

---

# Analyse und Vermeidung von Stick-Slip- Ereignissen bei der Schraubmontage zur Steigerung der Prozess-Sicherheit

---

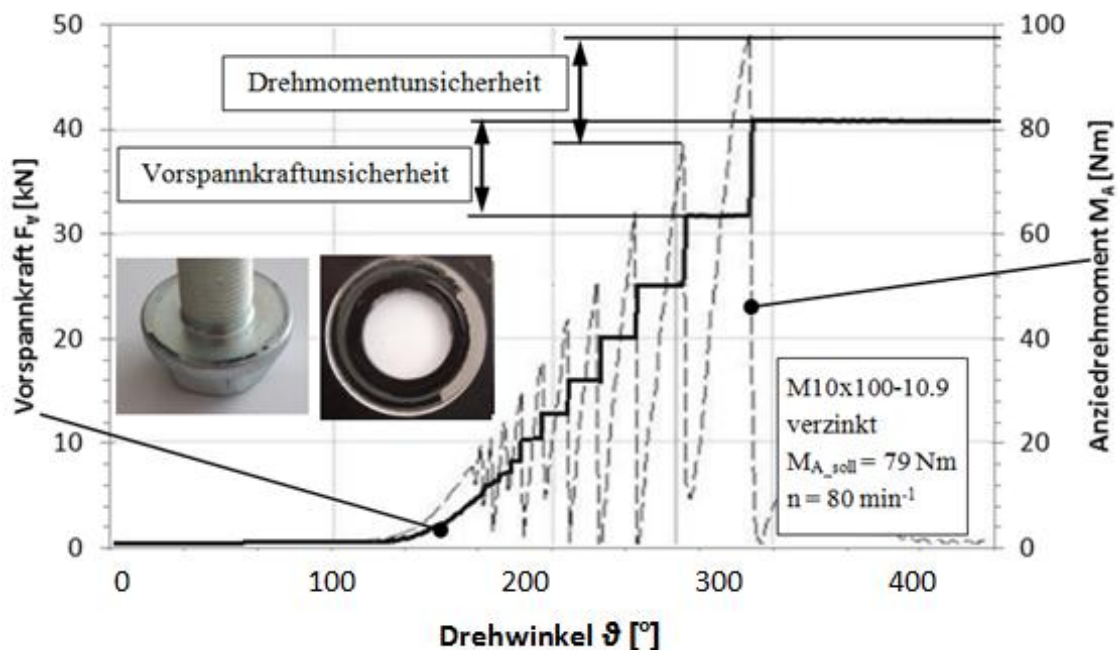
Dipl.-Ing. Tobias Hörnig



## 1. Problemstellung

Neue Oberflächenbeschichtungen (Umstellung auf Cr(VI)-frei) und immer kürzer werdende Montagezyklen mit steigenden Montagedrehzahlen führen zu einem gesteigerten Auftreten von Stick-Slip-Ereignissen (Ruck-Gleiten) bei der Schraubmontage. Bei gleichzeitig gestiegenen Prozessqualitätsanforderungen führen diese Prozessstörungen in der industriellen Schraubmontage mit deren hohen Vernetzungsgraden der Produktionsprozesse zu einem Produktionsausfall mit hohem wirtschaftlichen Schaden. Hiervon sind besonders mittelständische Unternehmen betroffen. Diese werden von den Anwendern in die Verantwortung und Haftung für die Schäden genommen, können jedoch nur mit begrenzten Möglichkeiten zur eigenständigen Erforschung des Problems beitragen.

Durch die Stick-Slip-Ereignisse während der Schraubmontage entstehen neben akustischen Störgeräuschen während des Montagevorganges zwei Unsicherheiten an den für eine Schraubenverbindung wichtigen Kenngrößen, **Abbildung 1**. Durch die Drehmomentschwankungen entsteht eine Drehmomentunsicherheit. Dies ist besonders für das drehmomentgesteuerte Montageverfahren eine enorme Prozessstörung, da das Anziehdrehmoment als Sollgröße vorgegeben wird. Die Steuerung des elektrischen Schraubgerätes kann bei eintretenden Drehmomentschwankungen die Sollgröße nicht korrekt erreichen. Gleichzeitig entsteht auch eine Vorspannkraftunsicherheit, welche noch kritischer zu bewerten ist, da eine zu niedrige Vorspannkraft in einer Schraubenverbindung zum sicherheitsrelevanten Risiko werden kann. Gleichzeitig entsteht eine versteckte Versagensgefahr für den Betrieb. Aus diesem Grund führen diese Unsicherheiten zu Stillstandzeiten und Nacharbeitskosten, wodurch hohe Kosten entstehen.

