmittel entspricht der Summe der Transportmittelanzahl über alle Transportmittelarten.	
Zweck	
Die Anzahl der Transportmittel ist im Zuge der Berechnung der Investitionskosten für Transportmittel notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Transportmitteleinsatzes.	
Daten	
Transportmittelübersicht	
Beeinflussung durch	
Art der Transportmittel / Anzahl der Einheiten je Transportmittelart	
Beeinflusst	
W-I-3: Investitionskosten Transportmittel	

L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik
Definition	
$n_{BE} = \sum_{be=1}^{u_{be}} n_{be}$	
be	Index der Be- und Entladetechnik (z. B. Beladestation Quelle oder Entladestation Leergut)
n_{be}	Anzahl der Einheiten von Be- und Entladetechnik be
n_{BE}	Anzahl aller Be- und Entladetechniken
u_{be}	Anzahl unterschiedlicher Be- und Entladetechniken
Beschreibung	
Die Anzahl Be- und Entladetechnik entspricht der Summe der Be- und Entladetechnikanzahl über alle Be- und Entladetechniken.	
Zweck	
Die Anzahl der Be- und Entladetechnik ist im Zuge der Berechnung der Investitionskosten für Be- und Entladetechnik notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Be- und Entladetechnikeinsatzes.	
Daten	
Übersicht vorhandener Be- und Entladetechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Be- und Entladetechnik / Anzahl der Einheiten je Be- und Entladetechnik	
Beeinflusst	
W-I-4: Investitionskosten Be- und Entladetechnik	

L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik
Definition	
$n_{BT} = \sum_{bt=1}^{u_{bt}} n_{bt}$	
<i>bt</i>	<i>Index der Bereitstelltechnik (z. B. KLT-Regal oder Rollenbahn)</i>
<i>n_{bt}</i>	<i>Anzahl der Einheiten von Bereitstelltechnik bt</i>
<i>n_{BT}</i>	<i>Anzahl aller Bereitstelltechniken</i>
<i>u_{bt}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Bereitstelltechniken</i>
Beschreibung	
Die <i>Anzahl Bereitstelltechnik</i> entspricht der Summe der Bereitstelltechnikanzahl über alle Bereitstelltechniken.	
Zweck	
Die Anzahl der Bereitstelltechnik ist im Zuge der Berechnung der Investitionskosten für Bereitstelltechnik notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Bereitstelltechnikeinsatzes.	
Daten	
Übersicht vorhandener Bereitstelltechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Bereitstelltechnik / Anzahl der Einheiten je Bereitstelltechnik	
Beeinflusst	
W-I-5: Investitionskosten Bereitstelltechnik	

L-R-5	Anzahl Informationstechnik
Definition	
$n_{IT} = \sum_{it=1}^{u_{it}} n_{it}$	
<i>it</i>	<i>Index der Informationstechnik (z. B. Scanner oder Computer)</i>
<i>n_{it}</i>	<i>Anzahl der Einheiten von Informationstechnik it</i>
<i>n_{IT}</i>	<i>Anzahl aller Informationstechniken</i>
<i>u_{it}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Informationstechniken</i>
Beschreibung	
Die <i>Anzahl Informationstechnik</i> entspricht der Summe der Informationstechnikanzahl über alle Informationstechniken.	
Zweck	
Die Anzahl der Informationstechnik ist im Zuge der Berechnung der Investitionskosten für Informationstechnik notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Informationstechnikeinsatzes.	
Daten	
Übersicht vorhandener Informationstechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Informationstechnik / Anzahl der Einheiten je Informationstechnik	
Beeinflusst	
W-I-6: Investitionskosten Informationstechnik	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-R-6	Anzahl Mitarbeiter
Definition	
$n_M = \sum_{m=1}^{u_m} n_m$	
<i>m</i>	<i>Index der Mitarbeitergruppe (z. B. Routenzugfahrer oder Logistiker)</i>
<i>n_m</i>	<i>Anzahl parallel eingesetzter Mitarbeiter je Mitarbeitergruppe m</i>
<i>n_M</i>	<i>Anzahl aller Mitarbeiter</i>
<i>u_m</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Mitarbeitergruppen</i>
Beschreibung	
Die <i>Anzahl Mitarbeiter</i> entspricht der Summe der Mitarbeiteranzahl über alle Mitarbeitergruppen.	
Zweck	
Die Anzahl der Mitarbeiter ist im Zuge der Berechnung der Personalkosten notwendig und geht damit in die Betriebskosten ein. Sie dient des Weiteren dem Vergleich mit alternativen Transportsystemen hinsichtlich des Mitarbeiterereinsatzes.	
Daten	
Übersicht Mitarbeiter / Controllingdaten	
Beeinflussung durch	
Art der Personalgruppe / Anzahl der Mitarbeiter je Personalgruppe	
Beeinflusst	
W-B-9: Personalkosten	

L-R-7	Automatisierungsgrad
Definition	
$AG = \frac{n_{p,aut}}{n_{p,ges}} \times 100 \%$	
<i>AG</i>	<i>Automatisierungsgrad</i>
<i>n_{p,aut}</i>	<i>Anzahl automatisierter Prozesse</i>
<i>n_{p,ges}</i>	<i>Anzahl aller Prozesse</i>
Beschreibung	
Der <i>Automatisierungsgrad</i> entspricht dem prozentualen Anteil der automatisierten Prozesse an allen Prozessen eines Routenzugsystems.	
Zweck	
Der Automatisierungsgrad gibt Aufschluss darüber, in welchem Umfang Routenzugprozesse automatisiert anstatt von Mitarbeitern durchgeführt werden. Im Vergleich mit anderen Routenzug- und Transportsystemen sind damit insbesondere Kosteneinspar- und Qualitätssteigerungspotentiale identifizierbar. Ein geringer Automatisierungsgrad geht in der Regel mit einem verhältnismäßig hohen Personalkostenanteil einher, weist allerdings eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Prozessgestaltung auf. Ein hoher Automatisierungsgrad erfordert demgegenüber meist hohe Investitionen und ist im Regelfall mit einer geringen Flexibilität verbunden.	
Daten	
Prozessbeschreibungen / Übersicht eingesetzter Technik	
Beeinflussung durch	
Anzahl automatisierter Prozesse / Anzahl aller Prozesse	
Beeinflusst	
Entscheidung über Automatisierung von Prozessen	
Bemerkung	
Der Automatisierungsgrad eines Routenzugsystems wird durch die routenzugspezifischen Prozesse Beladung, Fahrt (inkl. Halten) und Entladung bestimmt. Entkoppelte Prozesse sind separat zu betrachten, z. B. wenn in einer mehrstufigen Beladung Anhänger automatisch vorbeladen und anschließend manuell angekuppelt werden.	

A.2 Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen

L-R-8	Verfügbarkeit
Definition	
$V = \frac{\text{geplante Einsatzzeit} - \text{Ausfallzeit}}{\text{geplante Einsatzzeit}} \times 100 \%$	
<i>V</i>	<i>Verfügbarkeit</i>
Beschreibung	
Die <i>Verfügbarkeit</i> ist der Anteil der geplanten Einsatzzeit, der für die Erfüllung der Aufgabe eines technischen Systems oder eines Systemelements zur Verfügung steht.	
Zweck	
Die Verfügbarkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass das betrachtete System oder Systemelement zu einem bestimmten Zeitpunkt einsatzbereit ist und dient dem Vergleich von Transportsystemen untereinander.	
Daten	
Beobachtungen / Zeitaufnahmen und -analysen / Wartungs- und Reparaturprotokolle	
Beeinflussung durch	
Geplante Einsatzzeit / Ausfallzeit	
Beeinflusst	
Systemvergleich	

L-R-9	Routenzugkapazität
Definition	
$K_{RZ} = \sum_{lt=1}^{u_{lt}} n_{lt,RZ}$	
<i>K_{RZ}</i>	<i>Routenzugkapazität (maximale Anzahl Normladungsträger (NLT) pro Tour)</i>
<i>lt</i>	<i>Index des Ladungsträgers (z. B. KLT oder GLT)</i>
<i>n_{lt,RZ}</i>	<i>maximale Anzahl gleichzeitig transportierbarer Einheiten von Ladungsträger lt</i>
<i>u_{lt}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger</i>
Beschreibung	
Die <i>Routenzugkapazität</i> entspricht der Summe der maximalen Anzahl gleichzeitig transportierbarer Einheiten aller Ladungsträger eines Routenzugs.	
Zweck	
Die Routenzugkapazität dient im Rahmen der Dimensionierung zur Bestimmung des maximalen Tourenstartabstands. Je höher die Transportkapazität des Routenzugs ist, desto größer ist der maximal mögliche Tourenstartabstand. Des Weiteren ist die Routenzugkapazität für die Berechnung des kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs notwendig.	
Daten	
Technische Daten des Routenzugs bzw. der Anhänger / Unternehmensvorgaben	
Beeinflussung durch	
Transportkapazität Routenzug bzw. Anhänger / Anzahl Anhänger je Routenzug	
Beeinflusst	
L-Z-1: maximal möglicher Tourenstartabstand / L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour
Definition	
$n_{LT,Tour} = \lambda_R \times t_{TA}$	
$n_{LT,Tour}$	<i>mittlere Anzahl Ladungsträger pro Tour</i>
t_{TA}	<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>
λ_R	<i>Ladungsträgerdurchsatz der Route</i>
Beschreibung	
Die <i>mittlere Beladung pro Tour</i> entspricht dem Produkt aus dem Ladungsträgerdurchsatz pro Route und dem tatsächlichen Tourenstartabstand.	
Zweck	
Die mittlere Beladung pro Tour gibt an, wie viele Ladungsträger im Durchschnitt pro Tour transportiert werden und erlaubt damit Routenzugsysteme hinsichtlich ihres Durchsatzes pro Tour zu vergleichen. Des Weiteren ist die mittlere Beladung pro Tour für die Berechnung des kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs notwendig.	
Daten	
Dimensionierungsergebnisse / Beobachtungen	
Beeinflussung durch	
Anzahl der Einheiten je Ladungsträgerart und Tour	
Beeinflusst	
L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	

L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug
Definition	
$\eta_{K,RZ} = \frac{n_{LT,Tour}}{K_{RZ}} \times 100 \% = \frac{t_{TA}}{t_{TA,max}} \times 100 \%$	
K_{RZ}	<i>Routenzugkapazität (maximale Anzahl Normladungsträger (NLT) pro Tour)</i>
$n_{LT,Tour}$	<i>mittlere Anzahl Ladungsträger pro Tour</i>
t_{TA}	<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>
$t_{TA,max}$	<i>maximal möglicher Tourenstartabstand</i>
$\eta_{K,RZ}$	<i>kapazitiver Nutzungsgrad des Routenzugs</i>
Beschreibung	
Der <i>kapazitive Nutzungsgrad des Routenzugs</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Transportkapazität des Routenzugs, der im Durchschnitt für den Ladungsträgertransport genutzt wird. Die Berechnung kann alternativ über das Verhältnis des tatsächlichen Tourenstartabstands zum maximal möglichen Tourenstartabstand erfolgen.	
Zweck	
Der kapazitive Nutzungsgrad gibt Aufschluss darüber, inwieweit die zur Verfügung stehende Transportkapazität des Routenzugs ausgenutzt wird. Je höher der kapazitive Nutzungsgrad ist, desto besser ist die Ausnutzung der Transportkapazität. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel den Routenzug möglichst hoch auszulasten. Des Weiteren dient der kapazitive Nutzungsgrad der Beurteilung, ob und in welchem Umfang kapazitive Reserven zur Verfügung stehen (vgl. Kennzahl <i>kapazitive Flexibilität Routenzug</i>). Je niedriger der kapazitive Nutzungsgrad ist, desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten. Beispielsweise können durch kapazitive Reserven schwankende Transportbedarfe je Tour abgefangen werden. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel den Routenzug möglichst niedrig auszulasten.	
Daten	
Siehe L-Z-1 und L-Z-3 bzw. L-R-8 und L-R-9	
Beeinflussung durch	
L-Z-1: Maximal möglicher Tourenstartabstand / L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand / L-R-9: Routenzugkapazität / L-R-10: Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	
Beeinflusst	
Q-F-3: Kapazitive Flexibilität Routenzug	

L-R-12	Pufferkapazität Bereitstellorte
Definition	
$K_{BO} = \sum_{BO=1}^{u_{BO}} \sum_{lt=1}^{u_{lt}} n_{lt,BO}$	
<i>BO</i>	<i>Index des Bereitstellorts (z. B. Bereitstellort 1 oder Bereitstellort 2)</i>
<i>K_{BO}</i>	<i>maximale Anzahl Ladungsträgerstellplätze aller Puffer</i>
<i>lt</i>	<i>Index des Ladungsträgers (z. B. KLT oder GLT)</i>
<i>n_{lt,BO}</i>	<i>maximale Anzahl Einheiten von Ladungsträger lt am Bereitstellort BO</i>
<i>u_{BO}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Bereitstellorte</i>
<i>u_{lt}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger</i>
Beschreibung	
Die <i>Pufferkapazität</i> entspricht der Summe der maximalen Anzahl der Einheiten aller Ladungsträgertypen über alle Bereitstellorte eines Routenzugsystems.	
Zweck	
Die <i>Pufferkapazität</i> gibt Aufschluss darüber wie viele Ladungsträger je Ladungsträgertyp und Bereitstellort maximal im Routenzugsystem gepuffert werden können und dient der Berechnung der maximalen Bestandsreichweite der Puffer. Je höher die <i>Pufferkapazität</i> ist, desto größer ist die maximale Bestandsreichweite und desto größer darf die Wiederbeschaffungszeit sein. Des Weiteren ist die <i>Pufferkapazität</i> für die Berechnung des kapazitiven Nutzungsgrades der Puffer notwendig.	
Daten	
Technische Daten der Bereitstelltechnik je Puffer / Unternehmensvorgaben	
Beeinflussung durch	
Pufferkapazität je Ladungsträgertyp und Puffer	
Beeinflusst	
L-R-14: Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer / Bestandsreichweiten	

L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer
Definition	
$n_{LT,P} = \sum_{lt=1}^{u_{lt}} n_{lt,P}$	
<i>lt</i>	<i>Index des Ladungsträgers (z. B. KLT oder GLT)</i>
<i>n_{lt,P}</i>	<i>mittlere Anzahl Einheiten von Ladungsträger lt pro Puffer</i>
<i>n_{LT,P}</i>	<i>mittlere Anzahl Ladungsträger pro Puffer</i>
<i>u_{lt}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger</i>
Beschreibung	
Die <i>mittlere Belegung je Puffer</i> entspricht der Summe der mittleren Anzahl Einheiten aller Ladungsträger pro Puffer.	
Zweck	
Die <i>mittlere Belegung je Puffer</i> gibt an, wie viele Ladungsträger im Durchschnitt gepuffert werden und erlaubt damit Routenzugsysteme hinsichtlich ihres Umlaufbestands zu vergleichen. Des Weiteren ist die <i>mittlere Belegung je Puffer</i> für die Berechnung des kapazitiven Nutzungsgrades des Puffers notwendig und kann für die überschlägige Berechnung der Bestandskosten herangezogen werden.	
Daten	
Bestandsdaten / Beobachtungen	
Beeinflussung durch	
Anzahl der Einheiten je Ladungsträgerart und Puffer	
Beeinflusst	
L-R-14: Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer / W-B-6: Bestandskosten / Pufferdimensionierung	

L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer
Definition	
$\eta_{K,P} = \frac{n_{LT,P}}{K_{BO}} \times 100 \%$	
K_{BO}	maximale Anzahl Ladungsträgerstellplätze aller Puffer
$n_{LT,P}$	mittlere Anzahl Ladungsträger pro Puffer
$\eta_{K,P}$	kapazitiver Nutzungsgrad des Puffers
Beschreibung	
Der <i>kapazitive Nutzungsgrad des Puffers</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Pufferkapazität der Bereitstellorte eines Routenzugsystems, der im Durchschnitt für die Pufferung von Ladungsträgern genutzt wird.	
Zweck	
Der kapazitive Nutzungsgrad gibt Aufschluss darüber, inwieweit die zur Verfügung stehende Pufferkapazität der Bereitstellorte des Routenzugsystems ausgenutzt wird. Je höher der kapazitive Nutzungsgrad ist, desto besser ist die Ausnutzung der Pufferkapazität und desto höher sind die Bestandsreichweiten der Puffer. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel die Puffer möglichst hoch auszulasten. Des Weiteren dient der kapazitive Nutzungsgrad der Beurteilung, ob und in welchem Umfang kapazitive Reserven zur Verfügung stehen. Je niedriger der kapazitive Nutzungsgrad ist, desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten. Beispielsweise können durch kapazitive Reserven schwankende Transportbedarfe je Tour abgefangen werden. Diese Sichtweise führt zu dem Ziel die Puffer möglichst niedrig auszulasten.	
Daten	
Siehe L-R-12 und L-R-13	
Beeinflussung durch	
L-R-12: Pufferkapazität Bereitstellorte /L-R-13: Mittlere Belegung je Puffer	
Beeinflusst	
Pufferdimensionierung	

L-M-1	Durchsatz
Definition	
$\Lambda_R = \sum_{H=1}^{n_H} \Lambda_H = \sum_{H=1}^{n_H} \sum_{A=1}^{n_A} \frac{\lambda_{A,H}}{\varphi_{LT}}$	
A	Index der Artikel (z. B. Artikel 1 oder Artikel 2)
H	Index des Haltepunkts (z. B. Haltepunkt 1 oder Haltepunkt 2)
n_A	Anzahl Artikel
n_H	Anzahl Haltepunkte
Λ_R	auf NLT normierter Durchsatz der Route
Λ_H	auf NLT normierter Durchsatz des Haltepunkts
$\lambda_{A,H}$	Ladungsträgerdurchsatz des Artikels A am Haltepunkt H
φ_{LT}	NLT-Äquivalent (gibt an, wie viele Ladungsträger des Typs lt einem NLT entsprechen)
Beschreibung	
Der <i>Durchsatz</i> bezeichnet die Anzahl der Ladungsträger, die in einer bestimmten Zeit die betrachtete Stelle des Systems passiert. Der auf NLT normierte Durchsatz der Route entspricht der Summe der auf NLT normierten Durchsätze aller Haltepunkte. Diese werden wiederum auf Artikelebene mithilfe des spezifischen Ladungsträgerdurchsatzes und des NLT-Äquivalents berechnet [VDI 2016c, S. 3].	
Zweck	
Der Durchsatz dient im Rahmen der Dimensionierung zur Bestimmung des maximalen Tourenstartabstands. Je höher der Durchsatz der Route ist, desto kleiner ist der maximal mögliche Tourenstartabstand.	
Daten	
Produktionsprogramm / Verbrauchsdaten / Ladungsträgerdaten / Füllmengen	
Beeinflussung durch	
Ladungsträgerdurchsatz je Artikel und Haltepunkt / NLT-Äquivalent je Ladungsträgertyp	
Beeinflusst	
L-Z-1: Maximal möglicher Tourenstartabstand	

L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug
Definition	
$S_{F,RZ} = \frac{S_R \times n_{Tour}}{n_{RZ}}$	
n_{RZ}	Anzahl Routenzüge
n_{Tour}	Anzahl Touren
$S_{F,RZ}$	Länge des Fahrwegs pro Routenzug
S_R	Routenlänge
Beschreibung	
Die Länge des Fahrwegs pro Routenzug berechnet sich aus dem Produkt von Routenlänge und Anzahl der Touren je Zeiteinheit geteilt durch die Anzahl der eingesetzten Routenzüge.	
Zweck	
Die Länge des Fahrwegs pro Routenzug gibt Aufschluss darüber, welche Strecke von einem Routenzug in einer bestimmten Zeiteinheit zurückgelegt wird und ermöglicht den Vergleich mit anderen Transportsystemen. Die Kennzahl dient beispielsweise zur Festlegung und Kontrolle fahrleistungsabhängiger Wartungsarbeiten an Transportmitteln (z. B. Reifenwechsel aufgrund von Verschleiß).	
Daten	
Siehe S-5, L-R-2 und L-M-5	
Beeinflussung durch	
S-5: Routenlänge / L-R-2: Anzahl Transportmittel / L-M-5: Anzahl Touren	
Beeinflusst	
Systemvergleich / Wartungsintervalle	

L-M-3	Länge Fahrweg pro Zeiteinheit
Definition	
$S_{F,Z} = S_R \times n_{Tour}$	
n_{Tour}	Anzahl Touren
$S_{F,Z}$	Länge des Fahrwegs pro Zeiteinheit
S_R	Routenlänge
Beschreibung	
Die Länge des Fahrwegs pro Zeiteinheit berechnet sich aus dem Produkt von Routenlänge und Anzahl der Touren je Zeiteinheit.	
Zweck	
Die Länge des Fahrwegs pro Zeiteinheit gibt Aufschluss darüber, welche Strecke von allen Routenzügen in einer bestimmten Zeiteinheit zurückgelegt wird und ermöglicht den Vergleich mit anderen Transportsystemen.	
Daten	
Siehe S-5 und L-M-5	
Beeinflussung durch	
S-5: Routenlänge / L-M-5: Anzahl Touren	
Beeinflusst	
Systemvergleich	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter
Definition	
$s_{G,M} = \frac{\sum_{H=1}^{n_H} (s_{G,H} \times \sum_{A=1}^{n_A} \lambda_{A,H})}{n_M}$	
<i>A</i>	<i>Index der Artikel (z. B. Artikel 1 oder Artikel 2)</i>
<i>H</i>	<i>Index des Haltepunkts (z. B. Haltepunkt 1 oder Haltepunkt 2)</i>
<i>n_A</i>	<i>Anzahl Artikel</i>
<i>n_H</i>	<i>Anzahl Haltepunkte</i>
<i>n_M</i>	<i>Anzahl aller Mitarbeiter</i>
<i>s_{G,H}</i>	<i>Länge des Gehwegs am Haltepunkt H</i>
<i>s_{G,M}</i>	<i>Länge des Gehwegs pro Mitarbeiter</i>
<i>λ_{A,H}</i>	<i>Ladungsträgerdurchsatz des Artikels A am Haltepunkt H</i>
Beschreibung	
Die <i>Länge des Gehwegs pro Mitarbeiter</i> berechnet sich aus dem Produkt des Gehwegs je Haltepunkt und der jeweiligen Anzahl Transporteinheiten des Haltepunkts dividiert durch die Anzahl der Mitarbeiter.	
Zweck	
Die Länge des Gehwegs pro Mitarbeiter gibt Aufschluss darüber, welche Strecke je Mitarbeiter in einer bestimmten Zeiteinheit zurückgelegt wird und ermöglicht den Vergleich mit anderen Transportsystemen. Sie dient insbesondere der Beurteilung der physiologischen Belastung der Mitarbeiter.	
Daten	
Siehe L-R-6 und L-M-1 / Layoutdaten	
Beeinflussung durch	
Länge des Gehwegs je Haltepunkt / L-R-6: Anzahl Mitarbeiter / L-M-1: Durchsatz	
Beeinflusst	
Q-E-1: Punktwert Multiple-Lasten-Tool / Systemvergleich	
Bemerkung	
Die Anzahl der Transporteinheiten entspricht dem Durchsatz je Artikel und Haltepunkt ohne Berücksichtigung der jeweiligen NLT-Äquivalente der Ladungsträgertypen.	