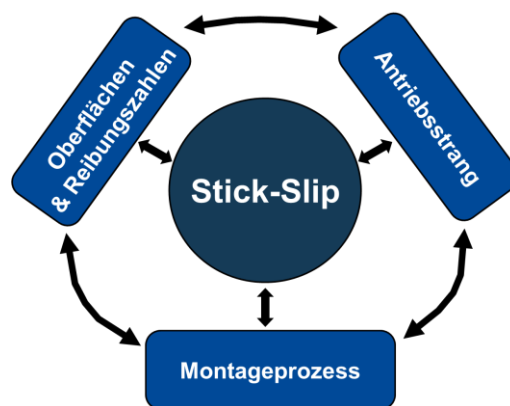


**Abbildung 1:** Drehmoment- und Vorspannkraftunsicherheit bei der Schraubmontage durch Stick-Slip-Ereignisse

## 2. Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, durch Interaktion von konstruktiver Gestaltung (Schraubsystem Schraube – Bauteil, Schraubersystem, Antriebsstrang), Werkstofftechnik (Grundwerkstoffe, Oberflächen, Beschichtungen) und der Montagetechnologie (Prozessparameter, Störgrößen) eine Vermeidung bzw. Eliminierung von Stick-Slip-Ereignissen bei der Schraubmontage zu bewirken, **Abbildung 2**. Hierzu müssen die Einzelzusammenhänge untersucht und die unterschiedlichen Einflussparameter bewertet werden. Dies bewirkt in der Praxis der Serienmontage bei allen, die damit zu tun haben, auch eine Objektivierung der Thematik, da Diskussionen oft von Unklarheiten bezüglich der wirkenden Mechanismen geprägt sind.

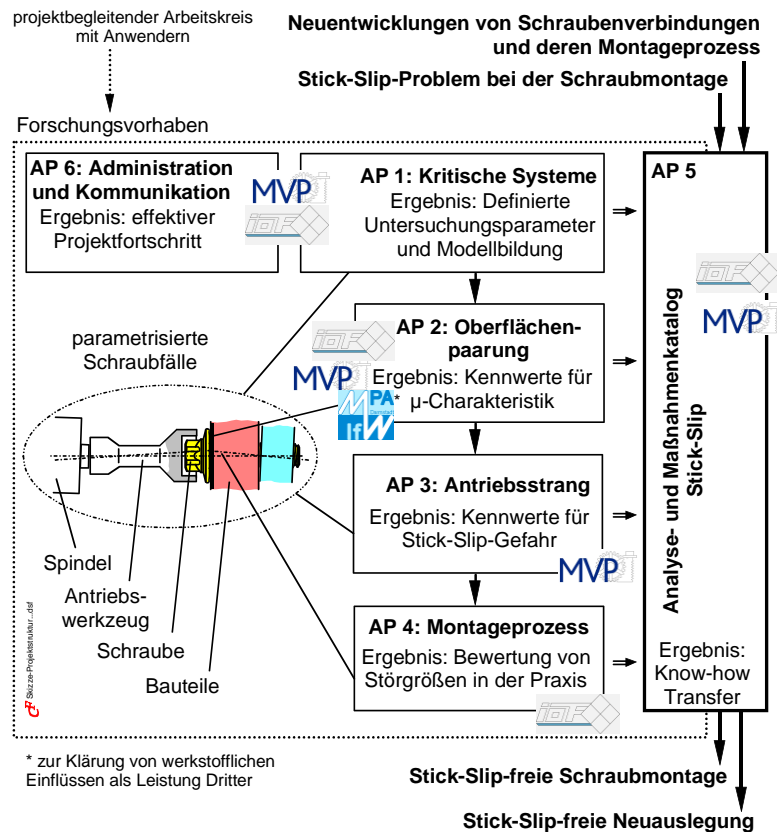
Aus den Ergebnissen der umfangreichen Untersuchungen und Auswertungen werden Kenngrößen definiert und abgeleitet, um Stick-Slip-Ereignisse qualitativ und quantitativ beschreiben zu können. Darüber hinaus sollen durch begleitende numerische Berechnungen von Stick-Slip-Ereignissen die Einflussparameter in ihrer Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten bewertet werden. Mit den erzielten Forschungsergebnissen sollen zuverlässige Daten zur Verfügung gestellt werden, um Prozessstörungen durch Stick-Slip-Ereignisse bei der Schraubmontage besser verstehen zu können. Die Ergebnisse dienen einer zuverlässigen Abhilfe von Stick-Slip-Ereignissen sowie einer Vermeidung im Vorfeld bei der Auslegung des Schraubprozesses.



**Abbildung 2:** Einflussparameter auf das Stick-Slip-Verhalten bei der Schraubmontage

## 3. Vorgehensweise

Durch die systematische Gliederung der einzelnen Arbeitspakete kann eine effiziente Durchführung der Untersuchungen an den beiden Forschungsstellen Uni Siegen und TU Dresden mit Unterstützung des projektbegleitenden Arbeitskreises gewährleistet werden. Die einzelnen Arbeitspakete mit der jeweils dafür verantwortlichen Forschungsstelle und deren Interaktionen sind in **Abbildung 3** dargestellt.



**Abbildung 3:** Arbeitspakete (AP) im Forschungsvorhaben und Zusammenwirken der Forschungsstellen

Aufbauend auf Voruntersuchungen des Lehrstuhls MVP an der Universität Siegen wurden im Rahmen von Eingangsuntersuchungen die kritischen Systeme definiert, so dass die Parameter für die umfangreichen Reihenuntersuchungen mit der kombinatorischen Vielfalt des Systems aus konstruktiver Gestaltung, Werkstofftechnik und Montagetechnologie bekannt waren. Dazu begleitend wurden Untersuchungen zur Charakterisierung der Oberflächen und deren Verhalten bei der Montage durchgeführt, worunter auch die Bestimmung der Reibungszahlen fällt. Eine zusätzliche Betrachtung von industriellen Normen und Richtlinien für Montagevorschriften sowie die Untersuchung von ergänzenden Oberflächenschutzsystemen, welche gezielt herbeigeführte Fehler in der Beschichtung beinhalten, haben die experimentellen Untersuchungen ergänzt. Für die Untersuchungen kamen die in **Tabelle 1** genannten Schraubengrößen sowie Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz.

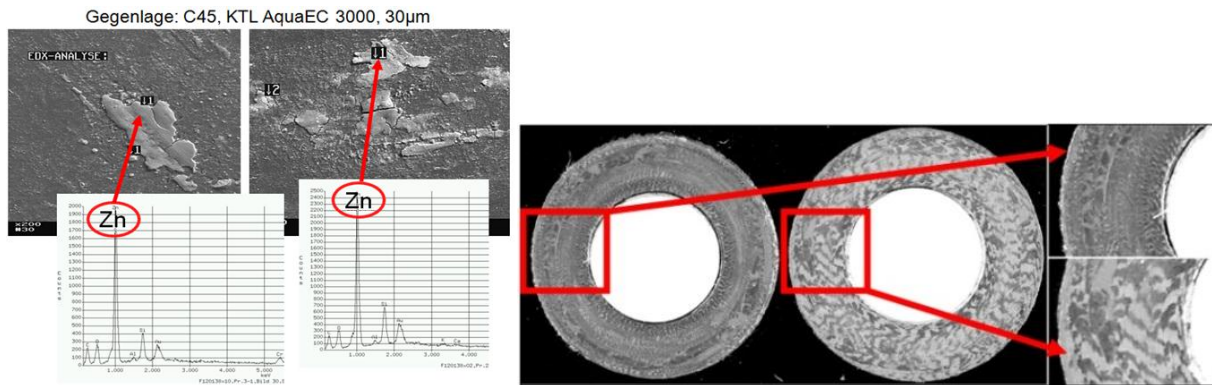
Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse in Form von Montagekurven wurden Kennwerte definiert, welche einen Schraubfall mit auftretendem Stick-Slip-Ereignis bewerten. Zur Visualisierung und der Analyse des Stick-Slip-Effektes bei der Schraubmontage wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt. Eine numerische Berechnung des Montageprozesses wurde eingesetzt und der Mechanismus des Ruck-Gleitens abgebildet. Die Ergebnisse sämtlicher Untersuchungen werden in Form von Abhilfemaßnahmen, einer Prüfmethodik und Auslegungsregeln für den Anwender zusammengeführt.