L-M-5	Anzahl Touren
Definition	
$n_{Tour} = \frac{1}{t_{TA}}$	
<i>n_{Tour}</i>	<i>Anzahl Touren</i>
<i>t_{TA}</i>	<i>realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand</i>
Beschreibung	
Die <i>Anzahl der Touren</i> berechnet sich als Kehrwert des tatsächlichen Tourenstartabstands.	
Zweck	
Die Anzahl der Touren dient dem Vergleich von Routenzugsystemen hinsichtlich der Transportfrequenz und der Berechnung der Länge des Fahrwegs pro Routenzug und Zeiteinheit.	
Daten	
Siehe L-Z-3	
Beeinflussung durch	
L-Z-3: Tatsächlicher Tourenstartabstand	
Beeinflusst	
L-M-2: Länge Fahrweg pro Routenzug / L-M-3: Länge Fahrweg pro Zeiteinheit / Systemvergleich	

A.2 Definitionsblätter Logistikleistungskennzahlen

L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour
Definition	
$n_h = \sum_{H=1}^{n_H} p_H = 1 - \prod_{A=1}^{n_A} (1 - \min(\frac{\lambda_{A,H}}{n_{tour}}, 1))$	
<i>A</i>	<i>Index der Artikel (z. B. Artikel 1 oder Artikel 2)</i>
<i>H</i>	<i>Index des Haltepunkts (z. B. Haltepunkt 1 oder Haltepunkt 2)</i>
<i>n_A</i>	<i>Anzahl Artikel</i>
<i>n_h</i>	<i>Anzahl Haltevorgänge pro Tour</i>
<i>n_H</i>	<i>Anzahl Haltepunkte</i>
<i>n_{Tour}</i>	<i>Anzahl Touren</i>
<i>p_H</i>	<i>Wahrscheinlichkeit für einen Halt am Haltepunkt H</i>
<i>λ_{A,H}</i>	<i>Ladungsträgerdurchsatz des Artikels A am Haltepunkt H</i>
Beschreibung	
Die Anzahl der Haltevorgänge pro Tour berechnet sich, indem je Haltepunkt die Wahrscheinlichkeit für einen Halt ermittelt wird und diese für alle Haltepunkte der Route summiert werden.	
Zweck	
Die Anzahl der Haltevorgänge pro Tour geht in die Haltepunktzeit ein.	
Daten	
Siehe L-M-1 und L-M-5	
Beeinflussung durch	
L-M-1: Durchsatz / L-M-5: Anzahl Touren	
Beeinflusst	
L-Z-10: Haltepunktzeit	

L-M-7	Verkehrsdichte
Definition	
$VD = \frac{n_{RZ}}{s_{F,Z}}$	
<i>n_{RZ}</i>	<i>Anzahl Routenzüge</i>
<i>s_{F,Z}</i>	<i>Länge des Fahrwegs pro Zeiteinheit</i>
<i>VD</i>	<i>Verkehrsdichte</i>
Beschreibung	
Die Verkehrsdichte berechnet sich aus der Anzahl der Routenzüge dividiert durch die Länge des Fahrwegs in einem bestimmten Zeitraum.	
Zweck	
Die Verkehrsdichte dient der Beurteilung des Verkehrsaufkommens und dem Vergleich mit anderen Transportsystemen. Die Verkehrsdichte ist beispielsweise ein Indikator für das Risiko von Störungen und Blockaden auf bestimmten Streckenabschnitten und wird deshalb im Rahmen der Bestimmung von Fahrplänen oder der Routenneuplanung berücksichtigt.	
Daten	
Layoutdaten / Ergebnis der Routenplanung / Prozessanalysen / Beobachtungen	
Beeinflussung durch	
L-R-2: Anzahl Transportmittel / S-5: Routenlänge	
Beeinflusst	
Systemvergleich / Fahrplanerstellung / Routenplanung	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

L-M-8	Gesamtnutzungsgrad Routenzug
Definition	
$\eta_{Ges,RZ} = \frac{\eta_{T,RZ} + \eta_{K,RZ}}{2}$	
$\eta_{Ges,RZ}$	Gesamtnutzungsgrad des Routenzugs
$\eta_{K,RZ}$	kapazitiver Nutzungsgrad des Routenzugs
$\eta_{T,RZ}$	zeitlicher Nutzungsgrad des Routenzugs
Beschreibung	
Der <i>Gesamtnutzungsgrad</i> berechnet sich als Mittelwert des zeitlichen und kapazitiven Nutzungsgrades des Routenzugs.	
Zweck	
Der Gesamtnutzungsgrad ermöglicht den Vergleich von Routenzugsystemen mit unterschiedlichen zeitlichen und kapazitiven Nutzungsgraden.	
Daten	
Siehe L-Z-16 und L-R-10	
Beeinflussung durch	
L-Z-16: Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug / L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	
Beeinflusst	
Systemvergleich	
Bemerkung	
Abweichend von der VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2 erfolgt die Verknüpfung von zeitlichem und kapazitivem Nutzungsgrad additiv, anstatt multiplikativ [VDI 2016c, S. 9 f.]. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die Nutzungsgrade linear miteinander verknüpft sind und vom Anwender leichter interpretierbar sind. Zum anderen ist nur mit der additiven Verknüpfung eine konsistente Berechnung der Flexibilitätskennzahlen Q-F-1 bis Q-F-4 möglich.	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-I-1	Investitionskosten Gesamt
Definition	
$I_{GES} = I_{LT} + I_{TM} + I_{BE} + I_{BT} + I_{IT} + I_{SO}$	
I_{BE}	Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik
I_{BT}	Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik
I_{GES}	Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem
I_{IT}	Summe aller Investitionen in Informationstechnik
I_{LT}	Summe aller Investitionen in Ladungsträger
I_{SO}	Summe aller sonstigen Investitionen
I_{TM}	Summe aller Investitionen in Transportmittel
Beschreibung	
Die <i>Investitionskosten Gesamt</i> entsprechen der Summe aller Investitionen in technische Systemelemente zzgl. sonstiger Investitionen.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von technischen Systemelementen und der Implementierung eines Routenzugsystems eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über kalkulatorische Zinsen in die Betriebskosten ein. In Verbindung mit den Betriebskosten sind die Investitionskosten die Grundlage für die Verfahren der Investitionsrechnung.	
Daten	
Siehe W-I-2 bis W-I-7	
Beeinflussung durch	
W-I-2 bis W-I-7: Investitionskosten Ladungsträger / Investitionskosten Transportmittel / Investitionskosten Be- und Entladetechnik / Investitionskosten Bereitstelltechnik / Investitionskosten Informationstechnik / Sonstige Investitionskosten	
Beeinflusst	
Investitionsrechnung / W-I-8 bis W-I-13: Anteil Investitionskosten Ladungsträger / Transportmittel / Be- und Entladetechnik / Bereitstelltechnik / Informationstechnik / sonstige Investitionskosten / W-B-2: Kapitalkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene technische Systemelemente getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger
Definition	
$I_{LT} = \sum_{lt=1}^{u_{lt}} I_{lt} = \sum_{lt=1}^{u_{lt}} k_{lt} \times n_{lt}$	
I_{lt}	Investitionen in alle Einheiten des Ladungsträgers lt
I_{LT}	Summe aller Investitionen in Ladungsträger
k_{lt}	Kosten je Ladungsträger lt
lt	Index des Ladungsträgers (z. B. KLT oder GLT)
n_{lt}	Anzahl der Einheiten von Ladungsträger lt
u_{lt}	Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger
Beschreibung	
Die Investitionskosten Ladungsträger entsprechen der Summe aller Investitionen in Ladungsträger.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von Ladungsträgern eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Ladungsträgerübersicht	
Beeinflussung durch	
Art der Ladungsträger / Kosten je Ladungsträger / L-R-1: Anzahl Ladungsträger	
Beeinflusst	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-8: Anteil Investitionskosten Ladungsträger / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene Ladungsträger getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in Ladungsträger zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

W-I-3	Investitionskosten Transportmittel
Definition	
$I_{TM} = \sum_{tm=1}^{u_{tm}} I_{tm} = \sum_{tm=1}^{u_{tm}} k_{tm} \times n_{tm}$	
I_{tm}	Investitionen in alle Einheiten des Transportmittels tm
I_{TM}	Summe aller Investitionen in Transportmittel
k_{tm}	Kosten je Transportmittel tm
n_{tm}	Anzahl der Einheiten von Transportmittel tm
tm	Index des Transportmittels (z. B. Fahrzeug oder Anhänger)
u_{tm}	Anzahl unterschiedlicher Transportmittel
Beschreibung	
Die Investitionskosten Transportmittel entsprechen der Summe aller Investitionen in Transportmittel.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von Transportmitteln eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Transportmittelübersicht	
Beeinflussung durch	
Art der Transportmittel / Kosten je Transportmittel / L-R-2: Anzahl Transportmittel	
Beeinflusst	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-9: Anteil Investitionskosten Transportmittel / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene Transportmittel getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in Transportmittel zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik
Definition	
$I_{BE} = \sum_{be=1}^{u_{be}} I_{be} = \sum_{be=1}^{u_{be}} k_{be} \times n_{be}$	
<i>be</i>	Index der Be- und Entladetechnik (z. B. Beladestation Quelle oder Entladestation Leergut)
<i>I_{be}</i>	Investitionen in alle Einheiten der Be- und Entladetechnik <i>be</i>
<i>I_{BE}</i>	Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik
<i>k_{be}</i>	Kosten je Be- und Entladetechnik <i>be</i>
<i>n_{be}</i>	Anzahl der Einheiten von Be- und Entladetechnik <i>be</i>
<i>u_{be}</i>	Anzahl unterschiedlicher Be- und Entladetechniken
Beschreibung	
Die Investitionskosten Be- und Entladetechnik entsprechen der Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von Be- und Entladetechnik eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Übersicht vorhandener Be- und Entladetechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Be- und Entladetechnik / Kosten je Be- und Entladetechnik / L-R-3: Anzahl Be- und Entladetechnik	
Beeinflusst	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-10: Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene Be- und Entladetechnik getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in Be- und Entladetechnik zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik
Definition	
$I_{BT} = \sum_{bt=1}^{u_{bt}} I_{bt} = \sum_{bt=1}^{u_{bt}} k_{bt} \times n_{bt}$	
<i>bt</i>	<i>Index der Bereitstelltechnik (z. B. KLT-Regal oder Rollenbahn)</i>
<i>I_{bt}</i>	<i>Investitionen in alle Einheiten der Bereitstelltechnik bt</i>
<i>I_{BT}</i>	<i>Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik</i>
<i>k_{bt}</i>	<i>Kosten je Bereitstelltechnik bt</i>
<i>n_{bt}</i>	<i>Anzahl der Einheiten von Bereitstelltechnik bt</i>
<i>u_{bt}</i>	<i>Anzahl unterschiedlicher Bereitstelltechniken</i>
Beschreibung	
Die <i>Investitionskosten Bereitstelltechnik</i> entsprechen der Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von Bereitstelltechnik eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Übersicht vorhandener Bereitstelltechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Bereitstelltechnik / Kosten je Bereitstelltechnik / L-R-4: Anzahl Bereitstelltechnik	
Beeinflusst	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-11: Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene Bereitstelltechnik getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in Bereitstelltechnik zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik
Definition	
$I_{IT} = \sum_{it=1}^{u_{it}} I_{it} = \sum_{it=1}^{u_{it}} k_{it} \times n_{it}$	
I_{it}	Investitionen in alle Einheiten der Informationstechnik it
I_{IT}	Summe aller Investitionen in Informationstechnik
it	Index der Informationstechnik (z. B. Scanner oder Computer)
k_{it}	Kosten je Informationstechnik it
n_{it}	Anzahl der Einheiten von Informationstechnik it
u_{it}	Anzahl unterschiedlicher Informationstechniken
Beschreibung	
Die Investitionskosten Informationstechnik entsprechen der Summe aller Investitionen in Informationstechnik.	
Zweck	
Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von Informationstechnik eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Übersicht vorhandener Informationstechnik / L-R-5: Anzahl Informationstechnik	
Beeinflussung durch	
Art der Informationstechnik / Kosten je Informationstechnik / Anzahl Informationstechnik	
Beeinflusst	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-12: Anteil Investitionskosten Informationstechnik / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Bemerkung	
Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene Informationstechnik getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in Informationstechnik zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-I-7	Sonstige Investitionskosten
Definition	$I_{SO} = \sum_{so=1}^{u_{so}} I_{so} = \sum_{so=1}^{u_{so}} k_{so} \times n_{so}$
<i>I_{so}</i> <i>Investitionen in alle sonstigen Investitionseinheiten so</i> <i>I_{SO}</i> <i>Summe aller sonstigen Investitionen</i> <i>k_{so}</i> <i>Kosten je sonstiger Investitionseinheit so</i> <i>n_{so}</i> <i>Anzahl der sonstigen Investitionseinheiten so</i> <i>so</i> <i>Index der sonstigen Investitionen (z. B. Projektkosten oder Anlaufkosten)</i> <i>u_{so}</i> <i>Anzahl unterschiedlicher sonstiger Investitionen</i>	
Beschreibung	Die <i>sonstigen Investitionskosten</i> entsprechen der Summe aller Investitionen, die nicht den Kategorien Ladungsträger, Transportmittel, Be- und Entladetechnik, Bereitstelltechnik oder Informationstechnik zugeordnet werden.
Zweck	Die Investitionskosten sind im Zuge der Anschaffung von sonstiger Technik oder der Umsetzung von Projekten eine entscheidungsrelevante Größe. Sie gehen zudem über Abschreibungen und Wartungs- und Reparaturkosten in die Betriebskosten ein.
Daten	Beschaffungsdaten / Controllingdaten / Übersicht sonstiger Investitionen
Beeinflussung durch	Art der sonstigen Investitionen / Kosten je sonstiger Investitionseinheit / Anzahl sonstiger Investitionen
Beeinflusst	W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-13: Anteil sonstige Investitionskosten / W-B-3: Abschreibungen / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten
Bemerkung	Obwohl keine Investitionen in bereits vorhandene sonstige Technik oder umgesetzte Projekte getätigt werden, sind bei der Bewertung von bestehenden Routenzugsystemen die ursprünglichen Investitionskosten in sonstige Investitionen zu berücksichtigen, weil diese in die Betriebskosten eingehen.
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger
Definition	$I_{LT,\%} = \frac{I_{LT}}{I_{GES}} \times 100 \%$
<i>I_{GES}</i> <i>Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem</i> <i>I_{LT}</i> <i>Summe aller Investitionen in Ladungsträger</i> <i>I_{LT,%}</i> <i>prozentualer Anteil der Investitionen in Ladungsträger an allen Investitionen</i>	
Beschreibung	Der <i>Anteil Investitionskosten Ladungsträger</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Investitionen in Ladungsträger an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.
Zweck	Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.
Daten	Siehe W-I-1 und W-I-2
Beeinflussung durch	W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-2: Investitionskosten Ladungsträger
Beeinflusst	Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel
Definition	
$I_{TM,\%} = \frac{I_{TM}}{I_{GES}} \times 100 \%$	
<i>I_{GES}</i>	<i>Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem</i>
<i>I_{TM}</i>	<i>Summe aller Investitionen in Transportmittel</i>
<i>I_{TM,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Investitionen in Transportmittel an allen Investitionen</i>
Beschreibung	
Der Anteil Investitionskosten Transportmittel entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Investitionen in Transportmittel an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.	
Zweck	
Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.	
Daten	
Siehe W-I-1 und W-I-3	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-3: Investitionskosten Transportmittel	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten	

W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik
Definition	
$I_{BE,\%} = \frac{I_{BE}}{I_{GES}} \times 100 \%$	
<i>I_{BE}</i>	<i>Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik</i>
<i>I_{BE,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Investitionen in Be- und Entladetechnik an allen Investitionen</i>
<i>I_{GES}</i>	<i>Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem</i>
Beschreibung	
Der Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.	
Zweck	
Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.	
Daten	
Siehe W-I-1 und W-I-4	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-4: Investitionskosten Be- und Entladetechnik	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik
Definition	
$I_{BT,\%} = \frac{I_{BT}}{I_{GES}} \times 100 \%$	
<i>I_{BT}</i>	Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik
<i>I_{BT,%}</i>	prozentualer Anteil der Investitionen in Bereitstelltechnik an allen Investitionen
<i>I_{GES}</i>	Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem
Beschreibung	
Der Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.	
Zweck	
Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.	
Daten	
Siehe W-I-1 und W-I-5	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-5: Investitionskosten Bereitstelltechnik	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten	

W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik
Definition	
$I_{IT,\%} = \frac{I_{IT}}{I_{GES}} \times 100 \%$	
<i>I_{GES}</i>	Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem
<i>I_{IT}</i>	Summe aller Investitionen in Informationstechnik
<i>I_{IT,%}</i>	prozentualer Anteil der Investitionen in Informationstechnik an allen Investitionen
Beschreibung	
Der Anteil Investitionskosten Informationstechnik entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Investitionen in Informationstechnik an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.	
Zweck	
Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.	
Daten	
Siehe W-I-1 und W-I-6	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-6: Investitionskosten Informationstechnik	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten
Definition	
$I_{SO,\%} = \frac{I_{SO}}{I_{GES}} \times 100 \%$	
<i>I_{GES}</i>	Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem
<i>I_{SO}</i>	Summe aller sonstigen Investitionen
<i>I_{SO,%}</i>	prozentualer Anteil der sonstigen Investitionen an allen Investitionen
Beschreibung	
Der Anteil sonstige Investitionskosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller sonstigen Investitionen an der Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem.	
Zweck	
Die anteiligen Investitionskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Investitionskosten.	
Daten	
Siehe W-I-1 und W-I-7	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / W-I-7: Sonstige Investitionskosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Investitionskosten	

W-B-1	Betriebskosten
Definition	
$B_{GES} = B_{KA} + B_{AB} + B_{WR} + B_{LI} + B_{BS} + B_{FL} + B_{EN} + B_{PE}$	
<i>B_{AB}</i>	Summe aller Abschreibungen
<i>B_{BS}</i>	Summe aller Bestandskosten
<i>B_{EN}</i>	Summe aller Energiekosten
<i>B_{FL}</i>	Summe aller Flächenkosten
<i>B_{GES}</i>	Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems
<i>B_{KA}</i>	Summe aller Kapitalkosten
<i>B_{LI}</i>	Summe aller Lizenzkosten
<i>B_{PE}</i>	Summe aller Personalkosten
<i>B_{WR}</i>	Summe aller Wartungs- und Reparaturkosten
Beschreibung	
Die Betriebskosten entsprechen der Summe aller laufenden Kosten des Routenzugsystems pro Jahr.	
Zweck	
Die Betriebskosten sind in der Regel die Grundlage für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Routenzugsystems. Sie dienen dem Vergleich von Routenzugsystemen untereinander wie auch dem Vergleich von Routenzugsystemen mit alternativen Transportsystemen. In Verbindung mit den Investitionskosten sind die Betriebskosten die Grundlage für Investitionsrechnungen.	
Daten	
Siehe W-B-2 bis W-B-9	
Beeinflussung durch	
W-B-2 bis W-B-9: Kapitalkosten / Abschreibungen / Wartungs- und Reparaturkosten / Lizenzkosten / Bestandskosten / Flächenkosten / Energiekosten / Personalkosten	
Beeinflusst	
Investitionsrechnung / W-B-10 bis W-B-17: Anteil Kapitalkosten / Abschreibungen / Wartungs- und Reparaturkosten / Lizenzkosten / Bestandskosten / Flächenkosten / Energiekosten / Personalkosten / W-B-20 bis W-B-22: Anteil fixe Kosten / Anteil variable Kosten / Kosten pro Transporteinheit	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-B-2	Kapitalkosten
Definition	
$B_{KA} = \frac{I_{GES}}{2} \times i$	
B_{KA}	Summe aller Kapitalkosten
i	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr
I_{GES}	Summe aller Investitionen in das betrachtete Routenzugsystem
Beschreibung	
Die Kapitalkosten entsprechen den kalkulatorischen Zinsen für das durch die Investitionen gebundene Kapital pro Jahr.	
Zweck	
Die Kapitalkosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Siehe W-I-1 / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
W-I-1: Investitionskosten Gesamt / kalkulatorischer Zinssatz	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-10 Anteil Kapitalkosten	
Bemerkung	
Durchschnittsrechnung mit unveränderlichem Zinssatz und ohne Berücksichtigung von Zinseszinsen.	

W-B-3	Abschreibungen
Definition	
$B_{AB} = \frac{I_{LT}}{d_{LT}} + \frac{I_{TM}}{d_{TM}} + \frac{I_{BE}}{d_{BE}} + \frac{I_{BT}}{d_{BT}} + \frac{I_{IT}}{d_{IT}} + \frac{I_{SO}}{d_{SO}}$	
B_{AB}	Summe aller Abschreibungen
d_{BE}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der Be- und Entladetechnik
d_{BT}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der Bereitstelltechnik
d_{IT}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der Informationstechnik
d_{LT}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der Ladungsträger
d_{SO}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der sonstigen Investitionen
d_{TM}	wirtschaftliche Nutzungsdauer der Transportmittel
I_{BE}	Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik
I_{BT}	Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik
I_{IT}	Summe aller Investitionen in Informationstechnik
I_{LT}	Summe aller Investitionen in Ladungsträger
I_{SO}	Summe aller sonstigen Investitionen
I_{TM}	Summe aller Investitionen in Transportmittel
Beschreibung	
Die Abschreibungen entsprechen der Summe der Wertminderungen der Investitionen pro Jahr. Da die Investitionen in der Regel unterschiedliche Nutzungsdauern aufweisen, sind die Abschreibungen je Investition zu ermitteln.	
Zweck	
Die Abschreibungen gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Siehe W-I-2 bis W-I-7 / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
W-I-2 bis W-I-7: Investitionskosten Ladungsträger / Investitionskosten Transportmittel / Investitionskosten Be- und Entladetechnik / Investitionskosten Bereitstelltechnik / Investitionskosten Informationstechnik / Sonstige Investitionskosten / wirtschaftliche Nutzungsdauer	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-11 Anteil Abschreibungen	
Bemerkung	
Lineare Abschreibung über Nutzungsdauer.	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten
Definition	
$B_{WR} = I_{LT} \times w_{LT} + I_{TM} \times w_{TM} + I_{BE} \times w_{BE} + I_{BT} \times w_{BT} + I_{IT} \times w_{IT} + I_{SO} \times w_{SO}$	
<i>B_{WR}</i>	Summe aller Wartungs- und Reparaturkosten
<i>I_{BE}</i>	Summe aller Investitionen in Be- und Entladetechnik
<i>I_{BT}</i>	Summe aller Investitionen in Bereitstelltechnik
<i>I_{IT}</i>	Summe aller Investitionen in Informationstechnik
<i>I_{LT}</i>	Summe aller Investitionen in Ladungsträger
<i>I_{SO}</i>	Summe aller sonstigen Investitionen
<i>I_{TM}</i>	Summe aller Investitionen in Transportmittel
<i>w_{BE}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für Be- und Entladetechnik
<i>w_{BT}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für Bereitstelltechnik
<i>w_{IT}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für Informationstechnik
<i>w_{LT}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für Ladungsträger
<i>w_{SO}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für sonstige Investitionen
<i>w_{TM}</i>	Wartungs- und Reparaturfaktor für Transportmittel
Beschreibung	
Die <i>Wartungs- und Reparaturkosten</i> entsprechen der Summe der mit einem Wartungs- und Reparaturfaktor multiplizierten Investitionen. Der Wartungs- und Reparaturfaktor gibt den prozentualen Anteil der Investitionen an, der z. B. in Abhängigkeit der technischen Komplexität von Systemelementen pro Jahr für Wartung und Reparatur veranschlagt wird.	
Zweck	
Die Wartungs- und Reparaturkosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Siehe W-I-2 bis W-I-7 / Daten aus Rechnungswesen / Daten aus Instandhaltung	
Beeinflussung durch	
W-I-2 bis W-I-7: Investitionskosten Ladungsträger / Investitionskosten Transportmittel / Investitionskosten Be- und Entladetechnik / Investitionskosten Bereitstelltechnik / Investitionskosten Informationstechnik / Sonstige Investitionskosten / Wartungs- und Reparaturfaktor	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-12 Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	

W-B-5	Lizenzkosten
Definition	
$B_{LI} = \sum_{li=1}^{u_{li}} B_{li}$	
<i>B_{li}</i>	Kosten für die Lizenz li
<i>B_{LI}</i>	Summe aller Lizenzkosten
<i>li</i>	Index der Lizenzkosten (z. B. e-Kanban oder Planungssoftware)
<i>u_{li}</i>	Anzahl unterschiedlicher Lizenzen
Beschreibung	
Die <i>Lizenzkosten</i> entsprechen der Summe der Kosten für die Nutzungsrechte unterschiedlicher Softwareprodukte pro Jahr.	
Zweck	
Die Lizenzkosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Beschaffungsdaten / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
Lizenzkosten je Software	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-13 Anteil Lizenzkosten	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-B-6	Bestandskosten
Definition	
$B_{BS} = \frac{\emptyset \text{ Bestandsmenge} \times \emptyset \text{ Wert pro Bestandseinheit}}{2} \times i$	
B_{BS}	Summe aller Bestandskosten
i	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr
Beschreibung	
Die <i>Bestandskosten</i> entsprechen den kalkulatorischen Zinsen für das durch die Bestände gebundene Kapital pro Jahr.	
Zweck	
Die Bestandskosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Controllingdaten / Bestandsauswertungen / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
Bestandsmenge / Wert pro Bestandseinheit/ kalkulatorischer Zinssatz	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-14 Anteil Bestandskosten	

W-B-7	Flächenkosten
Definition	
$B_{FL} = \sum_{fl=1}^{u_{fl}} F_{fl} \times k_{fl}$	
B_{FL}	Summe aller Flächenkosten
F_{fl}	Größe der Flächenart fl
fl	Index der Flächenart (z. B. Bereitstellfläche (Quelle) oder Verkehrsfläche)
k_{fl}	Kostensatz je Flächenart fl
u_{fl}	Anzahl unterschiedlicher Flächenarten
Beschreibung	
Die <i>Flächenkosten</i> entsprechen der Summe aus der mit dem Flächenkostensatz multiplizierten Fläche je Flächenart. Der Flächenkostensatz gibt den Wert je Flächenart und -einheit an, der pro Jahr veranschlagt wird.	
Zweck	
Die Flächenkosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Layout / Flächenauswertungen / Controllingdaten / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
Flächenart / Größe der Fläche / Flächenkostensatz	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-15 Anteil Flächenkosten	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-B-8	Energiekosten
Definition	
$B_{EN} = \sum_{et=1}^{u_{et}} V_{et} \times k_{et}$	
<i>B_{EN}</i>	Summe aller Energiekosten
<i>et</i>	Index des Energieträgers (z. B. Strom oder Erdgas)
<i>k_{et}</i>	Kostensatz je Energieträger et
<i>u_{et}</i>	Anzahl unterschiedlicher Energieträger
<i>V_{et}</i>	Verbrauch des Energieträgers et pro Jahr
Beschreibung	
Die <i>Energiekosten</i> entsprechen der Summe aus dem mit dem Energiekostensatz multiplizierten Verbrauch pro Jahr je Energieträger. Der Energiekostensatz gibt den Preis je Energieträger und -einheit an.	
Zweck	
Die Energiekosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Controllingdaten / Daten aus Rechnungswesen / Energiepreise nach Marktlage	
Beeinflussung durch	
Energieverbrauch / Energiekostensatz	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-16 Anteil Flächenkosten	