**Tabelle 1:** Übersicht über die Versuchsteile

Schraubendimensionen	Festigkeitsklasse	
M6x60	10.9	
M10x100	10.9	
M16x1,5x80	10.9	
M24x125	10.9	
Oberflächenvarianten		
ZnFI1	Zinklamellenbeschichtung mit anorganischem Topcoat	
ZnFI2	Zinklamellenbeschichtung mit anorganischem Topcoat	
ZnFI3	Zinklamellenbeschichtung mit anorganischem Topcoat	
Zn	galvanisch verzinkt ohne Gleitzusatz	
ZnNi	galvanisch Zink-Nickel mit Gleitzusatz	
ZnFI2+T	entspricht ZnFI2 mit zus. Einbrenntemperatur 1h bei 250°C	
ZnFI4	Zinklamellenbeschichtung ohne Topcoat	
ZnFI5	Zinklamellenbeschichtung mit anorganischem Topcoat	
Zn2	galvanisch verzinkt mit Gleitzusatz	
ZnNi2	galvanisch Zink-Nickel ohne Gleitzusatz	
tZn	feuerverzinkt (nur M24x125)	
Muttern	Festigkeitsklasse	Oberfläche
M6, M10, M16x1,5	10	Zn
M24	10	tZn

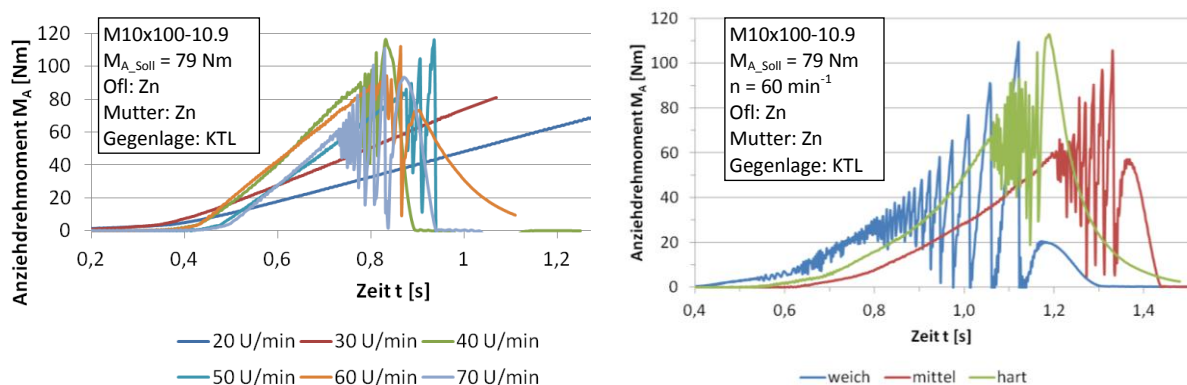
#### 4. Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen der im Untersuchungsumfang befindlichen Prüfteile haben als Ergebnis gezeigt, dass die Stick-Slip-Ereignisse bei der Schraubmontage durch einen Haft-Gleit-Vorgang maßgeblich in der Kopfauflagefläche entstehen. Durch Oberflächeninstabilitäten, welche zu einem Kurzzeitstoffschluss der Oberflächen führen und einen Werkstoffübertrag auf beide Seiten der Reibungspartner hervorrufen, **Abbildung 4** links, entsteht ein Haftvorgang, welcher eine Torsion des Antriebsstrangs hervorruft. Beim Übersteigen der Adhäsionskraft in der Oberflächenpaarung von Schraubenbeschichtung und KTL-Gegenlage wird die im Antriebsstrang befindliche Torsionsfederenergie freigesetzt und der Schraubenkopf erfährt schlagartig eine rotatorische Bewegung. Eine schnelle Abfolge dieses Vorgangs wird als sogenanntes Stick-Slip-Ereignis bei der Schraubmontage beschrieben. Je nach Steifigkeit des Antriebsstranges bilden sich unterschiedlich große Verdrehwinkel im verspannten Antriebsstrang aus, welche beim Gleitvorgang unterschiedlich große Gleitwinkel hervorrufen und die Oberflächenbeschichtung schädigen, **Abbildung 4** rechts.



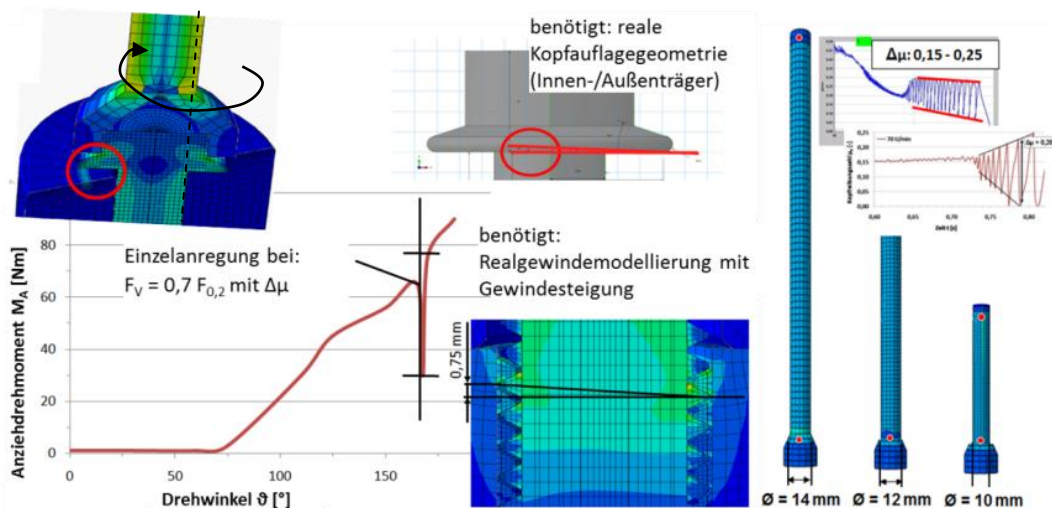
**Abbildung 4:** links: Werkstoffübertrag der Schraubenbeschichtung (verzinkt) auf die KTL-beschichtete Gegenlage, Nachweis mit EDX-Methode; rechts: Beschädigung der KTL-beschichteten Gegenlage bei Stick-Slip-Ereignissen (Kontrast modifiziert), sichtbar ist die unterschiedliche Wellenform des Abriebs, der durch verschiedene Abgleitwinkel  $\varphi$  bei unterschiedlichen Antriebsstrangsteifigkeiten hervorgerufen wird

Auf Grundlage der kombinatorischen Vielfalt des Systems aus konstruktiver Gestaltung, Werkstofftechnik und Montagetechnologie wurden Parameterstudien bezüglich der für Stick-Slip-Ereignisse bei der Schraubmontage durchgeführt, was zu drei Haupteinflussparametern geführt hat (Antriebsstrangsteifigkeit, Montagedrehzahl und Oberflächen/Reibungszahlen). In **Abbildung 5** sind exemplarisch für die Variation der Einflussparameter der Drehzahl (links) und der Antriebsstrangsteifigkeit (rechts) die Ergebnisse der resultierenden Drehmoment-Montagekurven gezeigt (die vorliegenden Systemkonfigurationen sind aus den Diagrammen zu entnehmen).