W-B-9	Personalkosten
Definition	
$B_{PE} = \sum_{m=1}^{u_m} n_m \times k_m$	
<i>B_{PE}</i>	Summe aller Personalkosten
<i>k_m</i>	Kostensatz je Mitarbeitergruppe m
<i>m</i>	Index der Mitarbeitergruppe (z. B. Routenzugfahrer oder Logistiker)
<i>n_m</i>	Anzahl parallel erforderlicher Mitarbeiter je Mitarbeitergruppe m
<i>u_m</i>	Anzahl unterschiedlicher Mitarbeitergruppen
Beschreibung	
Die <i>Personalkosten</i> entsprechen der Summe aus dem mit dem Personalkostensatz multiplizierten Mitarbeiterbedarf je Mitarbeitergruppe. Der Personalkostensatz gibt die jährlichen Kosten je Mitarbeiter an. Der Mitarbeiterbedarf entspricht der Anzahl der parallel erforderlichen Mitarbeiter.	
Zweck	
Die Personalkosten gehen in die Betriebskosten pro Jahr ein.	
Daten	
Übersicht Mitarbeiter / Controllingdaten / Daten aus Rechnungswesen	
Beeinflussung durch	
L-R-6: Anzahl Mitarbeiter / Personalkostensatz	
Beeinflusst	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-17 Anteil Personalkosten	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-B-10	Anteil Kapitalkosten
Definition	
$B_{KA,\%} = \frac{B_{KA}}{B_{GES}} \times 100\%$	
B_{GES}	Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems
B_{KA}	Summe aller Kapitalkosten
$B_{KA,\%}$	prozentualer Anteil der Kapitalkosten an allen Betriebskosten
Beschreibung	
Der Anteil Kapitalkosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Kapitalkosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-2	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-2: Kapitalkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	
W-B-11	Anteil Abschreibungen
Definition	
$B_{AB,\%} = \frac{B_{AB}}{B_{GES}} \times 100\%$	
B_{AB}	Summe aller Abschreibungen
$B_{AB,\%}$	prozentualer Anteil der Abschreibungen an allen Betriebskosten
B_{GES}	Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems
Beschreibung	
Der Anteil Abschreibungen entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Abschreibungen an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-3	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-3: Abschreibungen	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten
Definition	
$B_{WR,\%} = \frac{B_{WR}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
<i>B_{WR}</i>	<i>Summe aller Wartungs- und Reparaturkosten</i>
<i>B_{WR,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Wartungs- und Reparaturkosten an allen Betriebskosten</i>
Beschreibung	
Der Anteil Wartungs- und Reparaturkosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Wartungs- und Reparaturkosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-4	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-4: Wartungs- und Reparaturkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

W-B-13	Anteil Lizenzkosten
Definition	
$B_{LI,\%} = \frac{B_{LI}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
<i>B_{LI}</i>	<i>Summe aller Lizenzkosten</i>
<i>B_{LI,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Lizenzkosten an allen Betriebskosten</i>
Beschreibung	
Der Anteil Lizenzkosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Lizenzkosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-5	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-5: Lizenzkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

A.3 Definitionsblätter Wirtschaftlichkeitskennzahlen

W-B-14	Anteil Bestandskosten
Definition	
$B_{BS,\%} = \frac{B_{BS}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{BS}</i>	<i>Summe aller Bestandskosten</i>
<i>B_{BS,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Bestandskosten an allen Betriebskosten</i>
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
Beschreibung	
Der Anteil <i>Bestandskosten</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Bestandskosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-6	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-6: Bestandskosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	
W-B-15	Anteil Flächenkosten
Definition	
$B_{FL,\%} = \frac{B_{FL}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{FL}</i>	<i>Summe aller Flächenkosten</i>
<i>B_{FL,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Flächenkosten an allen Betriebskosten</i>
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
Beschreibung	
Der Anteil <i>Flächenkosten</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Flächenkosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-7	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-7: Flächenkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-B-16	Anteil Energiekosten
Definition	
$B_{EN,\%} = \frac{B_{EN}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{EN}</i>	<i>Summe aller Energiekosten</i>
<i>B_{EN,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Energiekosten an allen Betriebskosten</i>
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
Beschreibung	
Der Anteil <i>Energiekosten</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Energiekosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-8	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-8: Energiekosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	
W-B-17	Anteil Personalkosten
Definition	
$B_{PE,\%} = \frac{B_{PE}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
<i>B_{PE}</i>	<i>Summe aller Personalkosten</i>
<i>B_{PE,%}</i>	<i>prozentualer Anteil der Personalkosten an allen Betriebskosten</i>
Beschreibung	
Der Anteil <i>Personalkosten</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller Personalkosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen Betriebskosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern in einem Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Verursachung von Betriebskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-9	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-9: Personalkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

W-B-18	Fixe Kosten
Definition	
$B_{fix} = B_{KA} + B_{AB} + B_{WR} + B_{LI} + B_{BS} + B_{FL}$	
B_{AB}	Summe aller Abschreibungen
B_{BS}	Summe aller Bestandskosten
B_{fix}	Summe aller fixen Kosten
B_{FL}	Summe aller Flächenkosten
B_{KA}	Summe aller Kapitalkosten
B_{LI}	Summe aller Lizenzkosten
B_{WR}	Summe aller Wartungs- und Reparaturkosten
Beschreibung	
Die <i>fixen Kosten</i> entsprechen der Summe aller Kapitalkosten, Abschreibungen, Wartungs- und Reparaturkosten, Lizenzkosten, Bestandskosten und Flächenkosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die fixen Kosten sind der Teil der Betriebskosten, der nutzungsunabhängig entsteht, d. h. diese Kosten entstehen beispielsweise auch dann, wenn das Routenzugsystem nicht betrieben wird. Es handelt sich somit um diejenigen Kosten, die durch die Herstellung der Betriebsbereitschaft verursacht werden. Sie werden im Rahmen der Deckungsbeitragsrechnung verwendet.	
Daten	
Siehe W-B-2 bis W-B-7	
Beeinflussung durch	
W-B-2 bis W-B-7: Kapitalkosten / Abschreibungen / Wartungs- und Reparaturkosten / Lizenzkosten / Bestandskosten / Flächenkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung der Bereitschaftskosten / Zusammensetzung der Betriebskosten / Deckungsbeitragsrechnung	

W-B-19	Variable Kosten
Definition	
$B_{var} = B_{EN} + B_{PE}$	
B_{EN}	Summe aller Energiekosten
B_{PE}	Summe aller Personalkosten
B_{var}	Summe aller variablen Kosten
Beschreibung	
Die <i>variablen Kosten</i> entsprechen der Summe aller Energiekosten und Personalkosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die variablen Kosten sind der Teil der Betriebskosten, der nutzungsabhängig entsteht, d. h. diese Kosten entstehen nur dann, wenn das Routenzugsystem betrieben wird. Sie werden im Rahmen der Deckungsbeitragsrechnung verwendet.	
Daten	
Siehe W-B-8 und W-B-9	
Beeinflussung durch	
W-B-8: Energiekosten / W-B-9: Personalkosten	
Beeinflusst	
Identifizierung der nutzungsabhängigen Kosten / Zusammensetzung der Betriebskosten / Deckungsbeitragsrechnung	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

W-B-20	Anteil fixe Kosten
Definition	
$B_{fix,\%} = \frac{B_{fix}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{fix}</i>	Summe aller fixen Kosten
<i>B_{fix,%}</i>	prozentualer Anteil der fixen Kosten an allen Betriebskosten
<i>B_{GES}</i>	Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems
Beschreibung	
Der Anteil fixe Kosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller fixen Kosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen fixen Kosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern im betrachteten Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Höhe der Bereitschaftskosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-18	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-18: Fixe Kosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

W-B-21	Anteil variable Kosten
Definition	
$B_{var,\%} = \frac{B_{var}}{B_{GES}} \times 100 \%$	
<i>B_{GES}</i>	Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems
<i>B_{var}</i>	Summe aller variablen Kosten
<i>B_{var,%}</i>	prozentualer Anteil der variablen Kosten an allen Betriebskosten
Beschreibung	
Der Anteil variable Kosten entspricht dem prozentualen Anteil der Summe aller variablen Kosten an der Summe aller Betriebskosten des betrachteten Routenzugsystems.	
Zweck	
Die anteiligen variablen Kosten erleichtern z. B. die Identifizierung von Kostentreibern im betrachteten Routenzugsystem oder den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen hinsichtlich der Höhe der nutzungsabhängigen Kosten.	
Daten	
Siehe W-B-1 und W-B-19	
Beeinflussung durch	
W-B-1: Betriebskosten / W-B-19: Variable Kosten	
Beeinflusst	
Identifizierung von Kostentreibern / Zusammensetzung der Betriebskosten	

W-B-22	Kosten pro Transporteinheit
Definition	
$B_{TE} = \frac{B_{GES}}{\sum_{H=1}^{n_H} \sum_{A=1}^{n_A} \lambda_{A,H}}$	
<i>A</i>	<i>Index der Artikel (z. B. Artikel 1 oder Artikel 2)</i>
<i>B_{GES}</i>	<i>Summe aller Betriebskosten des Routenzugsystems</i>
<i>B_{TE}</i>	<i>Kosten pro Transporteinheit</i>
<i>H</i>	<i>Index des Haltepunkts (z. B. Haltepunkt 1 oder Haltepunkt 2)</i>
<i>n_A</i>	<i>Anzahl Artikel</i>
<i>n_H</i>	<i>Anzahl Haltepunkte</i>
<i>λ_{A,H}</i>	<i>Ladungsträgerdurchsatz des Artikels A am Haltepunkt H</i>
Beschreibung	
Die <i>Kosten pro Transporteinheit</i> geben die durchschnittlichen Kosten an, die für den Transport einer Transporteinheit von der Quelle zur Senke im betrachteten Routenzugsystem entstehen.	
Zweck	
Die Kosten pro Transporteinheit ermöglichen z. B. den Vergleich mit anderen Routenzugsystemen oder Transportsystemen hinsichtlich der Kosten bezogen auf eine Transporteinheit.	
Daten	
Siehe L-M-1 und W-B-1	
Beeinflussung durch	
L-M-1 Durchsatz / W-B-1: Betriebskosten	
Beeinflusst	
Systemvergleich	
Bemerkung	
Die Anzahl der Transporteinheiten entspricht dem Durchsatz je Artikel und Haltepunkt ohne Berücksichtigung der jeweiligen NLT-Äquivalente der Ladungsträgertypen.	

A.4 Definitionsblätter Qualitätskennzahlen

Q-L-1	Liefertermintreue
Definition	
$LTT = \frac{\text{Anzahl termintreuer Transportaufträge}}{n_{TA}} \times 100 \%$	
<i>LTT</i>	<i>Liefertermintreue</i>
<i>n_{TA}</i>	<i>Anzahl Transportaufträge</i>
<i>TA</i>	<i>Index der Transportaufträge (z. B. Transportauftrag 1 oder Transportauftrag 2)</i>
Beschreibung	
Die <i>Liefertermintreue</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe der termingerecht bereitgestellten Transportaufträge an der Summe aller Transportaufträge des Routenzugsystems in einem bestimmten Zeitraum.	
Als termingerecht können dabei diejenigen Transportaufträge bezeichnet werden, die innerhalb zulässiger Toleranzgrenzen des geplanten Zeitpunkts bereitgestellt werden (z. B. +x Zeiteinheiten und -x Zeiteinheiten).	
Zweck	
Die <i>Liefertermintreue</i> dient als Indikator für Planabweichungen in einem Routenzugsystem. Diese können beispielsweise durch Abweichungen von Ist- zu Soll-Prozesszeiten, stark schwankende Transportbedarfe je Tour oder zu gering dimensionierte Puffer verursacht werden.	
Daten	
Produktionsprogramm / Buchungen von Transportaufträgen / Stillstandszeiten	
Beeinflussung durch	
Anzahl termintreuer Transportaufträge / Anzahl aller Transportaufträge	
Beeinflusst	
Identifizierung von Planabweichungen	

Q-L-2	Lieferterminabweichung
Definition	
$LTA = \frac{\sum_{TA=1}^{n_{TA}} \text{Terminabweichung}_{TA} }{n_{TA}}$	
<i>LTA</i>	<i>Lieferterminabweichung</i>
<i>n_{TA}</i>	<i>Anzahl Transportaufträge</i>
<i>TA</i>	<i>Index der Transportaufträge (z. B. Transportauftrag 1 oder Transportauftrag 2)</i>
Beschreibung	
Die <i>Lieferterminabweichung</i> entspricht der Summe der Terminabweichungen aller Transportaufträge dividiert durch die Anzahl aller Transportaufträge in einem bestimmten Zeitraum.	
Zweck	
Die <i>Lieferterminabweichung</i> dient der Beurteilung des Umfangs von Planabweichungen in einem Routenzugsystem. Je größer die <i>Lieferterminabweichung</i> ist, desto größer ist beispielsweise das Risiko von Maschinenstillständen aufgrund fehlender Materialien.	
Daten	
Produktionsprogramm / Buchungen von Transportaufträgen	
Beeinflussung durch	
Terminabweichung je Transportauftrag / Anzahl aller Transportaufträge	
Beeinflusst	
Beurteilung von Planabweichungen	
Bemerkung	
Die Anzahl der Transportaufträge entspricht der Anzahl der Transporteinheiten, wenn für jede Transporteinheit ein Transportauftrag erstellt wird.	

Q-L-3	Liefermengentreue
Definition	
$LMT = \frac{\text{Anzahl mengentreuer Transportaufträge}}{n_{TA}} \times 100 \%$	
<i>LMT</i>	<i>Liefermengentreue</i>
<i>n_{TA}</i>	<i>Anzahl Transportaufträge</i>
<i>TA</i>	<i>Index der Transportaufträge (z. B. Transportauftrag 1 oder Transportauftrag 2)</i>
Beschreibung	
<p>Die <i>Liefermengentreue</i> entspricht dem prozentualen Anteil der Summe der mengengerecht bereitgestellten Transportaufträge an der Summe aller Transportaufträge des Routenzugsystems in einem bestimmten Zeitraum.</p> <p>Als mengengerecht können dabei diejenigen Transportaufträge bezeichnet werden, die innerhalb zulässiger Toleranzgrenzen der geplanten Menge bereitgestellt werden (z. B. +x Mengeneinheiten und -x Mengeneinheiten).</p>	
Zweck	
Die Liefermengentreue dient als Indikator für Planabweichungen in einem Routenzugsystem. Diese können beispielsweise durch Abweichungen von Ist- zu Soll-Behälterfüllmengen verursacht werden.	
Daten	
Produktionsprogramm / Buchungen von Transportaufträgen / Behälterfüllmengen	
Beeinflussung durch	
Anzahl mengentreuer Transportaufträge / Anzahl aller Transportaufträge	
Beeinflusst	
Identifizierung von Planabweichungen	

Q-L-4	Liefermengenabweichung
Definition	
$LMA = \frac{\sum_{TA=1}^{n_{TA}} \text{Mengenabweichung}_{TA} }{n_{TA}}$	
<i>LMA</i>	<i>Liefermengenabweichung</i>
<i>n_{TA}</i>	<i>Anzahl Transportaufträge</i>
<i>TA</i>	<i>Index der Transportaufträge (z. B. Transportauftrag 1 oder Transportauftrag 2)</i>
Beschreibung	
Die <i>Liefermengenabweichung</i> entspricht der Summe der Mengenabweichungen aller Transportaufträge dividiert durch die Anzahl aller Transportaufträge in einem bestimmten Zeitraum.	
Zweck	
Die Liefermengenabweichung dient der Beurteilung des Umfangs von Planabweichungen in einem Routenzugsystem. Je größer die Liefermengenabweichung ist, desto größer ist beispielsweise das Risiko von Maschinenstillständen aufgrund fehlender Materialien.	
Daten	
Produktionsprogramm / Buchungen von Transportaufträgen	
Beeinflussung durch	
Terminabweichung je Transportauftrag / Anzahl aller Transportaufträge / Behälterfüllmengen	
Beeinflusst	
Beurteilung von Planabweichungen	
Bemerkung	
Die Anzahl der Transportaufträge entspricht der Anzahl der Transporteinheiten, wenn für jede Transporteinheit ein Transportauftrag erstellt wird.	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

Q-S-1	Unfallhäufigkeit
Definition	
$UH = \frac{\text{Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit}}{\text{Zahl der geleisteten Arbeitsstunden}}$	
<i>UH</i> <i>Unfallhäufigkeit</i>	
Beschreibung	
Die <i>Unfallhäufigkeit</i> berechnet sich als Anzahl der Unfälle mit Ausfallzeiten ab einem Tag Abwesenheit dividiert durch die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden aller Mitarbeiter in einem bestimmten Zeitraum.	
Zweck	
Die Unfallhäufigkeit dient der Beurteilung der Sicherheit des Routenzugsystems mit Blick auf die Anzahl der Unfälle und ermöglicht die Identifizierung von Sicherheitsmängeln.	
Daten	
Unfallstatistik / Schicht- und Arbeitszeitdaten	
Beeinflussung durch	
Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit / Arbeitsstunden pro Mitarbeiter	
Beeinflusst	
Identifizierung von Sicherheitsmängeln	
Bemerkung	
In der Regel wird die Unfallhäufigkeit je 1 Million geleistete Arbeitsstunden ermittelt. Die Unfallhäufigkeit kann auch für Routenzüge oder andere technische Systemelemente erfasst werden. In diesem Fall sind die Anzahl der Unfälle und Betriebsstunden der Routenzüge bzw. der technischen Systemelemente einzusetzen.	

Q-S-2	Unfallschwere
Definition	
$US = \frac{\text{Anzahl der Ausfalltage}}{\text{Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit}}$	
<i>US</i> <i>Unfallschwere</i>	
Beschreibung	
Die <i>Unfallschwere</i> entspricht der Anzahl der Ausfalltage (ohne Unfalltag) bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Ausfallzeiten ab einem Tag in einem bestimmten Zeitraum.	
Zweck	
Die Unfallschwere dient der Beurteilung der Sicherheit des Routenzugsystems mit Blick auf die Auswirkungen von Unfällen und ermöglicht die Identifizierung von Sicherheitsmängeln.	
Daten	
Unfallstatistik	
Beeinflussung durch	
Anzahl der Ausfalltage (ohne Unfalltag) / Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit	
Beeinflusst	
Identifizierung von Sicherheitsmängeln	
Bemerkung	
Die Unfallschwere kann auch für Routenzüge oder andere technische Systemelemente erfasst werden. In diesem Fall sind die Anzahl der Ausfalltage und die Anzahl der Unfälle der Routenzüge bzw. der technischen Systemelemente einzusetzen.	

Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool
Definition	
$PW_{MLT} = PW_U + PW_H + PW_T + PW_{ZS,k} + PW_{ZS,l}$	
PW_H	<i>Punktwert Halten</i>
PW_{MLT}	<i>Punktwert Multiple-Lasten-Tool</i>
PW_T	<i>Punktwert Tragen</i>
PW_U	<i>Punktwert Umsetzen</i>
$PW_{ZS,k}$	<i>Punktwert Ziehen/Schieben (kurz)</i>
$PW_{ZS,l}$	<i>Punktwert Ziehen/Schieben (lang)</i>
Beschreibung	
Der <i>Punktwert Multiple-Lasten-Tool</i> entspricht der Summe der Punktwerte der Handhabungsarten Umsetzen/Halten/Tragen, Ziehen/Schieben (kurz) und Ziehen/Schieben (lang).	
Zweck	
Der Punktwert des Multiple-Lasten-Tools dient der Belastungsbewertung von Tätigkeiten im Routenzugsystem und ermöglicht damit die Identifizierung von Optimierungspotentialen hinsichtlich der ergonomischen Gestaltung von Tätigkeiten zwecks Reduzierung der körperlichen Belastung der Mitarbeiter.	
Daten	
Durchsatanforderungen / Prozessbeschreibungen und -beobachtungen / Zeitaufnahmen und -analysen	
Beeinflussung durch	
Art der Tätigkeit / Lastgewichte / Anzahl Vorgänge je Schicht / Körperhaltung / Ausführungsbedingungen / Positioniergenauigkeit / Bewegungsgeschwindigkeit	
Beeinflusst	
Belastungsbewertung / Identifizierung von Optimierungspotentialen / Systemvergleich	

Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug
Definition	
$F_{T,RZ} = 100 \% - \eta_{T,RZ}$	
$F_{T,RZ}$	<i>zeitliche Flexibilität des Routenzugs</i>
$\eta_{T,RZ}$	<i>zeitlicher Nutzungsgrad des Routenzugs</i>
Beschreibung	
Die <i>zeitliche Flexibilität des Routenzugs</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Zeit je Routenzug, der nicht für Routenzugtätigkeiten genutzt wird. Sie berechnet sich als Differenz aus 100 % und dem zeitlichen Nutzungsgrad des Routenzugs.	
Zweck	
Die zeitliche Flexibilität gibt Aufschluss darüber, in welchem Umfang zeitliche Reserven zur Verfügung stehen, um beispielsweise Zykluszeitschwankungen aufgrund von schwankenden Transportbedarfen je Tour abfangen zu können, ohne dass es zu Verspätungen nachfolgender Touren kommt. Je niedriger der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto höher ist die Flexibilität bezogen auf den Routenzugeinsatz und desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten.	
Daten	
Siehe L-Z-16	
Beeinflussung durch	
L-Z-16: Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	
Beeinflusst	
Q-F-4: Gesamtflexibilität Routenzug / Systemvergleich	

Anhang A: Definitionsblätter Kennzahlen

Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter
Definition	
$F_{T,M} = 100 \% - \eta_{T,M}$	
$F_{T,M}$	zeitliche Flexibilität des Mitarbeiters
$\eta_{T,M}$	zeitlicher Nutzungsgrad des Mitarbeiters
Beschreibung	
Die <i>zeitliche Flexibilität des Mitarbeiters</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Zeit je Mitarbeiter, der nicht für Routenzugtätigkeiten genutzt wird. Sie berechnet sich als Differenz aus 100 % und dem zeitlichen Nutzungsgrad des Mitarbeiters.	
Zweck	
Die zeitliche Flexibilität gibt Aufschluss darüber, in welchem Umfang zeitliche Reserven zur Verfügung stehen, um beispielsweise Zykluszeitschwankungen aufgrund von schwankenden Transportbedarfen je Tour abfangen zu können, ohne dass es zu Verspätungen nachfolgender Touren kommt. Je niedriger der zeitliche Nutzungsgrad ist, desto höher ist die Flexibilität bezogen auf den Mitarbeiterereinsatz und desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten.	
Daten	
Siehe L-Z-17	
Beeinflussung durch	
L-Z-17: Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	
Beeinflusst	
Systemvergleich	

Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug
Definition	
$F_{K,RZ} = 100 \% - \eta_{K,RZ}$	
$F_{K,RZ}$	kapazitive Flexibilität des Routenzugs
$\eta_{K,RZ}$	kapazitiver Nutzungsgrad des Routenzugs
Beschreibung	
Die <i>kapazitive Flexibilität des Routenzugs</i> ist der Prozentsatz der zur Verfügung stehenden Transportkapazität des Routenzugs, der im Durchschnitt ungenutzt ist. Sie berechnet sich als Differenz aus 100 % und dem kapazitiven Nutzungsgrad des Routenzugs.	
Zweck	
Die kapazitive Flexibilität des Routenzugs gibt Aufschluss darüber, in welchem Umfang kapazitive Reserven zur Verfügung stehen, um beispielsweise schwankende Transportbedarfe je Tour abfangen zu können, ohne dass es zu Verspätungen nachfolgender Touren kommt. Je niedriger der kapazitive Nutzungsgrad ist, desto höher ist die Flexibilität bezogen auf den Routenzugeinsatz und desto robuster ist das System gegenüber Abweichungen von Plandaten.	
Daten	
Siehe L-R-11	
Beeinflussung durch	
L-R-11: Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	
Beeinflusst	
Q-F-4: Gesamtflexibilität Routenzug / Systemvergleich	

Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug
<p>Definition</p> $F_{Ges,RZ} = \frac{F_{T,RZ} + F_{K,RZ}}{2}$ <p> <i>F_{Ges,RZ}</i> Gesamtflexibilität des Routenzugs <i>F_{K,RZ}</i> kapazitive Flexibilität des Routenzugs <i>F_{T,RZ}</i> zeitliche Flexibilität des Routenzugs </p>	
<p>Beschreibung</p> <p>Der <i>Gesamtflexibilität</i> berechnet sich als Mittelwert der zeitlichen und kapazitiven Flexibilität des Routenzugs.</p>	
<p>Zweck</p> <p>Die Gesamtflexibilität ermöglicht den Vergleich von Routenzugsystemen mit unterschiedlicher zeitlicher und kapazitiver Flexibilität.</p>	
<p>Daten</p> <p>Siehe Q-F-1 und Q-F-3</p>	
<p>Beeinflussung durch</p> <p>Q-F-1: Zeitliche Flexibilität Routenzug / Q-F-3: Kapazitive Flexibilität Routenzug</p>	
<p>Beeinflusst</p> <p>Systemvergleich</p>	

Anhang B: Dokumentation Excel-Tool

Hinweis: Die Nutzung des im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Excel-Tools zur Bewertung und Analyse von Routenzugsystemen ist nur zum Zweck der Betreuung und Beurteilung des Dissertationsvorhabens durch die beteiligten Personen (z. B. Gutachter oder Prüfer) gestattet. Eine kommerzielle Nutzung ist ohne Zustimmung des Entwicklers nicht erlaubt.

B.1 Systemanforderungen

An die Hardware des Computersystems werden keine erhöhten Anforderungen gestellt. Sie sollte dem heutigen Stand der Technik entsprechen, um möglichst kurze Laufzeiten der implementierten VBA-Makros realisieren zu können. Für das Aufrufen der Dateien „Routenzug-Tool Vorlage“ und „2_Routenzug-Tool Beispiel“ im Datenanhang ist die Software MS Excel in einer beliebigen Version erforderlich. Es empfiehlt sich Excel-Versionen ab 2007 zu verwenden, da diese mehrerer Prozessoren für Berechnungen und Datenbearbeitungsvorgänge einsetzen [MICROSOFT 2011]. Die Berechnung und Darstellung von Kennzahlenwerten ist grundsätzlich ohne die Aktivierung von Makros möglich. Die Verwendung von Makros, z. B. für das Aufrufen gespeicherter Beispiele oder die Durchführung einer Wirkungsanalyse, erfordert die vorherige Makroaktivierung in den Excel-Einstellungen (Datei → Optionen → Trust Center → Einstellungen für das Trust Center... → Makroeinstellungen).

Folgende Systemkonfiguration ist im Rahmen der Entwicklung des Excel-Tools verwendet worden und stellt die Basis für die gemessenen Makro-Laufzeiten in Abschnitt 7.7 dar:

- CPU: Intel Core 2 Duo E8400 mit 3.0 GHz Taktfrequenz
- Arbeitsspeicher (RAM): 4 GB
- Betriebssystem: Windows 10 Education (64 Bit)
- Software: Microsoft Excel 2013 (32 Bit)

B.2 Bedienungsanleitung

1. Schritt: Routenzugsystem definieren

Alternative 1: Eingangsdaten manuell eingeben

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Eingabe	Stellen Sie sicher, dass die Eingabefelder im Zellbereich E3:E220 zurückgesetzt sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabefelder zurücksetzen“ im Zellbereich B2:C2.	
2	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabefelder zurückzusetzen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabefelder zurückzusetzen (z. B. um vorhandene Eingabedaten zu speichern (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 4)).	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Eingabedaten im Zellbereich E3:E220 unwiderruflich gelöscht.
3	R_X Eingabe	Geben Sie die Eingangsdaten in den Zellbereich E5:E220 anhand der Eingabe- bzw. Auswahlfelder ein. Stellen Sie dabei sicher, dass Sie die Daten abschnittsweise von oben nach unten eingeben und Inkonsistenzen vermeiden.	vgl. Abschnitt 6.6.2.1
4	Beispiele	Prüfen Sie, ob ein Speicherplatz frei ist (falls nicht, weiter mit Zusatz „Gespeichertes Beispiel löschen“ (am Ende der Bedienungsanleitung) und anschließend weiter mit Arbeitsschritt 5)	
5	R_X Eingabe	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabedaten als Beispiel Nr. ... speichern“ im Zellbereich B1:C1.	
6	R_X Eingabe	Geben Sie die Nummer, unter der die Eingabedaten als Beispiel gespeichert werden sollen, in das Dialogfeld ein. Ganzzahligen Wert zwischen „1“ und „40“ eintragen.	vgl. Abschnitt 6.6.2.7
7	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabedaten zu speichern.	
8	R_X Eingabe	Geben Sie den Namen, unter dem die Eingabedaten als Beispiel gespeichert werden sollen, in das Dialogfeld ein.	
9	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabedaten zu speichern.	
10	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabedaten als Beispiel zu speichern. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabedaten als Beispiel zu speichern.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Daten des Beispiels im Zellbereich E3:AR220 des Tabellenblatts „Beispiele“ unwiderruflich überschrieben.

Alternative 2: Eingabedaten eines gespeicherten Beispiels einsetzen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Eingabe	Stellen Sie sicher, dass die Eingabefelder im Zellbereich E3:E220 zurückgesetzt sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabefelder zurücksetzen“ im Zellbereich B2:C2.	
2	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabefelder zurückzusetzen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabefelder zurückzusetzen (z. B. um vorhandene Eingabedaten zu speichern (in diesem Fall weiter mit „Alternative 1: Eingangsdaten manuell eingeben“ → Arbeitsschritt 4)).	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Eingabedaten im Zellbereich E3:E220 unwiderruflich gelöscht.
3	R_X Eingabe	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Gespeichertes Beispiel Nr. ... einsetzen“ im Zellbereich B1:C1.	
4	R_X Eingabe	Geben Sie die Nummer des einzusetzenden Beispiels in das Dialogfeld ein. Ganzzahligen Wert zwischen „1“ und „40“ eintragen.	vgl. Abschnitt 6.6.2.7
5	R_X Eingabe	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabedaten des Beispiels einzusetzen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne das Beispiel einzusetzen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Eingabedaten im Zellbereich E3:E220 unwiderruflich überschrieben.

2. Schritt: Kennzahlenberechnungen überprüfen

Alternative 1: Routenzugsystem ohne Poolung

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die Arbeitsschritte 1 und 2 für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Berechnung	Optional: Überprüfen Sie bei Bedarf die Kennzahlenberechnungen der Route.	vgl. Abschnitt 6.6.2.2
2	R_X Kennzahlen	Überprüfen Sie die Kennzahlenwerte hinsichtlich ihrer Konsistenz (im Fall inkonsistenter Kennzahlwerte abbuchen und zurück zu „1. Schritt: Routenzugsystem definieren“).	vgl. Abschnitt 6.6.2.3
Hinweis: Führen Sie die Arbeitsschritte 3 und 4 einmalig für das zu betrachtende Routenzugsystem durch.			
3	System-Kennzahlen ohne Poolung	Überprüfen Sie die Kennzahlenwerte hinsichtlich ihrer Konsistenz (im Fall inkonsistenter Kennzahlwerte abbuchen und zurück zu „1. Schritt: Routenzugsystem definieren“).	vgl. Abschnitt 6.6.2.4
4	R_X Eingabe	Optional: Aktivieren bzw. deaktivieren Sie diejenigen Routen, die in die Bewertung mit einbezogen bzw. von dieser ausgeschlossen werden sollen mittels des Auswahlfeldes in der Zelle E5.	vgl. Abschnitt 6.6.2.1

Alternative 2: Routenzugsystem mit Poolung

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die Arbeitsschritte 1 und 2 für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch. Stellen Sie sicher, dass lediglich Routen mit vergleichbarer Fahrzeugtechnik betrachtet werden (vgl. Abschnitt 6.4.2).			
1	R_X Berechnung	Optional: Überprüfen Sie bei Bedarf die Kennzahlenberechnungen der Route.	vgl. Abschnitt 6.6.2.2
2	R_X Kennzahlen	Überprüfen Sie die Kennzahlenwerte hinsichtlich ihrer Konsistenz (im Fall inkonsistenter Kennzahlwerte abbuchen und zurück zu „1. Schritt: Routenzugsystem definieren“).	vgl. Abschnitt 6.6.2.3
Hinweis: Führen Sie die Arbeitsschritte 3 und 4 einmalig für das zu betrachtende Routenzugsystem durch.			
3	Berechnung mit Poolung	Optional: Überprüfen Sie bei Bedarf die Kennzahlenberechnungen des Systems.	vgl. Abschnitt 6.6.2.5
4	System-Kennzahlen mit Poolung	Überprüfen Sie die Kennzahlenwerte hinsichtlich ihrer Konsistenz (im Fall inkonsistenter Kennzahlwerte Abbruch und zurück zu „1. Schritt: Routenzugsystem definieren“).	vgl. Abschnitt 6.6.2.6
5	R_X Eingabe	Optional: Aktivieren bzw. deaktivieren Sie diejenigen Routen, die in die Bewertung mit einbezogen bzw. von dieser ausgeschlossen werden sollen mittels des Auswahlfeldes in der Zelle E5.	vgl. Abschnitt 6.6.2.1

3. Schritt: Sensitivitätsanalyse durchführen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch. Beachten Sie, dass die nachträgliche Änderung von Eingabedaten im Tabellenblatt „R_X Eingabe“ stets die erneute Durchführung der Sensitivitätsanalyse und der darauffolgenden Schritte erfordert.			
1	R_X Eingabe	Optional: Aktivieren bzw. deaktivieren Sie diejenigen Routen, die in die Analyse mit einbezogen bzw. von dieser ausgeschlossen werden sollen mittels des Auswahlfeldes in der Zelle E5.	vgl. Abschnitt 6.6.2.1
2	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass alle Eingabefelder und Ergebnisse zurückgesetzt sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 4) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabefelder & Ergebnisse zurücksetzen“ im Zellbereich B2:C2.	
3	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabefelder und Ergebnisse zurückzusetzen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabefelder und Ergebnisse zurückzusetzen (z. B. um vorhandene Eingabedaten und Ergebnisse manuell in einer separaten Datei zu speichern).	Mit „OK“ werden alle vorhandenen Eingabedaten und Ergebnisse der Sensitivitäts-, Parameter- und Wirkungsanalyse unwiderruflich gelöscht.
4	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabedaten übertragen“ im Zellbereich B2:C2.	
5	R_X Analyse	Geben Sie den Buchstaben der vorliegenden Zuordnung (Routenzug:Route) an. A = 1:1 oder m:1 (ohne Fahrzeug-Poolung) B = 1:n oder m:n (mit Fahrzeug-Poolung)	vgl. Abschnitte 5.2.4 und 6.4.2
6	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Eingabedaten zu übertragen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Eingabedaten zu übertragen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Eingabedaten im Zellbereich E3:E446 unwiderruflich gelöscht.
7	R_X Analyse	Geben Sie in die Zelle H5 die Spannweite bezüglich der Eingabeparameterwerte ein. Wert zwischen „0“ und „100“ eintragen.	vgl. Abschnitt 7.2.2.3
8	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Sensitivitätsanalyse durchführen“ im Zellbereich B2:C2.	
9	R_X Analyse	Geben Sie den Buchstaben der vorliegenden Zuordnung (Routenzug:Route) an. A = 1:1 oder m:1 (ohne Fahrzeug-Poolung) B = 1:n oder m:n (mit Fahrzeug-Poolung) Es muss die gleiche Zuordnung wie in Arbeitsschritt 5 angegeben werden (ggf. „Abbrechen“ klicken und zurück zu Arbeitsschritt 2).	vgl. Abschnitte 5.2.4 und 6.4.2 Makro-Laufzeit gemäß Abschnitt 7.7 berücksichtigen.
10	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Sensitivitätsanalyse durchzuführen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Sensitivitätsanalyse durchzuführen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Kennzahlenwerte im Zellbereich G224:TC446 unwiderruflich überschrieben.

4. Schritt: Parameteranalyse durchführen (optional)

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen und Eingabeparameter-Kennzahl-Kombinationen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropdown-Liste im Zellbereich D568:E568 die zu betrachtende Kennzahl aus (analog für 2. bis 5. Eingabeparameter-Kennzahl-Kombination im darunterliegenden Zellbereich B576:Q618).	vgl. Abschnitte 7.4.1 und 7.5.1.2.
2	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropwown-Liste im Zellbereich D569:E569 die Basis aus, die den absoluten systembezogenen Kennzahlwerten zugrunde liegen soll (analog für 2. bis 5. Eingabeparameter-Kennzahl-Kombination im darunterliegenden Zellbereich B576:Q618).	vgl. Abschnitte 7.4.1 und 7.5.1.2.
3	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropdown-Liste im Zellbereich D570:E570 den zu betrachtenden Eingabeparameter aus (analog für 2. bis 5. Eingabeparameter-Kennzahl-Kombination im darunterliegenden Zellbereich B576:Q618).	vgl. Abschnitte 7.4.1 und 7.5.1.2.

5. Schritt: Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen und zu analysierenden Kennzahlen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass die Auswahlfelder im Zellbereich D627:E628 zurückgesetzt und die Wirkintensitäten in den Zellbereichen G627:Q673 und AO627:AY673 gelöscht sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkintensitäten Kennzahl löschen“ im Zellbereich B635:C635.	
2	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Auswahlfelder zurückzusetzen und die Wirkintensitäten zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Auswahlfelder zurückzusetzen und die Wirkintensitäten zu löschen (z. B. um die Kennzahl zur Kennzahlenaggregation hinzuzufügen (in diesem Fall weiter mit „7. Schritt: Routenbezogene Wirkungsanalyse Kennzahlenaggregation durchführen“ → Arbeitsschritte 5)).	Mit „OK“ werden die Auswahlfelder im Zellbereich D627:E628 zurückgesetzt und ggf. vorhandene Wirkintensitäten der Kennzahl in den Zellbereichen G627:Q673 und AO627:AY673 unwiderruflich gelöscht.
3	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropdown-Liste im Zellbereich D627:E627 die zu betrachtende Kennzahl aus.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.1 und 7.5.1.3.
4	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropdown-Liste im Zellbereich D628:E628 die Optimierungsrichtung der zu betrachtenden Kennzahl aus.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.1 und 7.5.1.3.
5	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen“ im Zellbereich B631:C631.	Makro-Laufzeit gemäß Abschnitt 7.7 berücksichtigen.
Hinweis: Fügen Sie die relevanten Kennzahlen direkt zur Kennzahlenaggregation hinzu (vgl. „7. Schritt: Routenbezogene Wirkungsanalyse Kennzahlenaggregation durchführen“ → Arbeitsschritte 5 bis 11).			

6. Schritt: Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte für alle Routen und zu analysierenden Eingabeparameter des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass das Auswahlfeld im Zellbereich D627:E627 zurückgesetzt ist und die Wirkintensitäten in den Zellbereichen G728:Q829 sowie AP728:AZ829 gelöscht sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkintensitäten Eingabeparameter löschen“ im Zellbereich B736:C736.	
2	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um das Auswahlfeld zurückzusetzen und die Wirkintensitäten zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne das Auswahlfeld zurückzusetzen und die Wirkintensitäten zu löschen (z. B. um die Kennzahlenwerte des Eingabeparameters auf Konsistenz zu prüfen).	Mit „OK“ wird das Auswahlfeld im Zellbereich D627:E627 zurückgesetzt und ggf. vorhandene Wirkintensitäten des Eingabeparameters in den Zellbereichen G728:Q829 sowie AP728:AZ829 werden unwiderruflich gelöscht.
3	R_X Analyse	Wählen Sie aus der Dropdown-Liste im Zellbereich D731:E731 den zu betrachtenden Eingabeparameter aus.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.2 und 7.5.1.3
4	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkungsanalyse Eingabeparameter durchführen“ im Zellbereich B734:C734.	Makro-Laufzeit gemäß Abschnitt 7.7 berücksichtigen.

7. Schritt: Routenbezogene Wirkungsanalyse Kennzahlenaggregation durchführen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte 1 bis 4 einmalig für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch.			
1	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass die Wirkintensitäten im Zellbereich G899:AC949 gelöscht sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen“ im Zellbereich B904:C904.	
2	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Wirkintensitäten zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Wirkintensitäten zu löschen (z. B. um vorhandene Wirkungsanalyseergebnisse manuell in einer separaten Datei zu speichern).	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Wirkintensitäten der Kennzahlenaggregation im Zellbereich G899:AC949 unwiderruflich gelöscht.
3	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass die Bewertungskriterien im Zellbereich AP898:CM949 gelöscht sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 5) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Alle Bewertungskriterien löschen“ im Zellbereich B908:C908.	
4	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Bewertungskriterien zu löschen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Wirkin-

		→ Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Bewertungskriterien zu löschen (z. B. um vorhandene Wirkungsanalyseergebnisse manuell in einer separaten Datei zu speichern).	tensitäten der Kennzahlenaggregation im Zellbereich AP898:CM949 unwiderruflich gelöscht.
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte 5 bis 11 für alle relevanten Kennzahlen einer Route durch, die zur Kennzahlenaggregation hinzugefügt werden sollen.			
5	R_X Analyse	Führen Sie den „5. Schritt: Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen“ aus.	vgl. „5. Schritt: Wirkungsanalyse Kennzahl durchführen“
6	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Kennzahl zur Aggregation hinzufügen“ im Zellbereich B633:C633.	
7	R_X Analyse	Geben Sie die Nummer des Bewertungskriteriums (Kennzahl) ein, unter der die Wirkungsanalysedaten der Kennzahl gespeichert werden sollen. Ganzzahligen Wert zwischen „0“ und „10“ eintragen.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.3 und 7.5.1.3
8	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Kennzahl zur Aggregation hinzuzufügen.	
9	R_X Analyse	Geben Sie die Gewichtung des Bewertungskriteriums (Kennzahl) ein. Wert zwischen „0“ und „100“ eintragen.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.3 und 7.5.1.3
10	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie zwei Mal auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Kennzahl zur Aggregation hinzuzufügen.	
11	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Kennzahl zur Aggregation hinzuzufügen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Kennzahl zur Aggregation hinzuzufügen (z. B. bei Eingabe der falschen Nummer des Bewertungskriteriums (Kennzahl)).	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Daten im Zellbereich AZ898:CM949 unwiderruflich überschrieben (Hinweis: Gilt nur für die ausgewählte Nummer des Bewertungskriteriums (Kennzahl)).
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte einmalig für alle Routen des zu betrachtenden Routenzugsystems durch, wenn Sie die Arbeitsschritte 5 bis 11 für alle relevanten Kennzahlen einer Route beendet haben.			
12	R_X Analyse	Stellen Sie sicher, dass die Summe der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien (Kennzahlen) gleich 100 % ist (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 13) bzw. passen Sie die Gewichtungsfaktoren in den Zellen BC899, BG899 usw. manuell an.	vgl. Abschnitte 7.4.2.1.2 und 7.5.1.3
13	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren“ im Zellbereich B902:C902.	

8. Schritt: Bewertungskriterium löschen (optional)

Hinweis: Ggf. ist es erforderlich, einzelne Bewertungskriterien zu löschen bzw. zu ersetzen. Um dabei nicht alle Wirkungsanalysen erneut durchführen zu müssen, führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte aus.		
14	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Bewertungskriterium Nr. ... löschen“ im Zellbereich B906:C906.
15	R_X Analyse	Geben Sie die Nummer des Bewertungskriteriums (Kennzahl) ein, das Sie löschen möchten. Ganzzahligen Wert zwischen „0“ und „10“ eintragen.
16	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie zwei Mal auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne das Bewertungskriterium zu löschen.
17	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um das Bewertungskriterium zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne das Bewertungskriterium zu löschen (z. B. bei Eingabe der falschen Nummer des Bewertungskriteriums (Kennzahl)).
18	R_X Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen“ im Zellbereich B904:C904.
19	R_X Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Wirkintensitäten zu löschen (in diesem Fall weiter mit „7. Schritt: Routenbezogene Wirkungsanalyse Kennzahlenaggregation durchführen“ → Arbeitsschritt 5). → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Wirkintensitäten zu löschen (z. B. um vorhandene Wirkungsanalyseergebnisse manuell in einer separaten Datei zu speichern).
		Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Wirkintensitäten der Kennzahlenaggregation im Zellbereich AP898:CM949 unwiderruflich gelöscht.
		Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Wirkintensitäten der Kennzahlenaggregation im Zellbereich G899:AC949 unwiderruflich gelöscht.

9. Schritt: Systembezogene Wirkungsanalyse Kennzahlenaggregation durchführen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Führen Sie die nachfolgenden Arbeitsschritte einmalig für das zu betrachtende Routenzugsystem durch.			
1	System-Analyse	Stellen Sie sicher, dass die Wirkintensitäten im Zellbereich G107:AC157 gelöscht sind (in diesem Fall weiter mit Arbeitsschritt 3) bzw. klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Wirkintensitäten Kennzahlenaggregation löschen“ im Zellbereich B9:C4.	
2	System-Analyse	→ Klicken Sie auf „OK“, um die Wirkintensitäten zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne die Wirkintensitäten zu löschen (z. B. um vorhandene Wirkungsanalyseergebnisse manuell in einer separaten Datei zu speichern).	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Wirkintensitäten der Kennzahlenaggregation im Zellbereich G107:AC157 unwiderruflich gelöscht.
3	System-Analyse	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Eingabeparameter nach Wirkintensität sortieren“ im Zellbereich B7:C7.	

Zusatz: Gespeichertes Beispiel löschen

Alternative 1: Einzelnes Beispiel löschen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Ggf. ist es erforderlich, eines der gespeicherten Beispiele zu löschen bzw. zu ersetzen (z. B. wenn die Eingabedaten nicht mehr aktuell sind). Führen Sie in diesem Fall die nachfolgenden Arbeitsschritte durch.			
1	Beispiele	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Beispiel Nr. ... löschen“ im Zellbereich B2:C2.	
2	Beispiele	Geben Sie die Nummer des zu löschenden Beispiels in das Dialogfeld ein. Ganzzahligen Wert zwischen „1“ und „40“ eintragen.	vgl. Abschnitt 6.6.2.7
3	Beispiele	→ Klicken Sie auf „OK“, um zum nächsten Dialogfeld zu gelangen. → Klicken Sie zwei Mal auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne ein Beispiel zu löschen.	
4	Beispiele	→ Klicken Sie auf „OK“, um das gespeicherte Beispiel zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne das Beispiel zu löschen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Daten des Beispiels im Zellbereich E3:AR220 unwiderruflich gelöscht.





Alternative 2: Alle Beispiele löschen

Nr.	Tabellenblatt	Arbeitsschritt	Hinweis
Hinweis: Ggf. ist es erforderlich, alle gespeicherten Beispiele zu löschen bzw. zu ersetzen (z. B. wenn das Excel-Tool vollständig zurückgesetzt werden soll). Führen Sie in diesem Fall die nachfolgenden Arbeitsschritte durch.			
1	Beispiele	Klicken Sie auf die Makro-Schaltfläche „Alle Beispiele löschen“ im Zellbereich B2:C2.	
2	Beispiele	→ Klicken Sie auf „OK“, um alle gespeicherten Beispiele zu löschen. → Klicken Sie auf „Abbrechen“, um das Makro zu beenden, ohne alle Beispiele zu löschen.	Mit „OK“ werden ggf. vorhandene Daten aller Beispiele im Zellbereich E3:AR220 unwiderruflich gelöscht.

B.3 Einstufungshilfe Multiple-Lasten-Tool

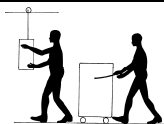
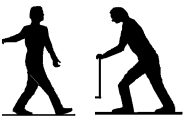
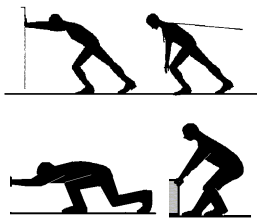

Die folgenden Tabellen sind der Einstufungshilfe des MLT entnommen [IAD 2010a, S. 8 ff.].

Körperhaltung Umsetzen/Halten/Tragen

<i>Charakteristische Körperhaltungen und Lastpositionen</i>	<i>Körperhaltung, Position der Last</i>	<i>Haltungswichtung</i>
	Oberkörper aufrecht, nicht verdreht Last am Körper	1
	geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers Last am Körper oder körpernah	2
	tiefes Beugen oder weites Vorneigen geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers Last körperfern oder über Schulterhöhe	4
	weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers Last körperfern eingeschränkte Haltungsstabilität beim Stehen Hocken oder Knien	8

Für die Bestimmung der Haltungswichtung ist die bei der Lastenhandhabung eingenommene charakteristische Körperhaltung einzusetzen; z. B. bei unterschiedlichen Körperhaltungen mit der Last sind mittlere Werte zu bilden – keine gelegentlichen Extremwerte verwenden!

Körperhaltung Ziehen/Schieben

<i>Charakteristische Körperhaltungen und Lastpositionen</i>	<i>Körperhaltung, Position der Last</i>	<i>Haltungswichtung</i>
	Rumpf aufrecht, keine Verdrehung	1
	Rumpf leicht vorgeneigt und/oder leicht verdreht (einseitiges Ziehen)	2
	stärkere Neigung des Körpers in Bewegungsrichtung Hocken, Knien, Bücken	4
	Kombination von Bücken und Verdrehen	8

Es ist die typische Körperhaltung zu berücksichtigen. Die beim Anfahren, Abbremsen und Rangieren möglicherweise deutlichere Rumpfneigung ist zu vernachlässigen, wenn sie nur gelegentlich auftritt.

Ausführungsbedingungen Umsetzen/Halten/Tragen

Ausführungsbedingungen	Ausf.-wichtung
<p>Gute ergonomische Bedingungen z. B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener rutschfester Boden, ausreichend beleuchtet</p> <p>Gute Greifbedingungen Teilegeometrie bewirkt neutrale Handgelenkstellung Entnahme Kleinteile (ohne größeres Verklemmen) aus dem Großbehälter Teil liegt frei auf „Rutsche“, auf Förderband oder in Roboterstation KLT steht „frei“ und kann mit beiden Händen gut gepackt werden</p>	0
<p>Leichte Behinderungen bei Greifbedingungen Teilgeometrie bewirkt 1/2 Abweichung der neutralen Handgelenkstellung Ungeeignete Handschuhe (zu dick, zu groß) Entnahme Kleinteile (Teile verklemmen) aus dem Großbehälter KLT´s stehen eng nebeneinander im Regal oder auf Dolly (Platz für Hände ausreichend)</p>	1
<p>Verschlechterte ergonomische Bedingungen z. B. Eingeschränkter Bewegungsfreiraum, kleinere Hindernisse im Arbeitsbereich wirken sich auf Standsicherheit aus</p> <p>Ungünstige Greifbedingungen Teilegeometrie bewirkt 2/3 Abweichung der neutralen Handgelenkstellung Entnahme Kleinteile aus Großbehälter (Teile müssen teilweise losgebrochen werden) KLT´s stehen so eng nebeneinander, dass kaum Freiraum für Hände besteht</p>	2-3
<p>wesentliche Verschlechterung der ergonomischen Bedingungen z. B. Standsicherheit eingeschränkt (Boden uneben, weich, rutschig, abschüssig), Rückwärts oder seitwärts mitlaufen bei Arbeitsausführung</p> <p>Schlechte Greifbedingungen Teilegeometrie führt zu stark abweichender Handgelenkstellung Teile verhaken ständig ineinander, müssen ständig losgebrochen werden KLT-Blockstapel, KLT kann nur mit Fingerspitzen gepackt werden (Kein Freiraum Hände)</p>	4-5
<p>Extrem schlechte ergonomischen Bedingungen Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit (Stolpergefahr durch Bodenbeschaffenheit), Instabilität des Lastenschwerpunktes, Arbeitsaufgabe am Rand Ausführbarkeit Mehrfaches Nach- und Umgreifen erforderlich</p> <p>Sehr schlechte Greifbedingungen Teilegeometrie führt zu maximal abweichender Handgelenkstellung Kein Griff, keine „richtige“ Anpackstelle</p>	6-8

Ausführungsbedingungen Ziehen/Schieben

<i>Ausführungsbedingungen</i>	<i>Ausf.-wichtig-</i> <i>tung</i>
Gut: → Fußboden oder andere Fläche eben, fest, glatt, trocken → ohne Neigung → keine Hindernisse im Bewegungsraum → Rollen oder Räder leichtgängig, kein erkennbarer Verschleiß der Radlager	0
Eingeschränkt: → Fußboden verschmutzt, etwas uneben, weich → geringe Neigung bis 2 ° → Hindernisse im Bewegungsraum, die umfahren werden müssen → Rollen oder Räder verschmutzt, nicht mehr ganz leichtgängig, Lager ausgeschlagen	2
Schwierig: → unbefestigter oder grob gepflasterter Fahrweg, Schlaglöcher, starke Verschmutzung, → Neigungen 2 bis 5 ° → Flurförderzeuge müssen beim Anfahren „losgerissen“ werden → Rollen oder Räder verschmutzt, schwergängig	4
Kompliziert: → Stufen, Treppen, Absätze → Neigungen > 5 ° → Kombinationen der Merkmale von „Eingeschränkt“ und „Schwierig“	8

Positioniergenauigkeit Ziehen/Schieben

<i>Positioniergenauigkeit</i>	<i>Bewegungsgeschwindigkeit</i>	
	langsam (< 0,8 m/s)	schnell (0,8 – 1,3 m/s)
Gering - keine Vorgabe des Fahrweges - Last kann ausrollen oder wird an Anschlag gestoppt	1	2
Hoch - Last ist exakt zu positionieren und anzuhalten - Fahrweg ist exakt einzuhalten - häufige Richtungsänderungen	2	4

Anmerkung: Die mittlere Schrittgeschwindigkeit beträgt ca. 1 m/s.

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

C.1 Eingangsgrößen Ist-Zustand

Bezeichnung	Einheit	Ausprägung / Wert
SYSTEMGESTALTUNG		
Technik		
Art des Ladungsträgers		GLT
Art des Fahrzeugs		Schlepper mit Anhänger
Art der Steuerung des Fahrzeugs		fahrgesteuert
Geschlecht Routenzugfahrer		männlich
Antrieb des Fahrzeugs		Elektroantrieb
Anhängertyp		Plattformwagen
Einsatz von Zug-/Schiebehilfen?		Nein
Beladetechnik Routenzug		manuell mit Hilfsmittel
Beladetechnik Trolley/Rahmen		kein Trolley-/Rahmeneinsatz
Entladetechnik Routenzug		manuell (ohne Hilfsmittel)
Entladetechnik Trolley/Rahmen		kein Trolley-/Rahmeneinsatz
Bereitstellung Quelle		Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln
Bereitstellung Senke		Bereitstellung auf Anhängern/Transporthilfsmitteln
Technischer Informationsträger		Computer (Produktionsplan)
Organisation		
Primäre Transportaufgabe		Versorgung
Materialflusssteuerungsprinzip		bedarfsorientiert
Auslösung des Transportauftrags		EDV
Steuerung Tourenstart		fester Fahrplan
Integration Beladung		entkoppelt
Integration Entladung		integriert
Verbindung von Schlepper und Anhängern im Routenzugprozess		Anhänger fix miteinander verbunden, An- und Abkuppeln des Anhängerverbundes an/von Schlepper

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

SYSTEMELEMENTE		
Transportgut		
Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	[kg]	200,0
Route		
Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	[m]	10
Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	[m]	4
Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	[1/h]	1,5
Routenlänge	[m]	500
Haltepunkte Entladung		
Durchsatz H_1	[LT/h]	0,50
Durchsatz H_2	[LT/h]	1,45
Durchsatz H_3	[LT/h]	0,60
Durchsatz H_4	[LT/h]	1,20
Durchsatz H_5	[LT/h]	4,25
Durchsatz H_6	[LT/h]	1,50
Durchsatz H_7	[LT/h]	
Durchsatz H_8	[LT/h]	
Durchsatz H_9	[LT/h]	
Durchsatz H_10	[LT/h]	
Durchsatz H_11	[LT/h]	
Durchsatz H_12	[LT/h]	
Durchsatz H_13	[LT/h]	
Durchsatz H_14	[LT/h]	
Durchsatz H_15	[LT/h]	
Durchsatz H_16	[LT/h]	
Durchsatz H_17	[LT/h]	
Durchsatz H_18	[LT/h]	
Durchsatz H_19	[LT/h]	
Durchsatz H_20	[LT/h]	
Durchsatz H_21	[LT/h]	
Durchsatz H_22	[LT/h]	
Durchsatz H_23	[LT/h]	
Durchsatz H_24	[LT/h]	
Durchsatz H_25	[LT/h]	
Durchsatz H_26	[LT/h]	
Durchsatz H_27	[LT/h]	
Durchsatz H_28	[LT/h]	
Durchsatz H_29	[LT/h]	
Durchsatz H_30	[LT/h]	
Ladungsträger		
Investitionskosten pro Ladungsträger	[€]	50
Abschreibungsdauer Ladungsträger	[Jahre]	2
Wartungs- und Reparaturfaktor Ladungsträger	[%]	15,0
Gewicht Ladungsträger (leer)	[kg]	20,0

Transportmittel		
Transportkapazität pro Fahrzeug	[LT]	0
Länge Fahrzeug	[m]	2,0
Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	1,7
Ausfallzeit Fahrzeug pro Jahr	[h]	20
Investitionskosten pro Fahrzeug	[€]	12.000
Abschreibungsdauer Fahrzeug	[Jahre]	8
Wartungs- und Reparaturfaktor Fahrzeug	[%]	10,0
Energieverbrauch Fahrzeug	[kWh/h]	0,99
Anzahl Anhänger je Fahrzeug	[Stk]	5
Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	[m]	2,0
Transportkapazität pro Anhänger	[LT]	1
Investitionskosten je Anhänger	[€]	500
Abschreibungsdauer Anhänger	[Jahre]	8
Wartungs- und Reparaturfaktor Anhänger	[%]	10,0
Gewicht Anhänger (leer)	[kg]	200,0
Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	[Stk]	0
Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	[LT]	0
Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	[€]	0
Abschreibungsdauer Rahmen oder Trolley	[Jahre]	0
Wartungs- und Reparaturfaktor Rahmen oder Trolley	[%]	0
Gewicht Trolley (leer)	[kg]	0
Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	[€]	0
Abschreibungsdauer Zug-/Schiebehilfe	[Jahre]	0
Wartungs- und Reparaturfaktor Zug-/Schiebehilfe	[%]	0
Be- und Entladetechnik		
Anzahl Beladetechnik	[Stk]	1
Investitionskosten pro Beladetechnik	[€]	10.000
Abschreibungsdauer Beladetechnik	[Jahre]	8
Wartungs- und Reparaturfaktor Beladetechnik	[%]	10,0
Anzahl Entladetechnik	[Stk]	-
Investitionskosten pro Entladetechnik	[€]	-
Abschreibungsdauer Entladetechnik	[Jahre]	-
Wartungs- und Reparaturfaktor Entladetechnik	[%]	-
Bereitstelltechnik		
Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	[€]	100
Abschreibungsdauer Bereitstelltechnik	[Jahre]	5
Wartungs- und Reparaturfaktor Bereitstelltechnik	[%]	10,0
Informationstechnik		
Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
Investitionskosten pro Informationstechnik	[€]	2.000
Abschreibungsdauer Informationstechnik	[Jahre]	5
Wartungs- und Reparaturfaktor Informationstechnik	[%]	15,0
Personal		
Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	[€]	50.000
Verteilzeitfaktor	[%]	10,0

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

SYSTEMPROZESSE (bezogen auf eine Tour bei mittlerer Beladung)		
Beladung		
Anzahl Beladevorgänge (integriert)	[Stk]	1
Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	[s]	360
Anzahl Beladevorgänge (entkoppelt)	[Stk]	4,75
Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	[s]	120
Fahrt		
Zeitzuschlag	[s]	-
Halt		
Dauer eines Haltevorgangs	[s]	10
Entladung		
Anzahl Entladevorgänge (integriert)	[Stk]	4,75
Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	[s]	60
Anzahl Entladevorgänge (entkoppelt)	[Stk]	0
Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	[s]	0
Routenfrequenz/Tourenstartabstand		
Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	[min]	30,0
bzw. Geplanter kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0

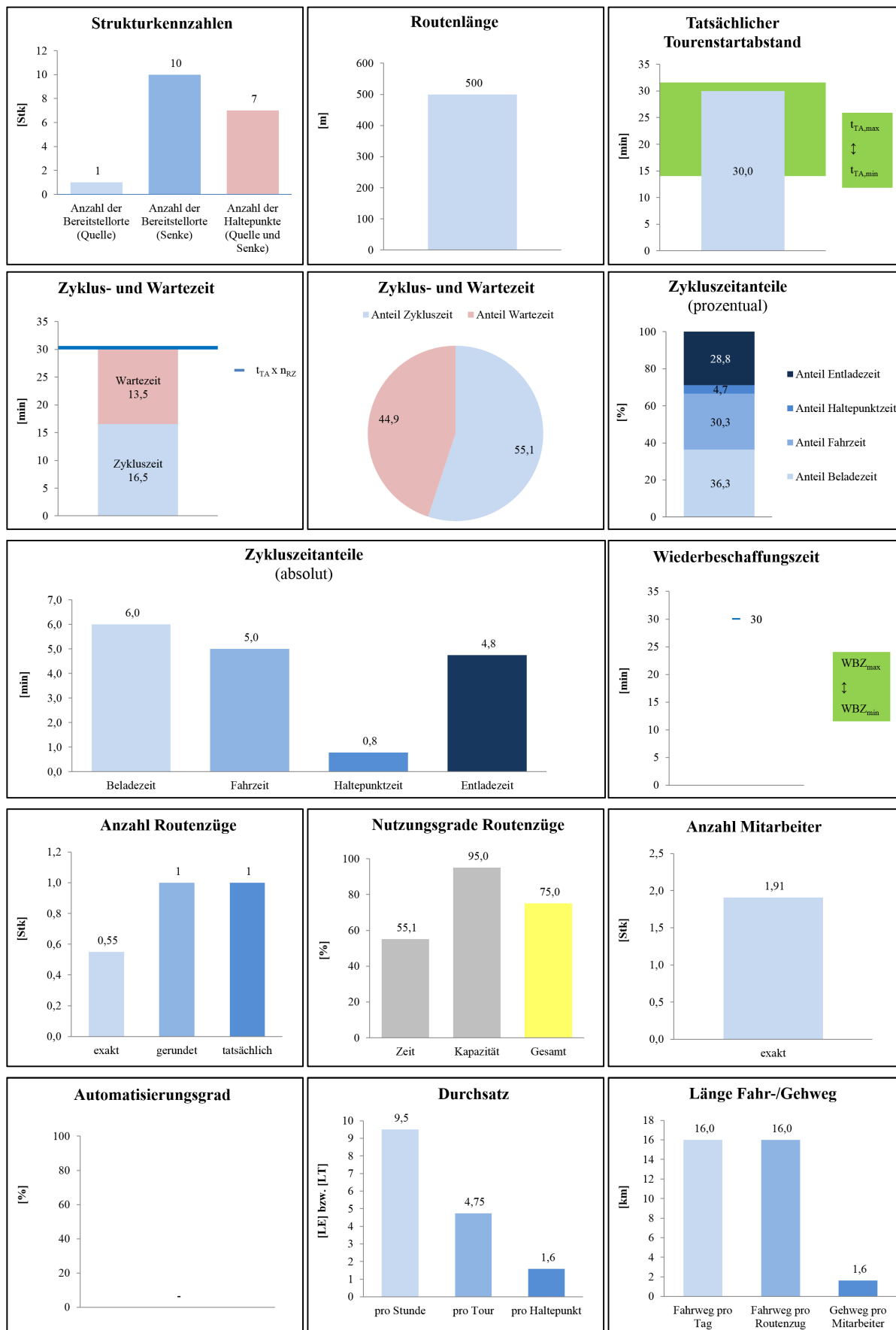
WEITERE EINGABEPARAMETER		
Arbeitszeit		
Arbeitszeit pro Schicht	[h]	8,00
Anzahl Schichten pro Tag	[Stk]	2
Arbeitstage pro Jahr	[Tage]	240
Wiederbeschaffungszeit		
Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	[min]	30,0
Kostendaten		
Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	[%]	6,0
Summe sonstiger Investitionen	[€]	2.000
Summe sonstiger Abschreibungen	[€/Jahr]	500
Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	200
Summe Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
Summe Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
Summe Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
Summe sonstiger Energiekosten	[€/Jahr]	500
Qualitätsdaten (jeweils bezogen auf ein Jahr)		
Anzahl Transportaufträge	[LT]	36.480
Anzahl termintreuer Transportaufträge	[LT]	35.320
Summe Lieferterminabweichung	[min]	6.400
Anzahl mengentreuer Transportaufträge	[LT]	36.450
Summe Liefermengenabweichung	[Stk]	35
Anzahl Unfälle mit Ausfallzeit	[Stk]	1
Zahl der geleisteten Arbeitsstunden	[h]	7.327
Anzahl der Ausfalltage	[Tage]	3
Ergonomie Beladevorgänge		
Umsetzen/Halten/Tragen - einhändig/zweihändig		0
Umsetzen/Halten/Tragen - Körperhaltung		0
Umsetzen/Halten/Tragen - Ausführungsbedingungen		0
Kriterium - Anzahl Vorgänge (Umsetzen)		0
Kriterium - Dauer Vorgänge (Halten)		0
Kriterium - Entfernung (Tragen)		0
Ziehen/Schieben - Körperhaltung		0
Ziehen/Schieben - Ausführungsbedingungen		0
Ziehen/Schieben - Positioniergenauigkeit		0
Trolley/Anhänger NUR Lenkrollen		0
Kriterium - Anzahl Vorgänge (≤5m)		0
Kriterium - Entfernung (>5m)		0
Ergonomie Entladevorgänge		
Umsetzen/Halten/Tragen - einhändig/zweihändig		0
Umsetzen/Halten/Tragen - Körperhaltung		-
Umsetzen/Halten/Tragen - Ausführungsbedingungen		-
Kriterium - Anzahl Vorgänge (Umsetzen)		0
Kriterium - Dauer Vorgänge (Halten)		0
Kriterium - Entfernung (Tragen)		0
Ziehen/Schieben - Körperhaltung		2,0
Ziehen/Schieben - Ausführungsbedingungen		1,0
Ziehen/Schieben - Positioniergenauigkeit		1,5
Trolley/Anhänger NUR Lenkrollen		Nein
Kriterium - Anzahl Vorgänge (≤5m)		Ja
Kriterium - Entfernung (>5m)		Nein

C.2 Bewertungsergebnis Ist-Zustand

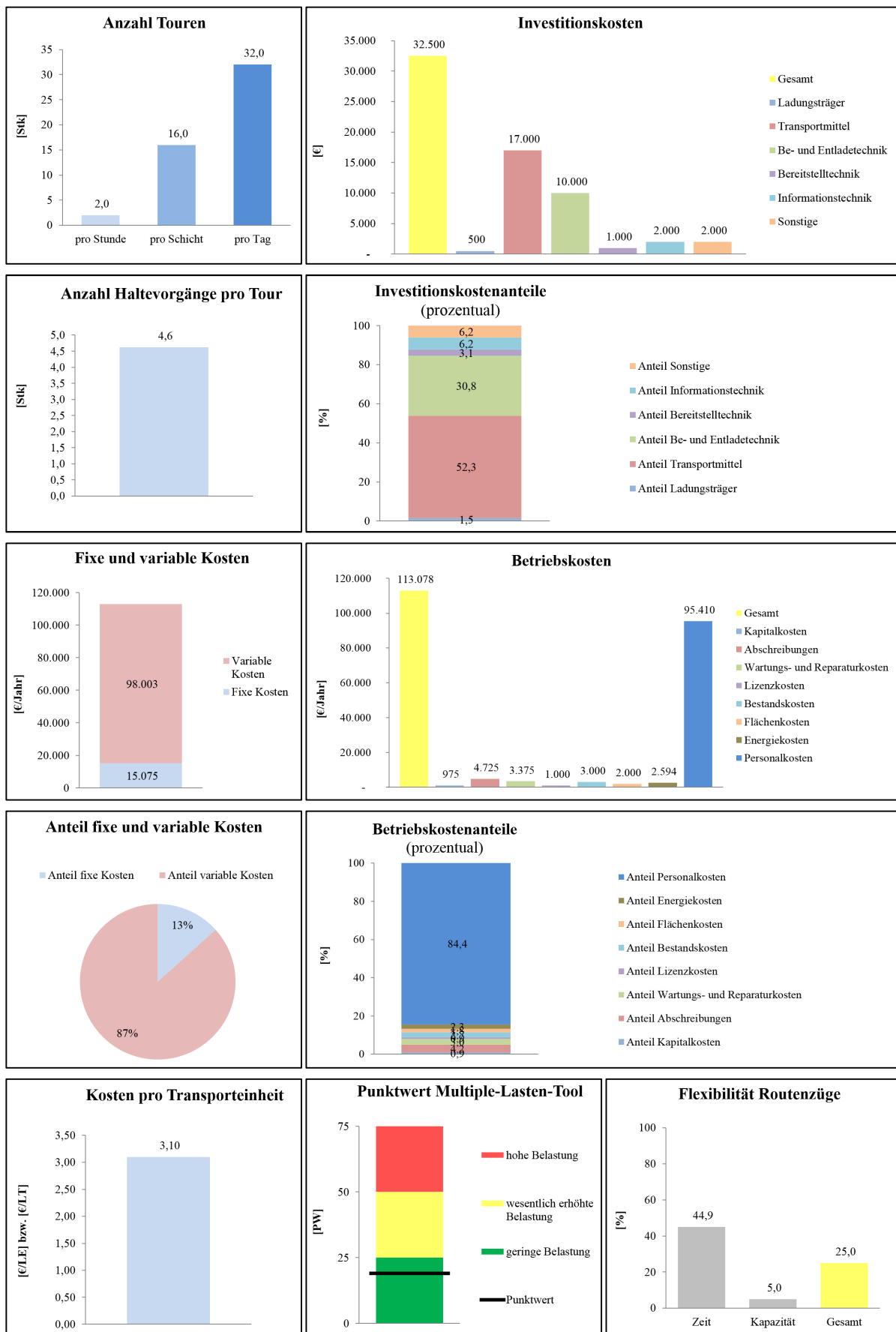
Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	16,5
L-Z-5	Wartezeit	[min]	13,5
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	55,1
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	44,9
L-Z-8	Beladezeit	[min]	6,0
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	36,3
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	30,3
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	4,7
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	28,8
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	55,1
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	55,1
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	10
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,55
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	1,91
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	16,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	1,6
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	2,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	16,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	32,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	4,6
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,1
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	75,0

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	32.500
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	500
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	17.000
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	2.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	1,5
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	52,3
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	30,8
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	3,1
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	6,2
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	6,2
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	113.078
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	975
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	4.725
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	3.375
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	2.594
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	95.410
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	0,9
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	4,2
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	3,0
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	0,9
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	2,7
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	1,8
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	2,3
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	84,4
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	15.075
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	98.003
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	13,3
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	86,7
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	3,10
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	136,47
Q-S-2	Unfallschwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	19
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	44,9
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	44,9
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	5,0
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	25,0

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel



C.2 Bewertungsergebnis Ist-Zustand



C.3 Analyseergebnis Ist-Zustand: Kennzahlen

Wirksamkeit Kennzahl [%]											Abk. L-Z-4					
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter	Min.	Max.	Trend	Spannweite	
-18,2	-14,5	-10,9	-7,3	-3,6	0,0	3,6	7,3	10,9	14,5	18,2	30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-18,2	18,2	positiv	synchرون	
-15,7	-12,6	-9,4	-6,3	-3,1	0,0	3,1	6,3	9,4	12,5	15,5	6 Durchsatz	-15,7	15,5	positiv	asynchرون	
-15,7	-12,6	-9,4	-6,3	-3,1	0,0	3,1	6,3	9,4	12,5	15,5	36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-15,7	15,5	positiv	asynchرون	
-15,1	-12,1	-9,1	-6,1	-3,0	0,0	3,0	6,1	9,1	12,1	15,1	5 Routenlänge	-15,1	15,1	positiv	synchرون	
-14,4	-11,5	-8,6	-5,8	-2,9	0,0	2,9	5,8	8,6	11,5	14,4	34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-14,4	14,4	positiv	synchرون	
30,3	20,2	13,0	7,6	3,4	0,0	-2,8	-5,0	-7,0	-8,6	-10,1	10 Fahrgeschwindigkeit	-10,1	30,3	negativ	asynchرون	
-2,3	-1,9	-1,4	-0,9	-0,5	0,0	0,5	0,9	1,4	1,9	2,3	33 Dauer eines Haltevorgangs	-2,3	2,3	positiv	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4 Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7 Investitionskosten pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8 Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9 Länge Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11 Investitionskosten pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12 Energieverbrauch Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13 Anzahl Anhänger je Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14 Länge Anhänger (inkl. Dechsel)	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15 Transportkapazität pro Anhänger	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16 Investitionskosten je Anhänger	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17 Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18 Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19 Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20 Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21 Anzahl Beladetechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22 Investitionskosten pro Beladetechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23 Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24 Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25 Anzahl Bereitstellertechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26 Investitionskosten pro Bereitstellertechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27 Anzahl Informationstechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28 Investitionskosten pro Informationstechnik	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32 Zeitausschlag	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35 Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37 Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38 Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39 Summe sonstiger Investitionen	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40 Summe sonstiger Abschreibungen	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41 Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42 Summe Lizenzkosten	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43 Summe Bestandskosten	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44 Summe Flächenkosten	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45 Summe sonstiger Energiekosten	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46 Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	kein	synchرون	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47 Ergonomie Entladevorgänge	0,0	0,0	kein	synchرون	

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Abk. L-R-6														
Wirksamkeit Kennzahl [%]												Spannweite		
Anzahl Mitarbeiter														
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter	Max.	Trend	
-28,2	-22,6	-16,9	-11,3	-5,6	0,0	5,6	11,3	16,9	22,5	28,1	6	28,1	positiv	synchرون
-18,3	-14,6	-11,0	-7,3	-3,7	0,0	3,7	7,3	11,0	14,6	18,3	31	18,3	positiv	synchرون
43,6	29,0	18,7	10,9	4,8	0,0	-4,0	-7,3	-10,1	-12,5	-14,6	36	43,6	negativ	asynchرون
-11,5	-9,2	-6,9	-4,6	-2,3	0,0	2,3	4,6	6,9	9,2	11,5	30	11,5	positiv	synchرون
-9,6	-7,7	-5,8	-3,8	-1,9	0,0	1,9	3,8	5,8	7,7	9,6	5	9,6	positiv	synchرون
-9,1	-7,3	-5,5	-3,7	-1,8	0,0	1,8	3,7	5,5	7,3	9,1	34	9,1	positiv	synchرون
19,2	12,8	8,2	4,8	2,1	0,0	-1,7	-3,2	-4,4	-5,5	-6,4	10	19,2	negativ	asynchرون
-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	33	1,5	positiv	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46	0,0	kein	synchرون
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47	0,0	kein	synchرون

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Abk. L-M-8															
Wirksamkeit Kennzahl [%]															
Gesamtnutzungsgrad															
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter	Min.	Max.	Trend	Spannweite
63,3	42,2	27,1	15,8	7,0	0,0	-5,8	-10,6	-13,3	-13,3	-13,3	13	-13,3	63,3	negativ	asynchron
63,3	42,2	27,1	15,8	7,0	0,0	-5,8	-10,6	-13,3	-13,3	-13,3	15	-13,3	63,3	negativ	asynchron
-19,1	-17,9	-16,8	-15,0	-7,5	0,0	7,5	15,0	22,4	29,9	37,3	6	-19,1	37,3	positiv	asynchron
-6,5	-8,5	-8,2	-6,4	-3,5	0,0	4,0	8,5	13,2	18,1	23,2	36	-8,5	23,2	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	6,7	11,7	4	0,0	11,7	positiv	asynchron
11,1	7,4	4,8	2,8	1,2	0,0	-1,0	-1,9	-2,6	-3,2	-3,7	10	-3,7	11,1	negativ	asynchron
-6,7	-5,3	-4,0	-2,7	-1,3	0,0	1,3	2,7	4,0	5,3	6,7	30	-6,7	6,7	positiv	asynchron
-5,6	-4,4	-3,3	-2,2	-1,1	0,0	1,1	2,2	3,3	4,4	5,6	5	-5,6	5,6	positiv	asynchron
-5,3	-4,2	-3,2	-2,1	-1,1	0,0	1,1	2,1	3,2	4,2	5,3	34	-5,3	5,3	positiv	asynchron
-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	33	-0,9	0,9	positiv	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46	0,0	0,0	kein	asynchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47	0,0	0,0	kein	asynchron

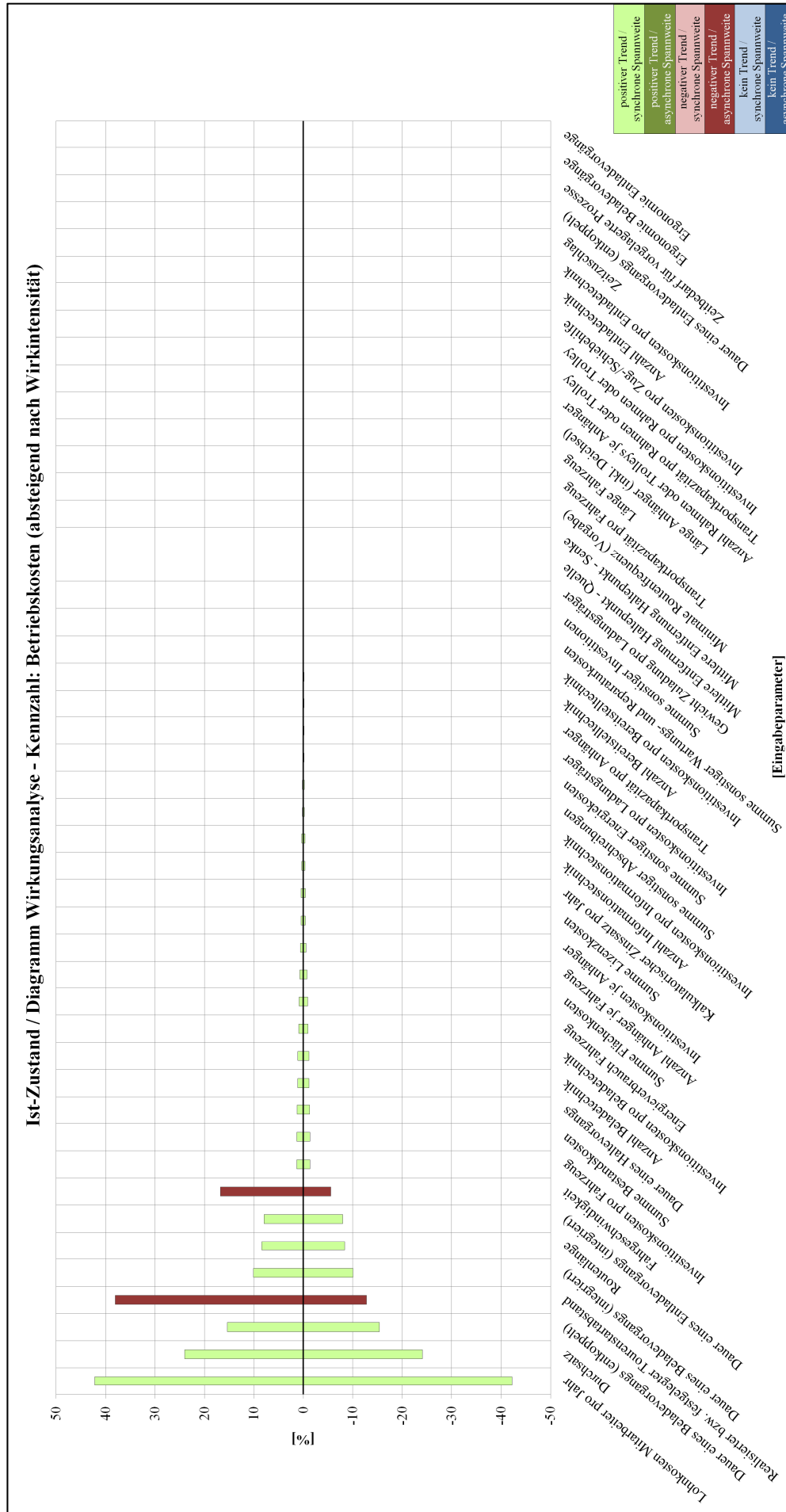


Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Abk. W-I-1											
Wirksamkeit Kennzahl [%]											
Investitionskosten Gesamt											
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter
-18,5	-14,8	-11,1	-7,4	-3,7	0,0	3,7	7,4	11,1	14,8	18,5	11 Investitionskosten pro Fahrzeug
-15,4	-12,3	-9,2	-6,2	-3,1	0,0	3,1	6,2	9,2	12,3	15,4	21 Anzahl Beladetechnik
-15,4	-12,3	-9,2	-6,2	-3,1	0,0	3,1	6,2	9,2	12,3	15,4	22 Investitionskosten pro Beladetechnik
-8,5	-6,8	-5,1	-3,4	-1,7	0,0	1,7	3,4	5,1	6,8	8,5	13 Anzahl Anhänger je Fahrzeug
-7,7	-6,2	-4,6	-3,1	-1,5	0,0	1,5	3,1	4,6	6,2	7,7	16 Investitionskosten je Anhänger
-3,1	-2,5	-1,8	-1,2	-0,6	0,0	0,6	1,2	1,8	2,5	3,1	27 Anzahl Informationstechnik
-3,1	-2,5	-1,8	-1,2	-0,6	0,0	0,6	1,2	1,8	2,5	3,1	28 Investitionskosten pro Informationstechnik
-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	39 Summe sonstiger Investitionen
-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	25 Anzahl Bereitstellertechnik
-0,8	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	26 Investitionskosten pro Bereitstellertechnik
-0,8	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	7 Investitionskosten pro Ladungsträger
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15 Transportkapazität pro Anhänger
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 Gewicht Zuladung pro Ladungsträger
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4 Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5 Routenlänge
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6 Durchsatz
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8 Transportkapazität pro Fahrzeug
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9 Länge Fahrzeug
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10 Fahrgeschwindigkeit
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12 Energieverbrauch Fahrzeug
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14 Länge Anhänger (inkl. Deichsel)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17 Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18 Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19 Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20 Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23 Anzahl Entladetechnik
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24 Investitionskosten pro Entladetechnik
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32 Zeitzuschlag
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33 Dauer eines Haltevorgangs
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35 Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37 Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38 Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40 Summe sonstiger Abschreibungen
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41 Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42 Summe Lizenzkosten
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43 Summe Bestandskosten
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44 Summe Flächenkosten
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45 Summe sonstiger Energiekosten
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46 Ergonomie Beladevorgänge
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47 Ergonomie Entladevorgänge

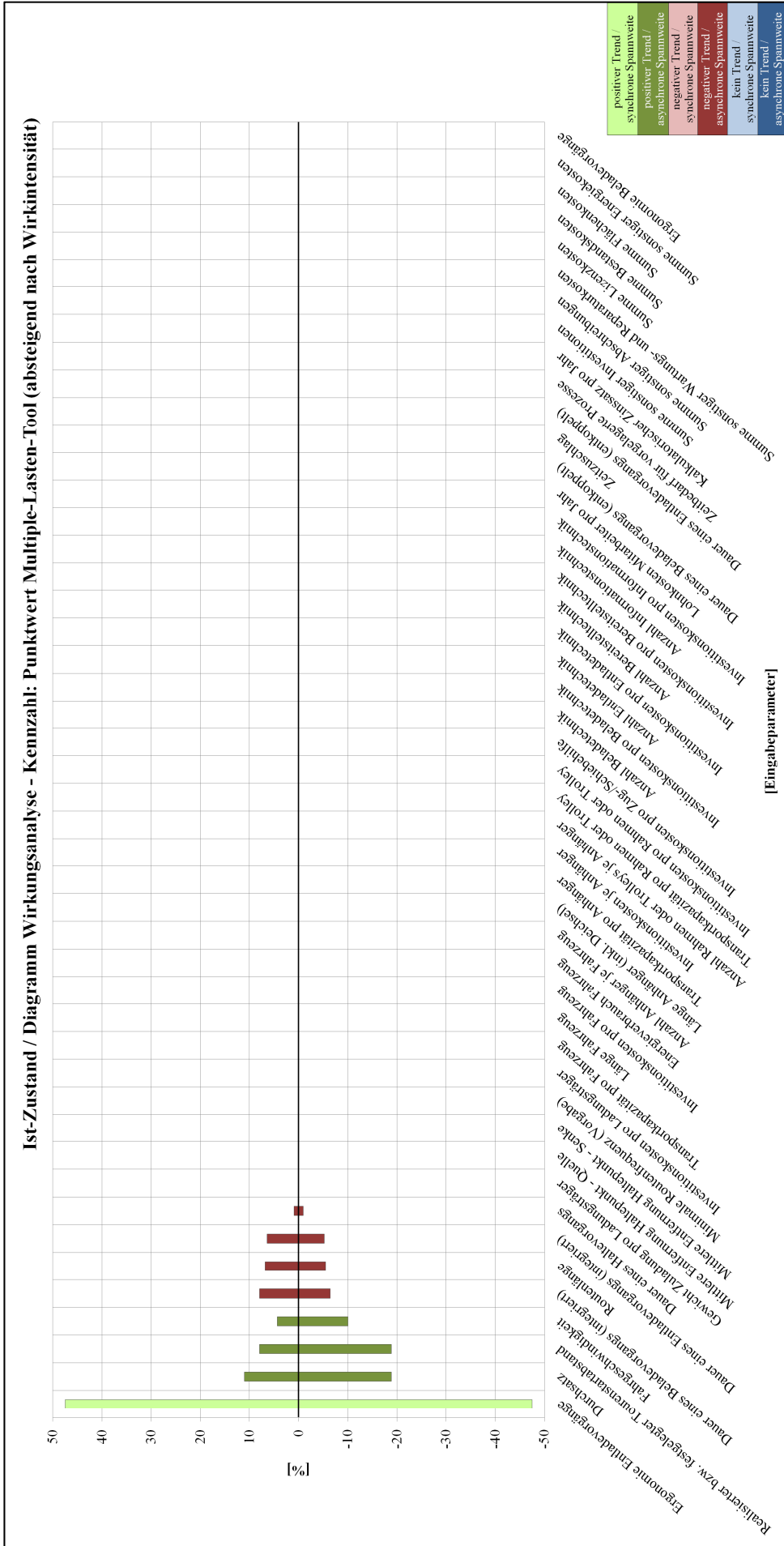
Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Abk. W-B-1															
Wirksamkeit Kennzahl [%]															
Betriebskosten															
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter	Min.	Max.	Trend	Spannweite
-42,2	-33,7	-25,3	-16,9	-8,4	0,0	8,4	16,9	25,3	33,7	42,2	29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-42,2	42,2	positiv	synchron
-24,1	-19,3	-14,5	-9,6	-4,8	0,0	4,8	9,6	14,5	19,2	24,0	6 Durchsatz	-24,1	24,0	positiv	synchron
-15,4	-12,3	-9,2	-6,2	-3,1	0,0	3,1	6,2	9,2	12,3	15,4	31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	-15,4	15,4	positiv	synchron
38,0	25,3	16,3	9,5	4,2	0,0	-3,5	-6,3	-8,8	-10,9	-12,8	36 Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-12,8	38,0	negativ	asynchron
-10,1	-8,1	-6,0	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,1	10,1	30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-10,1	10,1	positiv	synchron
-8,4	-6,7	-5,0	-3,4	-1,7	0,0	1,7	3,4	5,0	6,7	8,4	5 Routenlänge	-8,4	8,4	positiv	synchron
-8,0	-6,4	-4,8	-3,2	-1,6	0,0	1,6	3,2	4,8	6,4	8,0	34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-8,0	8,0	positiv	synchron
16,8	11,2	7,2	4,2	1,9	0,0	-1,5	-2,8	-3,9	-4,8	-5,6	10 Fahrgeschwindigkeit	-5,6	16,8	negativ	asynchron
-1,4	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4	11 Investitionskosten pro Fahrzeug	-1,4	1,4	positiv	synchron
-1,3	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3	43 Summe Bestandskosten	-1,3	1,3	positiv	synchron
-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	33 Dauer eines Haltevorgangs	-1,3	1,3	positiv	synchron
-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	21 Anzahl Beladetechnik	-1,1	1,1	positiv	synchron
-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	22 Investitionskosten pro Beladetechnik	-1,1	1,1	positiv	synchron
-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	12 Energieverbrauch Fahrzeug	-0,9	0,9	positiv	synchron
-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	44 Summe Flächenkosten	-0,9	0,9	positiv	synchron
-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	13 Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-0,7	0,7	positiv	synchron
-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	16 Investitionskosten je Anhänger	-0,6	0,6	positiv	synchron
-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	42 Summe Lizenzkosten	-0,4	0,4	positiv	synchron
-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	38 Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,4	0,4	positiv	synchron
-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	27 Anzahl Informationstechnik	-0,3	0,3	positiv	synchron
-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	28 Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,3	0,3	positiv	synchron
-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	40 Summe sonstiger Abschreibungen	-0,2	0,2	positiv	synchron
-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	45 Summe sonstiger Energiekosten	-0,2	0,2	positiv	synchron
-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	7 Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,2	0,2	positiv	synchron
-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	15 Transportkapazität pro Anhänger	-0,2	0,2	positiv	synchron
-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	25 Anzahl Bereitstellertechnik	-0,1	0,1	positiv	synchron
-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	26 Investitionskosten pro Bereitstellertechnik	-0,1	0,1	positiv	synchron
-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	41 Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,1	0,1	positiv	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39 Summe sonstiger Investitionen	0,0	0,0	positiv	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4 Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8 Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9 Länge Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14 Länge Anhänger (inkl. Dechsel)	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17 Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18 Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19 Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20 Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23 Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24 Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32 Zeitzuschlag	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35 Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37 Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46 Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	kein	synchron
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47 Ergonomie Entladevorgänge	0,0	0,0	kein	synchron



Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Wirksamkeit Kennzahl [%] Punktwert Multiple-Lasten-Tool											Abk. Q-E-1					
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Nr. Eingabeparameter	Min.	Max.	Trend	Spannweite	
-47,5	-38,0	-28,5	-19,0	-9,5	0,0	9,5	19,0	28,5	38,0	47,5	47 Ergonomie Entladevorgänge	-47,5	47,5	positiv	synchron	
-18,9	-14,0	-9,8	-6,1	-2,9	0,0	2,6	5,0	7,1	9,1	11,0	6 Durchsatz	-18,9	11,0	positiv	asynchron	
-18,9	-14,0	-9,8	-6,1	-2,9	0,0	2,6	5,0	7,1	8,0	8,0	36 Realistischer bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-18,9	8,0	positiv	asynchron	
-10,0	-7,1	-4,8	-2,9	-1,3	0,0	1,1	2,1	2,9	3,7	4,3	10 Fahrgeschwindigkeit	-10,0	4,3	positiv	asynchron	
8,0	6,5	4,7	3,1	1,5	0,0	-1,4	-2,8	-4,1	-5,3	-6,5	30 Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-6,5	8,0	negativ	asynchron	
6,8	5,3	3,9	2,5	1,2	0,0	-1,2	-2,3	-3,4	-4,5	-5,5	5 Routenlänge	-5,5	6,8	negativ	asynchron	
6,4	5,0	3,7	2,4	1,2	0,0	-1,1	-2,2	-3,3	-4,3	-5,2	34 Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-5,2	6,4	negativ	asynchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,9	33 Dauer eines Haltevorgangs	-0,9	0,0	negativ	asynchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3 Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4 Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7 Investitionskosten pro Ladungsträger	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8 Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9 Länge Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11 Investitionskosten pro Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12 Energieverbrauch Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13 Anzahl Anhänger je Fahrzeug	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14 Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15 Transportkapazität pro Anhänger	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16 Investitionskosten je Anhänger	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17 Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18 Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19 Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20 Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21 Anzahl Beladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22 Investitionskosten pro Beladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23 Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24 Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25 Anzahl Bereitstelltechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26 Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27 Anzahl Informationstechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28 Investitionskosten pro Informationstechnik	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29 Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31 Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32 Zeiruschlag	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35 Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37 Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38 Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39 Summe sonstiger Investitionen	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40 Summe sonstiger Abschreibungen	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41 Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42 Summe Lizenzkosten	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43 Summe Bestandskosten	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44 Summe Flächenkosten	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45 Summe sonstiger Energiekosten	0,0	0,0	kein	synchron	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46 Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	kein	synchron	



C.4 Analyseergebnis Ist-Zustand: Eingabeparameter (Tourenstartabstand)

Wirksamkeit Eingabeparameter [%]											Nr. 36				Abk.	Kennzahl	Min.	Max.	Absolut	Trend	Spannweite
50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	Realistischer bzw. festgelegter Tourenstartabstand										
950,0	760,0	570,0	380,0	190,0	0,0	-190,0	-380,0	-570,0	-760,0	-950,0	Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	-950,0	950,0	950,0	negativ	synchron				
100,0	66,7	42,9	25,0	11,1	0,0	-9,1	-16,7	-23,1	-28,6	-33,3	L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	-33,3	100,0	100,0	negativ	asynchron				
100,0	66,7	42,9	25,0	11,1	0,0	-9,1	-16,7	-23,1	-28,6	-33,3	L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	-33,3	100,0	100,0	negativ	asynchron				
100,0	66,7	42,9	25,0	11,1	0,0	-9,1	-16,7	-23,1	-28,6	-33,3	L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	-33,3	100,0	100,0	negativ	asynchron				
100,0	66,7	42,9	25,0	11,1	0,0	-9,1	-16,7	-23,1	-28,6	-33,3	L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	-33,3	100,0	100,0	negativ	asynchron				
100,0	66,7	42,9	25,0	11,1	0,0	-9,1	-16,7	-23,1	-28,6	-33,3	L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	-33,3	100,0	100,0	negativ	asynchron				
-92,0	-73,6	-55,2	-36,8	-18,4	0,0	18,4	36,8	55,2	73,7	92,3	L-Z-5	Wartezeit	-92,0	92,3	92,3	positiv	synchron				
-84,1	-56,1	-36,0	-21,0	-9,3	0,0	7,6	14,0	19,4	24,1	28,2	L-Z-7	Anteil Wartezeit	-84,1	28,2	84,1	positiv	asynchron				
-84,1	-56,1	-36,0	-21,0	-9,3	0,0	7,6	14,0	19,4	24,1	28,2	Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	-84,1	28,2	84,1	positiv	asynchron				
-84,1	-56,1	-36,0	-21,0	-9,3	0,0	7,6	14,0	19,4	24,1	28,2	Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	-84,1	28,2	84,1	positiv	asynchron				
19,5	25,7	24,7	19,1	10,6	0,0	-12,1	-25,4	-39,6	-54,4	-69,8	Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	-69,8	25,7	69,8	kein	asynchron				
68,6	45,7	29,4	17,2	7,6	0,0	-6,2	-11,4	-15,8	-19,6	-23,0	L-Z-6	Anteil Zykluszeit	-23,0	68,6	68,6	negativ	asynchron				
68,6	45,7	29,4	17,2	7,6	0,0	-6,2	-11,4	-15,8	-19,6	-23,0	L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	-23,0	68,6	68,6	negativ	asynchron				
68,6	45,7	29,4	17,2	7,6	0,0	-6,2	-11,4	-15,8	-19,6	-23,0	L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	-23,0	68,6	68,6	negativ	asynchron				
68,6	45,7	29,4	17,2	7,6	0,0	-6,2	-11,4	-15,8	-19,6	-23,0	L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	-23,0	68,6	68,6	negativ	asynchron				
55,4	36,9	23,7	13,8	6,2	0,0	-5,0	-9,2	-12,8	-16,6	-18,6	W-B-8	Energiekosten	-18,6	55,4	55,4	negativ	asynchron				
-50,0	-40,0	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	L-Z-3	laisächlicher Tourenstartabstand	-50,0	50,0	50,0	positiv	synchron				
-50,0	-40,0	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	L-Z-11	Entladezeit	-50,0	50,0	50,0	positiv	synchron				
-50,0	-40,0	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	-50,0	50,0	50,0	positiv	synchron				
-50,0	-40,0	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	-50,0	50,0	50,0	positiv	synchron				
43,9	29,2	18,8	11,0	4,9	0,0	-4,0	-7,3	-10,1	-12,6	-14,7	W-B-19	Variable Kosten	-14,7	43,9	43,9	negativ	asynchron				
43,6	29,0	18,7	10,9	4,8	0,0	-4,0	-7,3	-10,1	-12,5	-14,6	W-B-9	Anzahl Mitarbeiter	-14,6	43,6	43,6	negativ	asynchron				
-40,7	-31,4	-22,7	-14,6	-7,1	0,0	6,7	12,9	18,8	24,5	29,9	W-B-15	Personalkosten	-14,6	43,6	43,6	negativ	asynchron				
38,0	25,3	16,3	9,5	4,2	0,0	-3,5	-6,3	-8,8	-10,9	-12,8	W-B-1	Betriebskosten	-12,8	38,0	38,0	negativ	asynchron				
38,0	25,3	16,3	9,5	4,2	0,0	-3,5	-6,3	-8,8	-10,9	-12,8	W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	-12,8	38,0	38,0	negativ	asynchron				
-30,3	-22,5	-15,7	-9,8	-4,6	0,0	4,1	7,8	11,2	14,3	17,1	Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	-30,3	17,1	30,3	positiv	asynchron				
-28,4	-22,7	-17,0	-11,4	-5,7	0,0	5,7	11,4	17,0	21,3	23,8	L-Z-10	Haltepunktzeit	-28,4	23,8	28,4	positiv	asynchron				
-28,4	-22,7	-17,0	-11,4	-5,7	0,0	5,7	11,4	17,0	21,3	23,8	L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	-28,4	23,8	28,4	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-10	Anteil Kapitalkosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-20	Anteil fixe Kosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-11	Anteil Abschreibungen	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-13	Anteil Lizenzkosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-15	Anteil Flächenkosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-27,5	-20,2	-14,0	-8,7	-4,1	0,0	3,6	6,8	9,6	12,2	14,6	W-B-14	Anteil Bestandskosten	-27,5	14,6	27,5	positiv	asynchron				
-6,5	-8,5	-8,2	-6,4	-3,5	0,0	4,0	8,5	13,2	18,1	23,2	L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	-8,5	23,2	23,2	kein	asynchron				
-18,9	-14,0	-9,8	-6,1	-2,9	0,0	2,6	5,0	7,1	8,0	8,0	Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	-18,9	8,0	18,9	positiv	asynchron				
18,6	14,4	10,4	6,7	3,2	0,0	-3,0	-5,9	-8,6	-11,1	-13,4	L-Z-12	Anteil Beladezeit	-13,4	18,6	18,6	negativ	asynchron				
18,6	14,4	10,4	6,7	3,2	0,0	-3,0	-5,9	-8,6	-11,1	-13,4	L-Z-13	Anteil Fahrzeit	-13,4	18,6	18,6	negativ	asynchron				
-17,5	-13,5	-9,8	-6,3	-3,0	0,0	2,9	5,6	8,1	7,0	3,4	L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	-17,5	8,1	17,5	kein	asynchron				
-15,7	-12,6	-9,4	-6,3	-3,1	0,0	3,1	6,3	9,4	7,8	15,5	L-Z-4	Zykluszeit	-15,7	15,5	15,7	positiv	asynchron				
-15,0	-11,6	-8,4	-5,4	-2,6	0,0	2,5	4,8	7,0	7,8	7,2	L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	-15,0	7,8	15,0	kein	asynchron				
12,6	9,2	6,4	4,0	1,9	0,0	-1,6	-3,1	-4,4	-5,6	-6,7	W-B-16	Anteil Energiekosten	-6,7	12,6	12,6	negativ	asynchron				
4,2	3,1	2,2	1,3	0,6	0,0	-0,6	-1,0	-1,5	-1,9	-2,2	W-B-21	Anteil variable Kosten	-2,2	4,2	4,2	negativ	asynchron				
4,0	2,9	2,0	1,3	0,6	0,0	-0,5	-1,0	-1,4	-1,8	-2,1	W-B-17	Anteil Personalkosten	-2,1	4,0	4,0	negativ	asynchron				

C.5 Analyseergebnis Ist-Zustand: Kennzahlenaggregation

Wirksamkeit aggregiert [%]		Summe Gewichtung ($\Sigma g_K = 100\%$)			100%	
Nr.	Eingabeparameter	Min.	Max.	Absolut	Trend	Spannweite
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-13,2	24,5	24,5	kein	asynchron
6	Durchsatz	-19,7	18,4	19,7	positiv	asynchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-17,3	17,3	17,3	positiv	synchron
10	Fahrgeschwindigkeit	-6,6	13,5	13,5	kein	asynchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	-11,5	11,5	11,5	positiv	synchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-9,0	9,4	9,4	kein	asynchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	-8,2	8,2	8,2	positiv	synchron
5	Routenlänge	-7,5	7,8	7,8	kein	asynchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-7,2	7,4	7,4	kein	asynchron
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-1,7	3,5	3,5	kein	asynchron
15	Transportkapazität pro Anhänger	-0,6	2,5	2,5	kein	asynchron
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	-2,5	2,5	2,5	positiv	synchron
21	Anzahl Beladetechnik	-2,0	2,0	2,0	positiv	synchron
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	-2,0	2,0	2,0	positiv	synchron
33	Dauer eines Haltevorgangs	-1,2	1,2	1,2	kein	synchron
16	Investitionskosten je Anhänger	-1,0	1,0	1,0	positiv	synchron
43	Summe Bestandskosten	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
27	Anzahl Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,4	0,4	positiv	asynchron
12	Energieverbrauch Fahrzeug	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
44	Summe Flächenkosten	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
39	Summe sonstiger Investitionen	-0,3	0,3	0,3	positiv	synchron
25	Anzahl Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
42	Summe Lizenzkosten	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
40	Summe sonstiger Abschreibungen	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
45	Summe sonstiger Energiekosten	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,0	0,0	0,0	positiv	synchron
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
23	Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
32	Zeitzuschlag	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
46	Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	0,0	kein	synchron

C.6 Bewertungsergebnisse Soll-Zustände

Soll-Zustand Nr. 1 (reduzierter Tourenstartabstand)

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	14,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	15,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	13,9
L-Z-5	Wartezeit	[min]	1,1
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	92,8
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	7,2
L-Z-8	Beladezeit	[min]	6,0
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,6
L-Z-11	Entladezeit	[min]	2,4
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	43,1
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	35,9
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	4,0
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	17,1
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	92,8
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	92,8
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	10
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,93
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	2,74
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	2,38
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	47,5
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	32,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	32,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	1,3
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	4,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	32,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	64,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	3,3
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,0
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	70,2

C.6 Bewertungsergebnisse Soll-Zustände

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	32.500
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	500
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	17.000
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	2.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	1,5
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	52,3
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	30,8
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	3,1
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	6,2
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	6,2
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	156.070
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	975
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	4.725
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	3.375
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	4.030
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	136.965
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	0,6
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	3,0
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	2,2
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	0,6
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	1,9
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	1,3
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	2,6
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	87,8
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	15.075
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	140.995
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	9,7
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	90,3
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	4,28
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	95,07
Q-S-2	Unfallsschwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	15
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	7,2
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	7,2
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	52,5
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	29,8

Soll-Zustand Nr. 2 (reduzierte Fahrgeschwindigkeit)

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	20,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	21,5
L-Z-5	Wartezeit	[min]	8,5
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	71,7
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	28,3
L-Z-8	Beladezeit	[min]	6,0
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	10,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	27,9
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	46,5
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	3,6
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	22,1
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	71,7
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	71,7
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	10
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,72
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	2,27
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	16,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	1,2
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	2,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	16,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	32,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	4,6
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,1
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	83,4

C.6 Bewertungsergebnisse Soll-Zustände

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	32.500
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	500
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	17.000
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	2.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	1,5
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	52,3
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	30,8
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	3,1
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	6,2
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	6,2
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	132.045
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	975
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	4.725
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	3.375
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	3.227
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	113.743
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	0,7
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	3,6
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	2,6
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	0,8
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	2,3
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	1,5
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	2,4
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	86,1
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	15.075
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	116.970
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	11,4
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	88,6
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	3,62
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	114,48
Q-S-2	Unfallschwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	17
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	28,3
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	28,3
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	5,0
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	16,6

Soll-Zustand Nr. 3 (Selbstbeladung)

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	17,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	22,4
L-Z-5	Wartezeit	[min]	7,6
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	74,7
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	25,3
L-Z-8	Beladezeit	[min]	11,9
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	53,0
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	22,3
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	3,4
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	21,2
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	74,7
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	74,7
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	5
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,75
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	5
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	1,64
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	16,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	1,9
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	2,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	16,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	32,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	4,6
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,1
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	84,8

C.6 Bewertungsergebnisse Soll-Zustände

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	29.750
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	250
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	14.500
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	2.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	0,8
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	48,7
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	33,6
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	3,4
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	6,7
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	6,7
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	99.724
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	893
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	4.288
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	3.088
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	3.338
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	82.118
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	0,9
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	4,3
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	3,1
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	1,0
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	3,0
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	2,0
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	3,3
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	82,3
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	14.268
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	85.456
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	14,3
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	85,7
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	2,73
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	158,56
Q-S-2	Unfallschwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	17
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	25,3
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	25,3
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	5,0
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	15,2

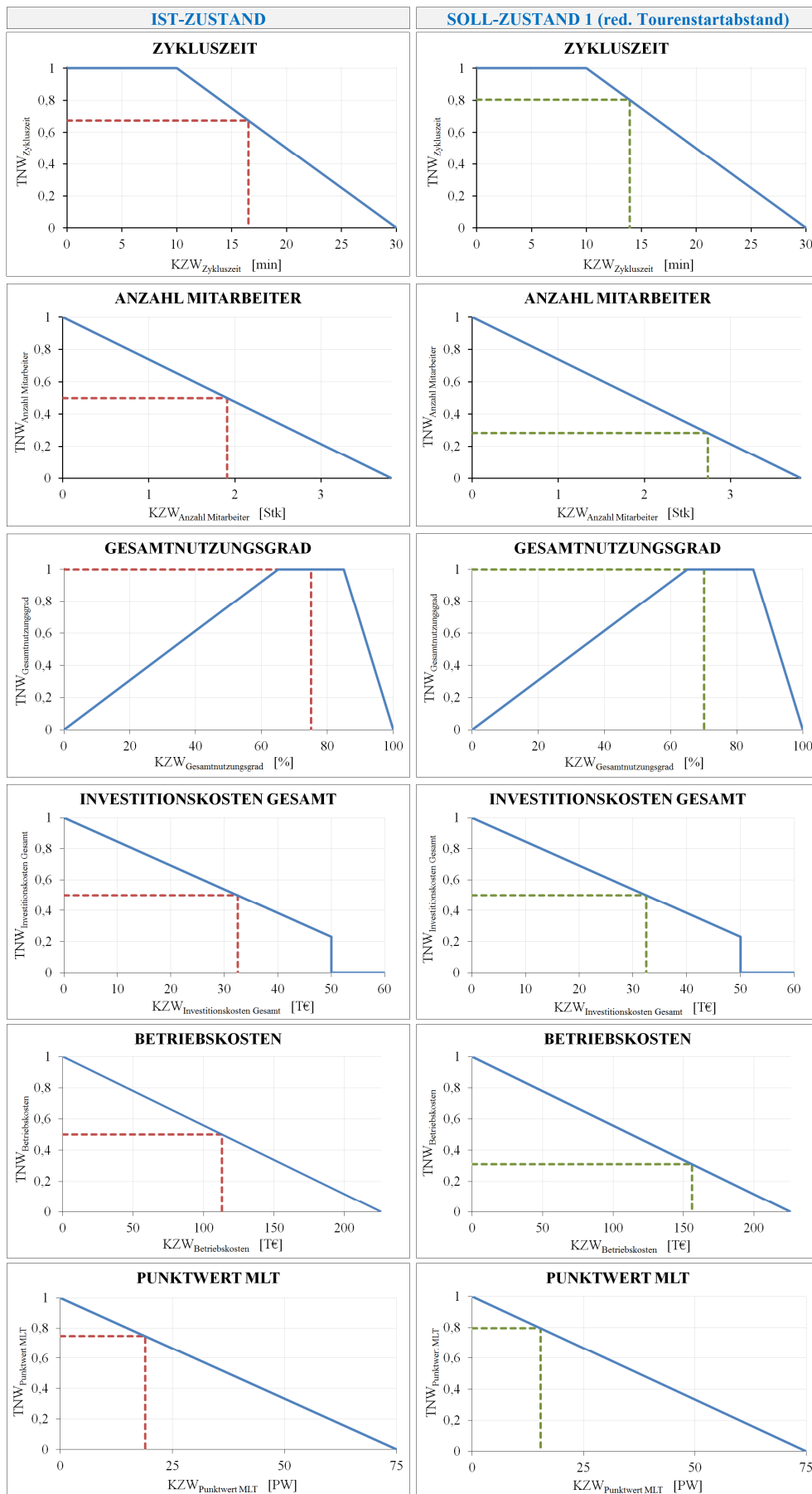
Soll-Zustand Nr. 4 (Routenzugtausch)

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	10,5
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	13,5
L-Z-5	Wartezeit	[min]	16,5
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	45,1
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	54,9
L-Z-8	Beladezeit	[min]	3,0
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	22,2
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	37,0
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	5,7
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	35,1
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	45,1
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	45,1
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	10
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,45
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	2
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	10
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	1,69
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	16,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	2,0
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	2,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	16,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	32,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	4,6
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,1
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	70,0

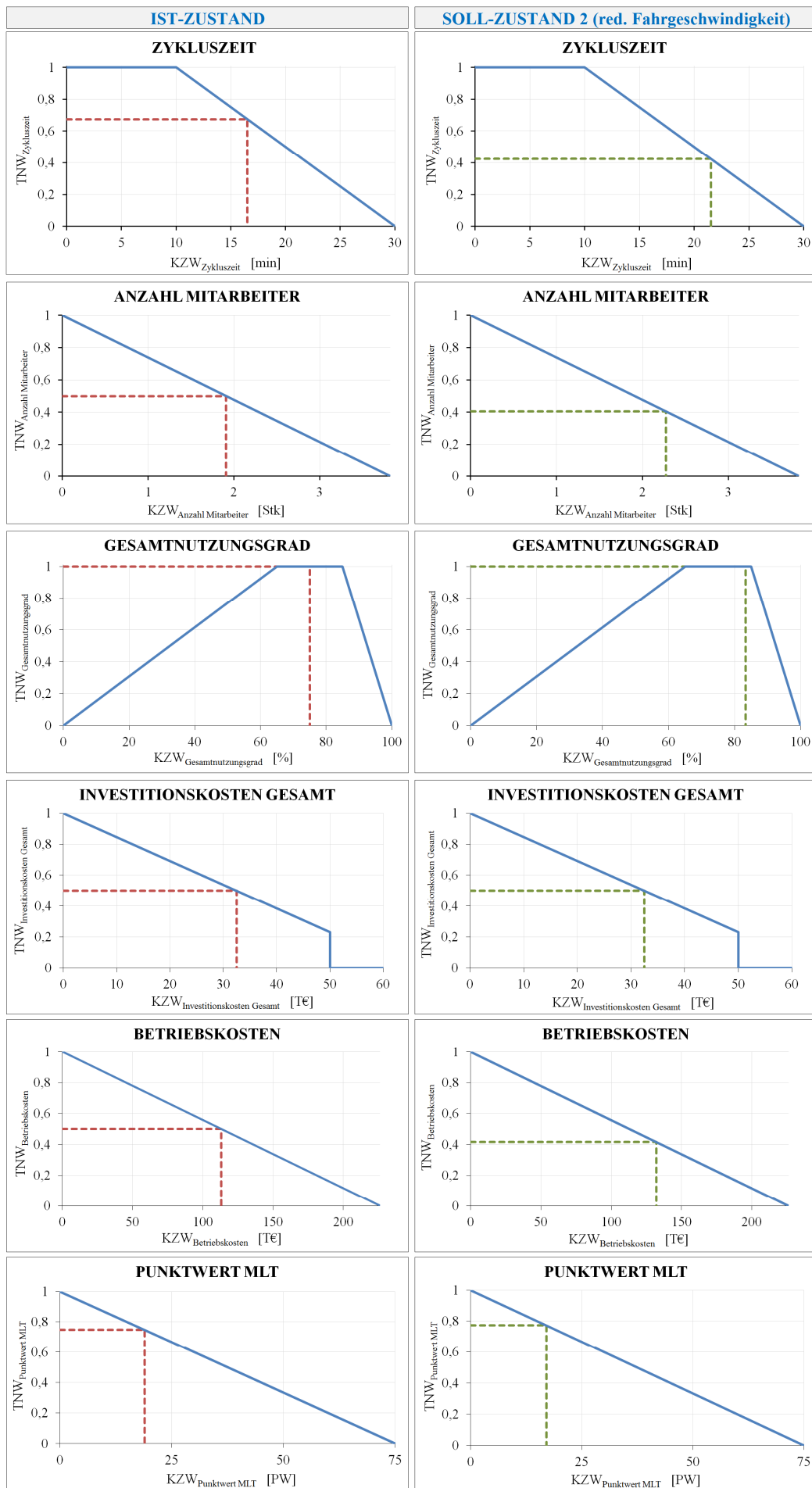
C.6 Bewertungsergebnisse Soll-Zustände

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	44.500
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	500
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	29.000
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	2.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	1,1
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	65,2
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	22,5
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	2,2
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	4,5
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	4,5
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	104.758
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	1.335
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	6.225
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	4.575
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	2.213
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	84.410
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	1,3
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	5,9
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	4,4
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	1,0
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	2,9
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	1,9
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	2,1
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	80,6
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	18.135
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	86.623
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	17,3
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	82,7
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	2,87
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	154,26
Q-S-2	Unfallschwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	20
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	54,9
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	54,9
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	5,0
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	30,0

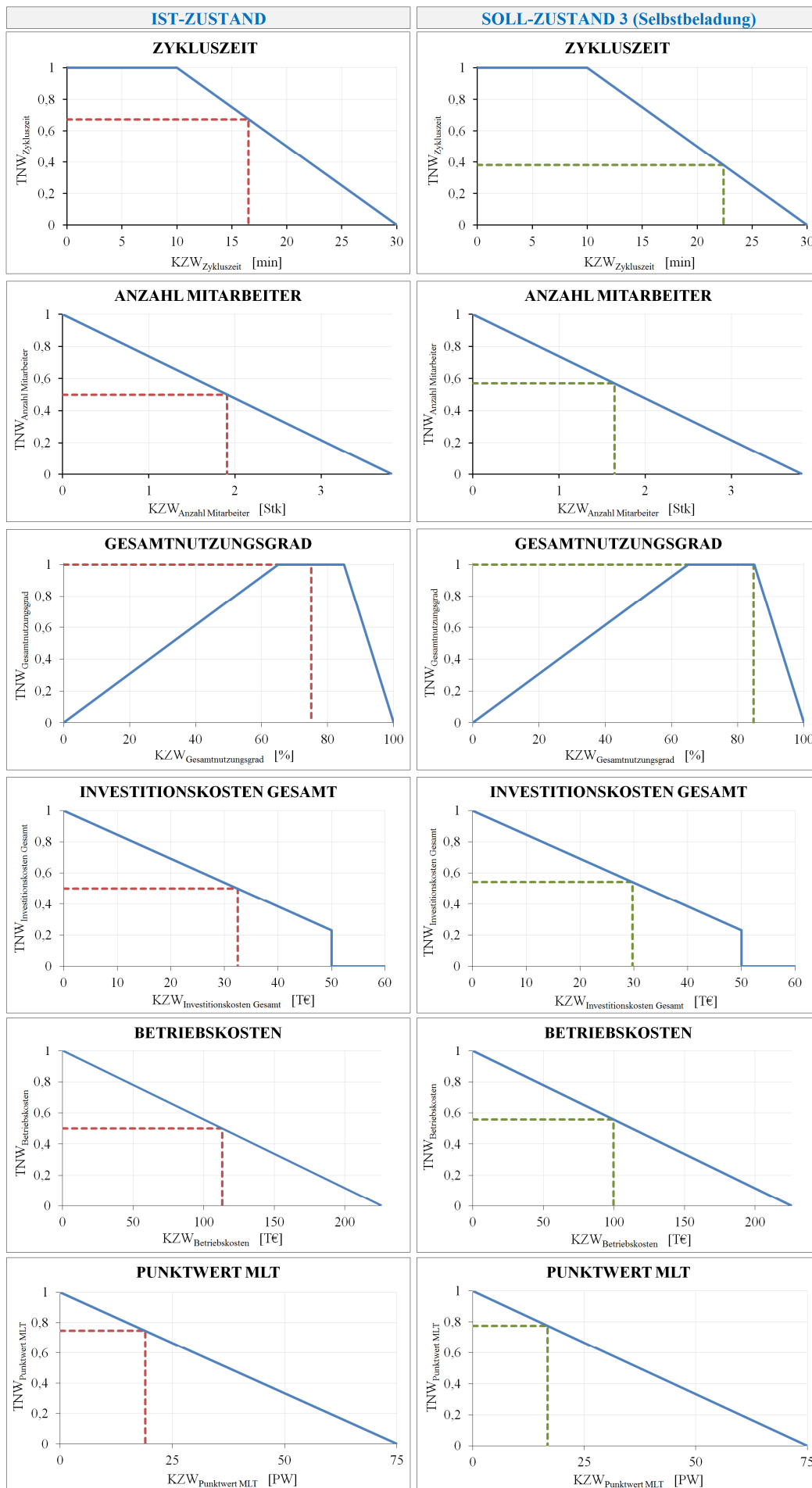
C.7 Optimierungsergebnis: 1. Stufe



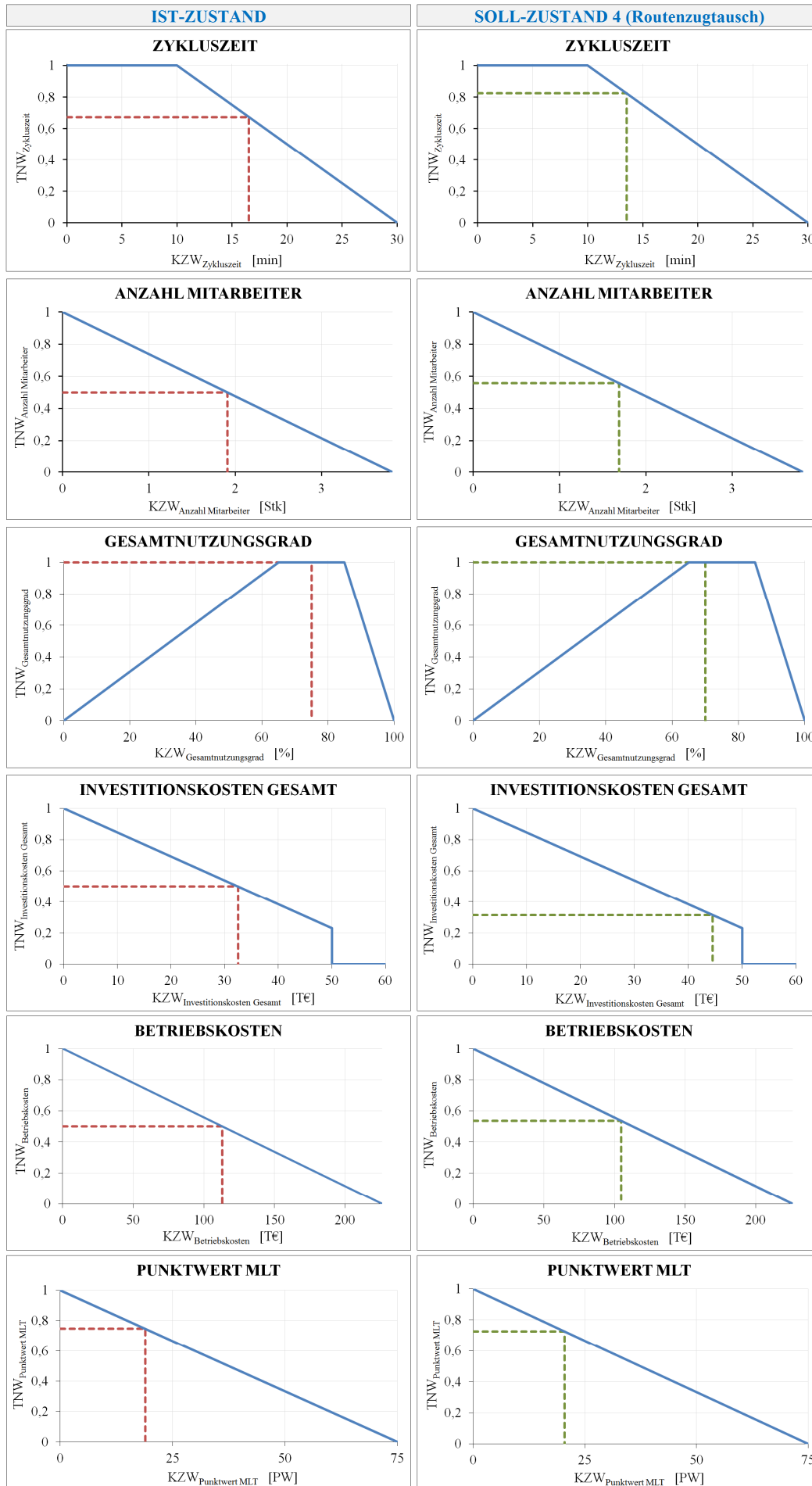
C.7 Optimierungsergebnis: 1. Stufe



Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel



C.7 Optimierungsergebnis: 1. Stufe



Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Kennzahl	Einheit	g _K	IST-ZUSTAND			SOLL-ZUSTAND 1 (red. Tourenstartabstand)		
			KZW _{K,Ist}	TNW _{K,Ist}	g _K × TNW _{K,Ist}	KZW _{K,Soll 1}	TNW _{K,Soll 1}	g _K × TNW _{K,Soll 1}
Zykluszeit	[min]	0,10	16,5	0,67	0,07	13,9	0,80	0,08
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,91	0,50	0,05	2,74	0,28	0,03
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	75,0	1,00	0,04	70,2	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	32.500	0,50	0,05	32.500	0,50	0,05
Betriebskosten	[€]	0,41	113.078	0,50	0,21	156.070	0,31	0,13
Punktwert MLT	[PW]	0,24	19	0,75	0,18	15	0,79	0,19

↓
GNW_{Ist} = 0,60

↓
GNW_{Soll 1} = 0,52

Kennzahl	Einheit	g _K	IST-ZUSTAND			SOLL-ZUSTAND 2 (red. Fahrgeschwindigkeit)		
			KZW _{K,Ist}	TNW _{K,Ist}	g _K × TNW _{K,Ist}	KZW _{K,Soll 2}	TNW _{K,Soll 2}	g _K × TNW _{K,Soll 2}
Zykluszeit	[min]	0,10	16,5	0,67	0,07	21,5	0,42	0,04
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,91	0,50	0,05	2,27	0,40	0,04
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	75,0	1,00	0,04	83,4	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	32.500	0,50	0,05	32.500	0,50	0,05
Betriebskosten	[€]	0,41	113.078	0,50	0,21	132.045	0,42	0,17
Punktwert MLT	[PW]	0,24	19	0,75	0,18	17	0,77	0,19

↓
GNW_{Ist} = 0,60

↓
GNW_{Soll 2} = 0,53

Kennzahl	Einheit	g _K	IST-ZUSTAND			SOLL-ZUSTAND 3 (Selbstbeladung)		
			KZW _{K,Ist}	TNW _{K,Ist}	g _K × TNW _{K,Ist}	KZW _{K,Soll 3}	TNW _{K,Soll 3}	g _K × TNW _{K,Soll 3}
Zykluszeit	[min]	0,10	16,5	0,67	0,07	22,4	0,38	0,04
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,91	0,50	0,05	1,64	0,57	0,06
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	75,0	1,00	0,04	84,8	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	32.500	0,50	0,05	29.750	0,54	0,06
Betriebskosten	[€]	0,41	113.078	0,50	0,21	99.724	0,56	0,23
Punktwert MLT	[PW]	0,24	19	0,75	0,18	17	0,78	0,19

↓
GNW_{Ist} = 0,60

↓
GNW_{Soll 3} = 0,61

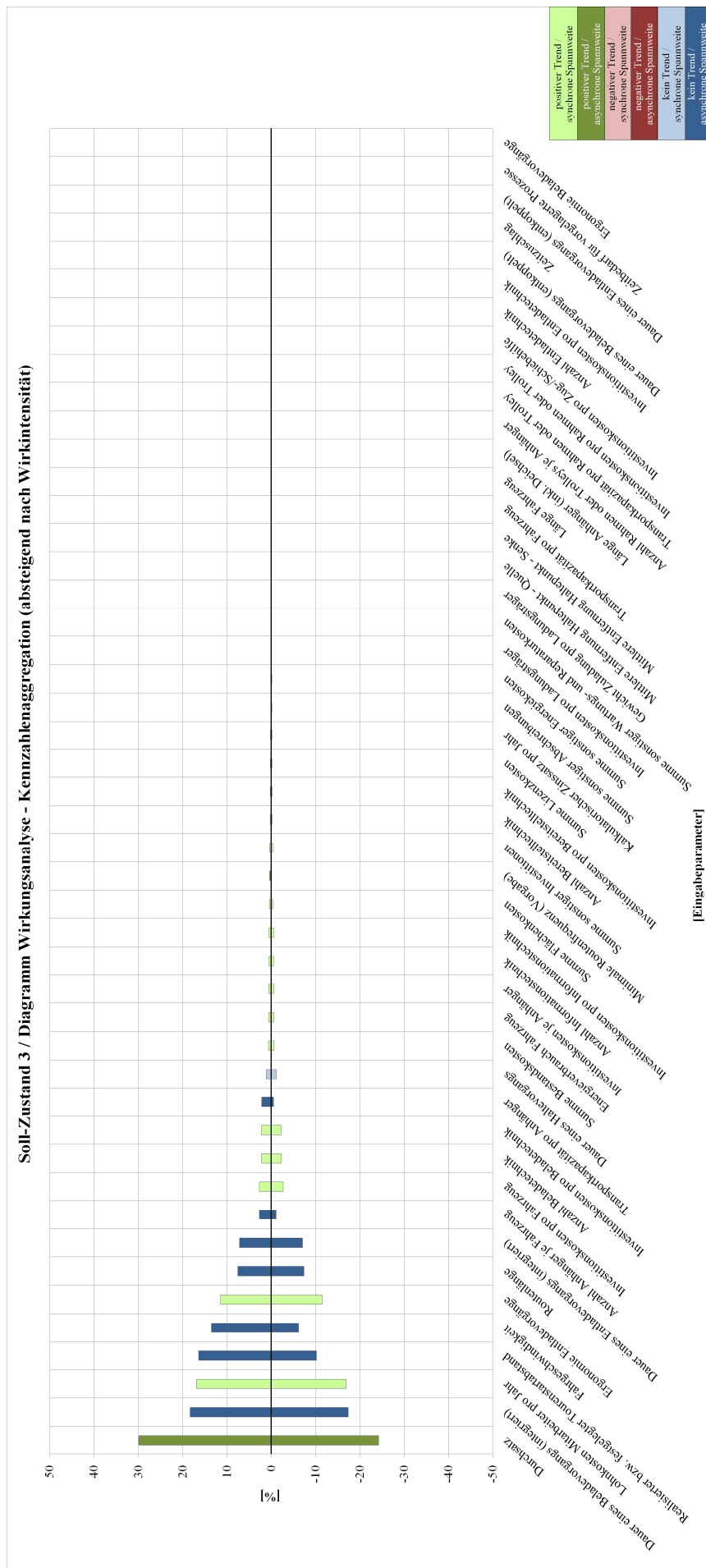
Kennzahl	Einheit	g _K	IST-ZUSTAND			SOLL-ZUSTAND 4 (Routenzugtausch)		
			KZW _{K,Ist}	TNW _{K,Ist}	g _K × TNW _{K,Ist}	KZW _{K,Soll 4}	TNW _{K,Soll 4}	g _K × TNW _{K,Soll 4}
Zykluszeit	[min]	0,10	16,5	0,67	0,07	13,5	0,82	0,09
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,91	0,50	0,05	1,69	0,56	0,06
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	75,0	1,00	0,04	70,0	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	32.500	0,50	0,05	44.500	0,32	0,03
Betriebskosten	[€]	0,41	113.078	0,50	0,21	104.758	0,54	0,22
Punktwert MLT	[PW]	0,24	19	0,75	0,18	20	0,73	0,18

↓
GNW_{Ist} = 0,60

↓
GNW_{Soll 4} = 0,61

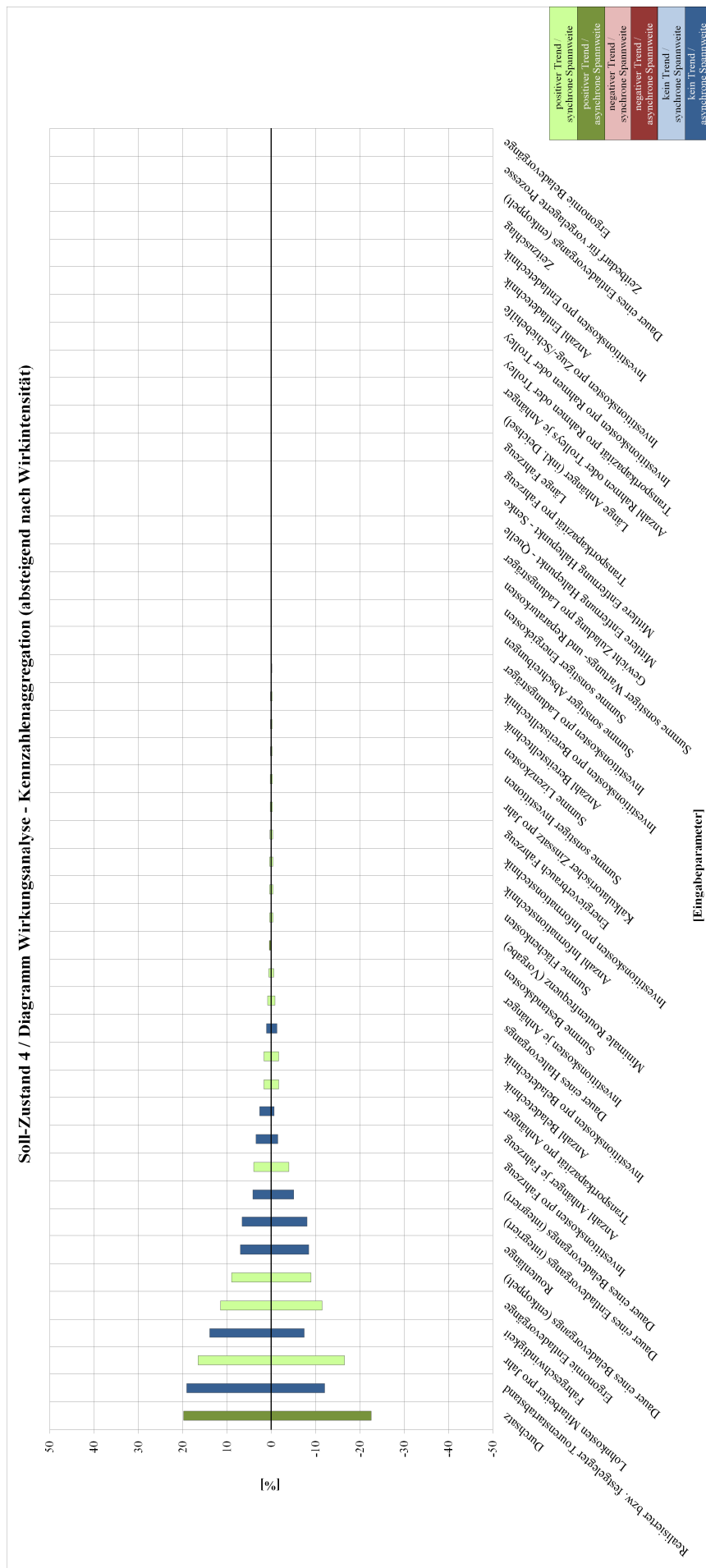
C.8 Analyseergebnis Soll-Zustand 3 (Selbstbeladung): Kennzahlenaggregation

Wirkintensität aggregiert [%]		Summe Gewichtung ($\Sigma g_K = 100\%$)			100%	
Nr.	Eingabeparameter	Min.	Max.	Absolut	Trend	Spannweite
6	Durchsatz	-24,2	29,9	29,9	positiv	asynchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-17,3	18,4	18,4	kein	asynchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-16,9	16,9	16,9	positiv	synchron
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-10,2	16,4	16,4	kein	asynchron
10	Fahrgeschwindigkeit	-6,1	13,5	13,5	kein	asynchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	-11,5	11,5	11,5	positiv	synchron
5	Routenlänge	-7,4	7,6	7,6	kein	asynchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-7,0	7,2	7,2	kein	asynchron
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-1,1	2,7	2,7	kein	asynchron
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	-2,7	2,7	2,7	positiv	synchron
21	Anzahl Beladetechnik	-2,3	2,3	2,3	positiv	synchron
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	-2,3	2,3	2,3	positiv	synchron
15	Transportkapazität pro Anhänger	-0,5	2,2	2,2	kein	asynchron
33	Dauer eines Haltevorgangs	-1,1	1,2	1,2	kein	synchron
43	Summe Bestandskosten	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
12	Energieverbrauch Fahrzeug	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
16	Investitionskosten je Anhänger	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
27	Anzahl Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
44	Summe Flächenkosten	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,4	0,4	positiv	asynchron
39	Summe sonstiger Investitionen	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
25	Anzahl Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
42	Summe Lizenzkosten	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
40	Summe sonstiger Abschreibungen	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
45	Summe sonstiger Energiekosten	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,0	0,0	0,0	positiv	synchron
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
23	Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
32	Zeitzuschlag	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
46	Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	0,0	kein	synchron



C.9 Analyseergebnis Soll-Zustand 4 (Routenzugtausch): Kennzahlenaggregation

Wirkintensität aggregiert [%]		Summe Gewichtung ($\Sigma g_K = 100\%$)			100%	
Nr.	Eingabeparameter	Min.	Max.	Absolut	Trend	Spannweite
6	Durchsatz	-22,6	19,8	22,6	positiv	asynchron
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-12,1	19,1	19,1	kein	asynchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-16,6	16,6	16,6	positiv	synchron
10	Fahrgeschwindigkeit	-7,4	13,9	13,9	kein	asynchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	-11,5	11,5	11,5	positiv	synchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	-9,0	9,0	9,0	positiv	synchron
5	Routenlänge	-8,5	7,0	8,5	kein	asynchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-8,1	6,6	8,1	kein	asynchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-5,1	4,2	5,1	kein	asynchron
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	-4,0	4,0	4,0	positiv	synchron
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-1,5	3,5	3,5	kein	asynchron
15	Transportkapazität pro Anhänger	-0,7	2,6	2,6	kein	asynchron
21	Anzahl Beladetechnik	-1,7	1,7	1,7	positiv	synchron
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	-1,7	1,7	1,7	positiv	synchron
33	Dauer eines Haltevorgangs	-1,3	1,1	1,3	kein	asynchron
16	Investitionskosten je Anhänger	-0,8	0,8	0,8	positiv	synchron
43	Summe Bestandskosten	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,5	0,5	positiv	asynchron
44	Summe Flächenkosten	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
27	Anzahl Informationstechnik	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
12	Energieverbrauch Fahrzeug	-0,3	0,3	0,3	positiv	synchron
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,3	0,3	0,3	positiv	synchron
39	Summe sonstiger Investitionen	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
42	Summe Lizenzkosten	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
25	Anzahl Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
40	Summe sonstiger Abschreibungen	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
45	Summe sonstiger Energiekosten	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,0	0,0	0,0	positiv	synchron
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
23	Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
32	Zeitzuschlag	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
46	Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	0,0	kein	synchron



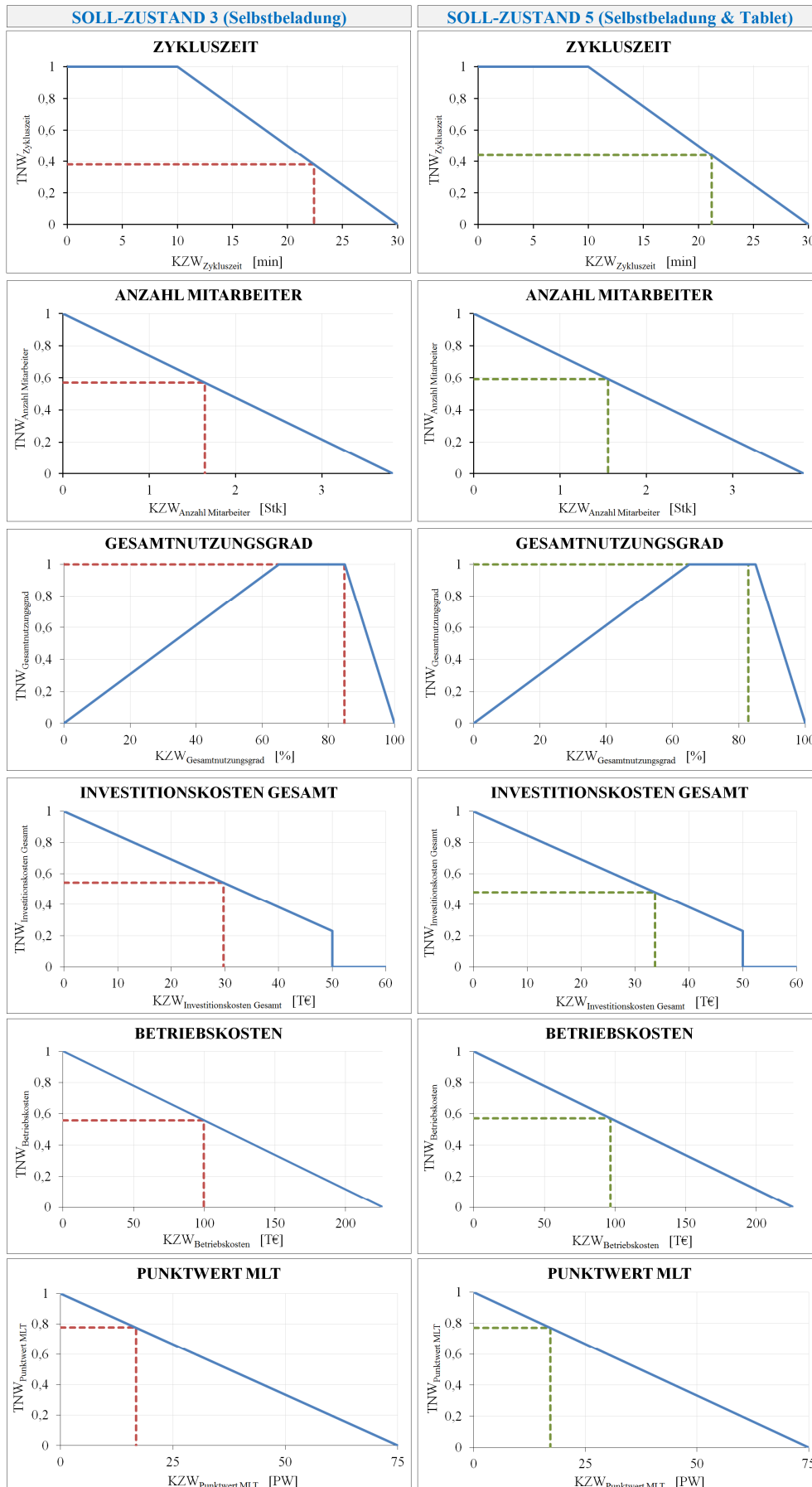
C.10 Bewertungsergebnis Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet)

Abk.	Bezeichnung	Einheit	Wert
Strukturkennzahlen			
S-1	Anzahl der Routen	[Stk]	1
S-2	Anzahl der Bereitstellorte (Quelle)	[Stk]	1
S-3	Anzahl der Bereitstellorte (Senke)	[Stk]	10
S-4	Anzahl der Haltepunkte (Quelle und Senke)	[Stk]	7
S-5	Routenlänge	[m]	500
Logistikleistungskennzahlen			
L-Z-1	Maximal möglicher Tourenstartabstand	[min]	31,6
L-Z-2	Mindestens erforderlicher Tourenstartabstand	[min]	16,0
L-Z-3	Tatsächlicher Tourenstartabstand	[min]	30,0
L-Z-4	Zykluszeit	[min]	21,2
L-Z-5	Wartezeit	[min]	8,8
L-Z-6	Anteil Zykluszeit	[%]	70,7
L-Z-7	Anteil Wartezeit	[%]	29,3
L-Z-8	Beladezeit	[min]	10,7
L-Z-9	Fahrzeit	[min]	5,0
L-Z-10	Haltepunktzeit	[min]	0,8
L-Z-11	Entladezeit	[min]	4,8
L-Z-12	Anteil Beladezeit	[%]	50,4
L-Z-13	Anteil Fahrzeit	[%]	23,6
L-Z-14	Anteil Haltepunktzeit	[%]	3,6
L-Z-15	Anteil Entladezeit	[%]	22,4
L-Z-16	Zeitlicher Nutzungsgrad Routenzug	[%]	70,7
L-Z-17	Zeitlicher Nutzungsgrad Mitarbeiter	[%]	70,7
L-Z-18	Minimale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-Z-19	Maximale Wiederbeschaffungszeit	[min]	30
L-R-1	Anzahl Ladungsträger	[Stk]	5
L-R-2a	Anzahl Routenzüge (exakt)	[Stk]	0,71
L-R-2b	Anzahl Routenzüge (gerundet)	[Stk]	1
L-R-2c	Anzahl Routenzüge (tatsächlich)	[Stk]	1
L-R-2d	Anzahl Anhänger	[Stk]	5
L-R-2e	Anzahl Trolleys/Rahmen	[Stk]	-
L-R-3	Anzahl Be- und Entladetechnik	[Stk]	1
L-R-4	Anzahl Bereitstelltechnik	[Stk]	10
L-R-5	Anzahl Informationstechnik	[Stk]	1
L-R-6	Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	1,56
L-R-7	Automatisierungsgrad	[%]	-
L-R-8	Verfügbarkeit	[%]	99,5
L-R-9	Routenzugkapazität	[LT]	5
L-R-10	Mittlere Beladung Routenzug pro Tour	[LT]	4,75
L-R-11	Kapazitiver Nutzungsgrad Routenzug	[%]	95,0
L-R-12	Mittlere Pufferkapazität je Bereitstellort	[LT]	3,0
L-R-13	Mittlere Belegung je Puffer	[LT]	1,5
L-R-14	Kapazitiver Nutzungsgrad Puffer	[%]	50,0
L-M-1a	Durchsatz pro Stunde	[LT]	9,5
L-M-1b	Durchsatz pro Haltepunkt	[LT]	1,6
L-M-2	Länge Fahrweg pro Routenzug	[km/Tag]	16,0
L-M-3	Länge Fahrweg pro Tag	[km/Tag]	16,0
L-M-4	Länge Gehweg pro Mitarbeiter	[km/Schicht]	2,0
L-M-5a	Anzahl Touren pro Stunde	[Stk]	2,0
L-M-5b	Anzahl Touren pro Schicht	[Stk]	16,0
L-M-5c	Anzahl Touren pro Tag	[Stk]	32,0
L-M-6	Anzahl Haltevorgänge pro Tour	[Stk/Tour]	4,6
L-M-7	Verkehrsdichte	[Stk/km]	0,1
L-M-8	Gesamtnutzungsgrad	[%]	82,8

Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Wirtschaftlichkeitskennzahlen			
W-I-1	Investitionskosten Gesamt	[€]	33.750
W-I-2	Investitionskosten Ladungsträger	[€]	250
W-I-3	Investitionskosten Transportmittel	[€]	14.500
W-I-4	Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[€]	10.000
W-I-5	Investitionskosten Bereitstelltechnik	[€]	1.000
W-I-6	Investitionskosten Informationstechnik	[€]	2.000
W-I-7	Sonstige Investitionskosten	[€]	6.000
W-I-8	Anteil Investitionskosten Ladungsträger	[%]	0,7
W-I-9	Anteil Investitionskosten Transportmittel	[%]	43,0
W-I-10	Anteil Investitionskosten Be- und Entladetechnik	[%]	29,6
W-I-11	Anteil Investitionskosten Bereitstelltechnik	[%]	3,0
W-I-12	Anteil Investitionskosten Informationstechnik	[%]	5,9
W-I-13	Anteil sonstige Investitionskosten	[%]	17,8
W-B-1	Betriebskosten	[€/Jahr]	96.739
W-B-2	Kapitalkosten	[€/Jahr]	1.013
W-B-3	Abschreibungen	[€/Jahr]	5.088
W-B-4	Wartungs- und Reparaturkosten	[€/Jahr]	3.688
W-B-5	Lizenzkosten	[€/Jahr]	1.000
W-B-6	Bestandskosten	[€/Jahr]	3.000
W-B-7	Flächenkosten	[€/Jahr]	2.000
W-B-8	Energiekosten	[€/Jahr]	3.188
W-B-9	Personalkosten	[€/Jahr]	77.764
W-B-10	Anteil Kapitalkosten	[%]	1,0
W-B-11	Anteil Abschreibungen	[%]	5,3
W-B-12	Anteil Wartungs- und Reparaturkosten	[%]	3,8
W-B-13	Anteil Lizenzkosten	[%]	1,0
W-B-14	Anteil Bestandskosten	[%]	3,1
W-B-15	Anteil Flächenkosten	[%]	2,1
W-B-16	Anteil Energiekosten	[%]	3,3
W-B-17	Anteil Personalkosten	[%]	80,4
W-B-18	Fixe Kosten	[€/Jahr]	15.788
W-B-19	Variable Kosten	[€/Jahr]	80.951
W-B-20	Anteil fixe Kosten	[%]	16,3
W-B-21	Anteil variable Kosten	[%]	83,7
W-B-22	Kosten pro Transporteinheit	[€/LT]	2,65
Qualitätskennzahlen			
Q-L-1	Liefertermintreue	[%]	96,8
Q-L-2	Lieferterminabweichung	[min/Stk]	0,18
Q-L-3	Liefermengentreue	[%]	99,9
Q-L-4	Liefermengenabweichung	[Stk]	0,00
Q-S-1	Unfallhäufigkeit (je 1 Mio. Arbeitsstunden)	[Stk]	167,44
Q-S-2	Unfall schwere	[Tage/Stk]	3,0
Q-E-1	Punktwert Multiple-Lasten-Tool	[PW]	17
Q-F-1	Zeitliche Flexibilität Routenzug	[%]	29,3
Q-F-2	Zeitliche Flexibilität Mitarbeiter	[%]	29,3
Q-F-3	Kapazitive Flexibilität Routenzug	[%]	5,0
Q-F-4	Gesamtflexibilität Routenzug	[%]	17,2

C.11 Optimierungsergebnis: 2. Stufe



Anhang C: Dokumentation Anwendungsbeispiel

Kennzahl	Einheit	g _K	SOLL-ZUSTAND 3 (Selbstbeladung)			SOLL-ZUSTAND 5 (Selbstbeladung & Tablet)		
			KZW _{K,Soll 3}	TNW _{K,Soll 3}	g _K x TNW _{K,Soll 3}	KZW _{K,Soll 5}	TNW _{K,Soll 5}	g _K x TNW _{K,Soll 5}
Zykluszeit	[min]	0,10	22,4	0,38	0,04	21,2	0,44	0,05
Anzahl Mitarbeiter	[Stk]	0,10	1,64	0,57	0,06	1,56	0,59	0,06
Gesamtnutzungsgrad	[%]	0,04	84,8	1,00	0,04	82,8	1,00	0,04
Investitionskosten Gesamt	[€]	0,10	29.750	0,54	0,06	33.750	0,48	0,05
Betriebskosten	[€]	0,41	99.724	0,56	0,23	96.739	0,57	0,24
Punktwert MLT	[PW]	0,24	17	0,78	0,19	17	0,77	0,19

\downarrow

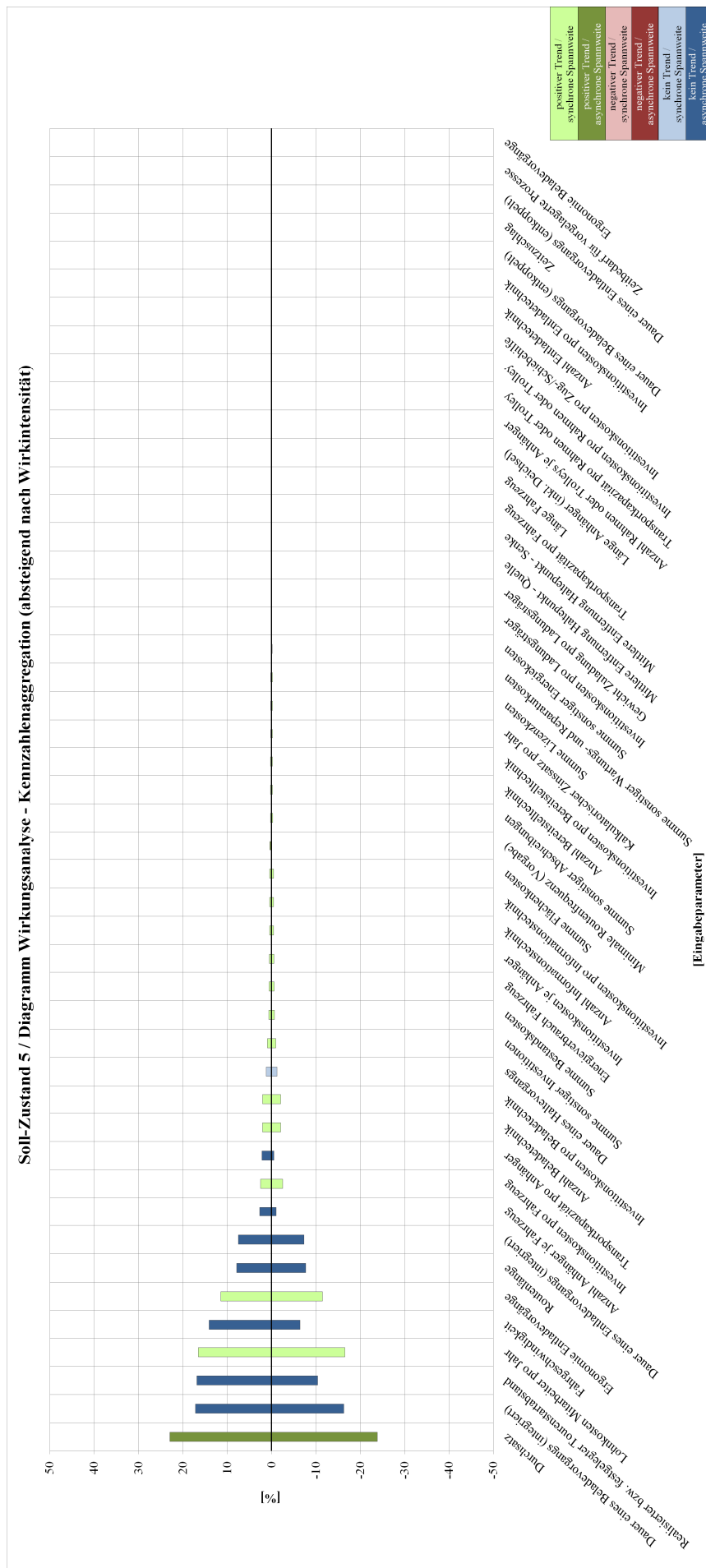
GNW_{Soll 3} = 0,61

\downarrow

GNW_{Soll 5} = 0,62

C.12 Analyseergebnis Soll-Zustand 5 (Selbstbeladung & Tablet): Kennzahlenaggregation

Wirkintensität aggregiert [%]		Summe Gewichtung ($\Sigma g_K = 100\%$)			100%	
Nr.	Eingabeparameter	Min.	Max.	Absolut	Trend	Spannweite
6	Durchsatz	-23,9	22,9	23,9	positiv	asynchron
30	Dauer eines Beladevorgangs (integriert)	-16,3	17,2	17,2	kein	asynchron
36	Realisierter bzw. festgelegter Tourenstartabstand	-10,4	16,8	16,8	kein	asynchron
29	Lohnkosten Mitarbeiter pro Jahr	-16,5	16,5	16,5	positiv	synchron
10	Fahrgeschwindigkeit	-6,4	14,1	14,1	kein	asynchron
47	Ergonomie Entladevorgänge	-11,5	11,5	11,5	positiv	synchron
5	Routenlänge	-7,7	7,9	7,9	kein	asynchron
34	Dauer eines Entladevorgangs (integriert)	-7,3	7,5	7,5	kein	asynchron
13	Anzahl Anhänger je Fahrzeug	-1,0	2,7	2,7	kein	asynchron
11	Investitionskosten pro Fahrzeug	-2,5	2,5	2,5	positiv	synchron
15	Transportkapazität pro Anhänger	-0,5	2,2	2,2	kein	asynchron
21	Anzahl Beladetechnik	-2,1	2,1	2,1	positiv	synchron
22	Investitionskosten pro Beladetechnik	-2,1	2,1	2,1	positiv	synchron
33	Dauer eines Haltevorgangs	-1,2	1,2	1,2	kein	synchron
39	Summe sonstiger Investitionen	-1,0	1,0	1,0	positiv	synchron
43	Summe Bestandskosten	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
12	Energieverbrauch Fahrzeug	-0,6	0,6	0,6	positiv	synchron
16	Investitionskosten je Anhänger	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
27	Anzahl Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
28	Investitionskosten pro Informationstechnik	-0,5	0,5	0,5	positiv	synchron
44	Summe Flächenkosten	-0,4	0,4	0,4	positiv	synchron
4	Minimale Routenfrequenz (Vorgabe)	0,0	0,4	0,4	positiv	asynchron
40	Summe sonstiger Abschreibungen	-0,3	0,3	0,3	positiv	synchron
25	Anzahl Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
26	Investitionskosten pro Bereitstelltechnik	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
38	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
42	Summe Lizenzkosten	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
41	Summe sonstiger Wartungs- und Reparaturkosten	-0,2	0,2	0,2	positiv	synchron
45	Summe sonstiger Energiekosten	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
7	Investitionskosten pro Ladungsträger	-0,1	0,1	0,1	positiv	synchron
1	Gewicht Zuladung pro Ladungsträger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
2	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Quelle	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
3	Mittlere Entfernung Haltepunkt - Senke	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
8	Transportkapazität pro Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
9	Länge Fahrzeug	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
14	Länge Anhänger (inkl. Deichsel)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
17	Anzahl Rahmen oder Trolleys je Anhänger	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
18	Transportkapazität pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
19	Investitionskosten pro Rahmen oder Trolley	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
20	Investitionskosten pro Zug-/Schiebehilfe	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
23	Anzahl Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
24	Investitionskosten pro Entladetechnik	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
31	Dauer eines Beladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
32	Zeitzuschlag	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
35	Dauer eines Entladevorgangs (entkoppelt)	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
37	Zeitbedarf für vorgelagerte Prozesse	0,0	0,0	0,0	kein	synchron
46	Ergonomie Beladevorgänge	0,0	0,0	0,0	kein	synchron



Datenanhang

Der in den Kapiteln 6 „Bewertungsmodell“, 7 „Analysemodell“, 8 „Optimierungsmodell“, 9 „Schlussbetrachtung“ sowie Anhang B „Dokumentation Excel-Tool“ verwiesene Datenanhang ist dem beigefügten Datenträger zu entnehmen.

Inhalt:

- 1_Routenzug-Tool Vorlage
- 2_Routenzug-Tool Beispiel
- 3_Nutzwerte Soll-Zustand 1
- 4_Nutzwerte Soll-Zustand 2
- 5_Nutzwerte Soll-Zustand 3
- 6_Nutzwerte Soll-Zustand 4
- 7_Nutzwerte Soll-Zustand 5