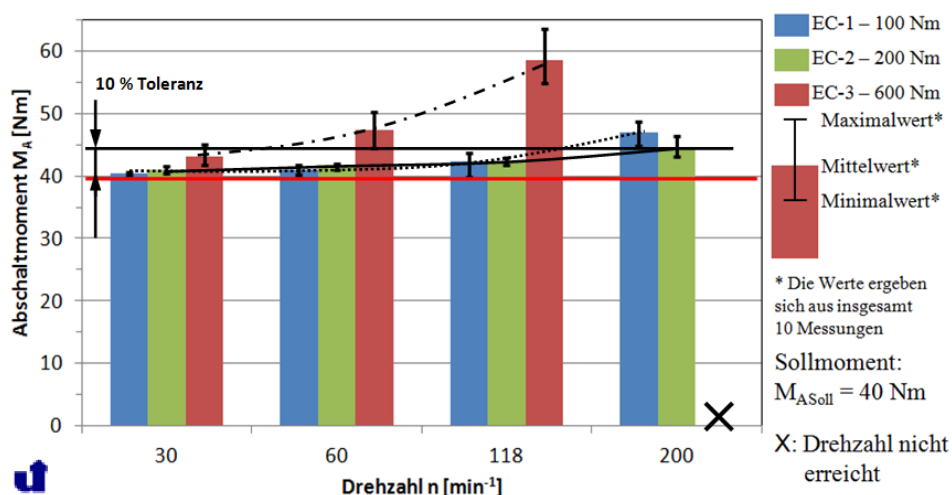
**Abbildung 5:** Einfluss der Drehzahl (links) und der Antriebsstranglänge (rechts) auf das Stick-Slip-Verhalten (die Systemkonfigurationen sind aus den Diagrammen zu entnehmen)

Der Montageprozess wurde simulativ im Rahmen einer numerischen Berechnung als 3D-Modell abgebildet. Dieses Modell beinhaltet eine reale Geometrieabbildung der Schraube (einschließlich Kopfaufschlagwinkel, Gewindesteigung), **Abbildung 6**. Über einen parametrisierten Antriebsstrang (Durchmesser  $d_v$  und Länge  $l_v$ ) wird das Anziehdrehmoment  $M_A$  in den Schraubenkopf eingeleitet. Die Montage wird durch eine rotatorische Bewegung des Antriebsstrangs simuliert. Die bereits erwähnten Einflussparameter auf Stick-Slip-Ereignisse können variiert werden, so dass virtuelle Untersuchungen möglich sind. Über eine Einzelanregung mit definierbarer Reibungszahländerung ( $\Delta\mu$ ) wird das Haft-Gleitverhalten abgebildet.



**Abbildung 6:** Darstellung der Komponenten des FE-Modells für den virtuellen Montageprozess; Verwendung realer geometrischer Verhältnisse (Kopfauflage, Gewindesteigung); Einzelanregung; Reibwertschwankung  $\Delta\mu$ ; Antriebsstrangvariationen ( $d_v$ ,  $l_v$ )

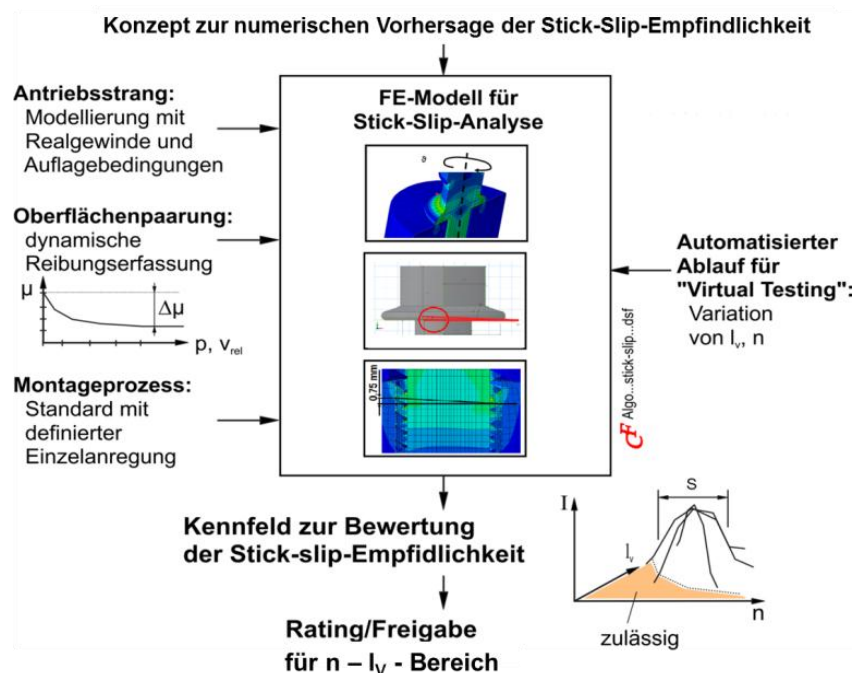
Weitergehend wurden die technischen Anforderungen geprüft, welche man für eine Untersuchung von einer automatisierten Schraubmontage mit Stick-Slip-Ereignissen benötigt. Bei der automatisierten Schraubmontage ist die Genauigkeit der verwendeten Montagewerkzeuge von großer Bedeutung. Eine Untersuchung zu der Abschaltgenauigkeit verschiedener EC-Schraubspindeln ist in **Abbildung 7** dargestellt. Es ist wichtig, ein für den jeweils vorliegenden Montagefall geeignetes Montagewerkzeug zu wählen. Ein zu großes Nachlaufverhalten führt zum einen zu höheren Anziehdrehmomenten als gefordert ist; zum anderen verstärkt es auftretende Stick-Slip-Schwingungen, da die Regelung der Schraubersteuerung die Drehmomentpeaks nicht schnell genug erfassen und verarbeiten kann.



**Abbildung 7:** Abschaltgenauigkeit verschiedener EC-Schraubspindeln bei vorgegebenem Abschaltmoment  $M_{A\text{Soll}}$  und unterschiedlichen Drehzahlen  $n$

Die Bewertungskenngrößen für Stick-Slip-Ereignisse mit Abhilfemaßnahmen und Auslegungsregeln sind dem Abschlussbericht zu diesem Forschungsvorhaben zu entnehmen.

Als Ausblick wurde ein Algorithmus zur virtuellen Stick-Slip-Vorhersage entworfen, **Abbildung 8**, welcher zukünftig vertiefend untersucht werden sollte und als Anregung für ein nachfolgendes Forschungsvorhaben dient. Hiermit können beliebige System-Konstellationen untersucht werden und den Umfang der Prototypenfertigung verringern. Über einen automatisierten Ablauf von Rechenläufen mit Variation der Parameter kann anschließend ein Kennfeld zur Bewertung der Stick-Slip-Empfindlichkeit erstellt werden, welches anhand der definierten Kenngrößen Intensität und Schwingungsbreite ein Rating mit Freigabe für einen rechnerisch untersuchten Drehzahl-Antriebsstrangsteifigkeits-Bereich zulässt. Durch die virtuelle Testprozedur sind somit kürzere Produktentwicklungszeiten mit geringeren Entwicklungs-, Qualitäts- und Engineeringkosten realisierbar.



**Abbildung 8:** Algorithmus zur virtuellen Stick-Slip-Vorhersage

## 5. Praktischer Nutzen / Wirtschaftlichkeit

Die Untersuchungen dienen der besseren Handhabung von Prozessstörungen in der automatisierten Schraubmontage durch Stick-Slip-Erscheinungen. Die Untersuchungen geben erstmals mit den Untersuchungsergebnissen begründet Mechanismen und Parameter an, die Einflüsse auf das Systemverhalten haben. Durch die begleitenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Montageprozesses mit auftretenden Stick-Slip-Ereignissen sowie die FEM-Berechnungen werden die Zusammenhänge und Einflüsse für die Anwender auch visuell gut greifbar gemacht. Es werden einige Hilfestellungen zur Bewertung von Stick-Slip-Ereignissen bei der Schraubmontage durch Kennzahlen gegeben. Für den Anwender werden gezielte Maßnahmen zur Eliminierung von Stick-Slip-Ereignissen bei der Schraubmontage für bestehende Systeme einerseits und andererseits zur Vermeidung von Stick-Slip-Ereignissen bei der Systemauslegung im Vorfeld gegeben. Die Prozesssicherheit bei der



automatisierten Schraubmontage wird für den Anwender somit erhöht und die wirtschaftliche Effizienz des Montageprozesses gesteigert.

## 6. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 16790 BG der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden. Das Projekt wurde vom Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung des Deutschen Schraubenverbandes e.V. (DSV) und den im projektbegleitenden Arbeitskreis vertretenen Mitgliedsfirmen unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Stefan Beyer (DSV) betreut, wofür ebenfalls herzlich gedankt wird. Weiterer Dank geht an die Firmen KAMAX Holding GmbH & Co KG, Wilhelm Schumacher GmbH, Dörken MKS-Systeme GmbH & Co. KG und Nedschroef Plettenberg GmbH für die Bereitstellung des Versuchsmaterials.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages