

# ***Verbrennungstechnik I***

***Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger***

***SoSe 2024***

**Vorlesung:**

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger**

**Tel.: 0271 740-3124**

**E-Mail: [thomas.seeger@uni-siegen.de](mailto:thomas.seeger@uni-siegen.de)**

**Übungen:**

**Jonas Hölzer, M.Sc.**

**Tel.: 0271 740-2880**

**E-Mail: [jonas.hoelzer@uni-siegen.de](mailto:jonas.hoelzer@uni-siegen.de)**

## Allgemeine Lehrbücher Deutsch:

Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. "Verbrennung", 3. Auflage, Springer, 2001  
(Schwerpunkte: Grundprozesse, Kinetik, Modellierung; wenig Technik, ca. 39 €)  
auch englische Ausgabe: "Combustion", 4th Edition, Springer 2006, ca. 54 €

Joos, F. "Technische Verbrennung", Springer 2006  
(Schwerpunkte: breite Sammlung (meist aus den anderen Büchern), Grundlagen, Vertiefungen und aktuelle Themen; aber sehr teuer ca. 180 €) (\*)

Günther, R. "Verbrennung und Feuerungen", Springer 1974  
(Schwerpunkte: Technische Aspekte, Viele Brennerformen, Theorie tw. etwas veraltet, ca. 45 €)

Görner, K. "Technische Verbrennungssysteme", Springer 1991  
(Schwerpunkte: Grundlagen, Simulation, Kohleverbrennung, ca. 65 €)

(\*) als Springer eBook kann das pdf-Dokument geladen werden:

<http://www.springerlink.de/home/main.mpx>

## Allgemeine Lehrbücher Englisch:

Turns, S. R. "An Introduction to Combustion: Concepts and Application", McGraw-Hills, 2nd Ed. 2000  
(Schwerpunkte: Gute Mischung aus Konzepten und Anwendungen, empfehlenswert,  
2. Auflage ca. 73 € mit CD)

Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. "Combustion", 4th Edition, Springer 2006  
(Schwerpunkte: Grundprozesse, Kinetik, Modellierung; wenig Technik, ca. 59 €)

Kuo, K. "Principles of Combustion", 2nd Ed., J. Wiley 2005  
(ausführliche Grundlagen, theorieorientiert, Neuauflage soll gut sein)

Lewis, v. Elbe "Combustion, Flames and Explosions of Gases", 3. Auflage 1986, Academic Press  
(ein "Klassiker")

Glassman, I., "Combustion", 3rd Ed., Academic Press, Orlando 1996.

Chomiak, J., "Combustion: A Study in Theory, Fact and Application", Abacus Press - Gordon and Breach Science, New York 1990.

Williams, F.A., Combustion Theory, Second Edition, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1985)  
*(Anspruchsvolles älteres Lehrbuch)*

## Bücher mit Schwerpunkten Turbulente Verbrennung / Numerische Berechnungsmethoden:

Peters, N. "Turbulent Combustion", Cambridge Univ. Press, 2000

*(gute Einführung in turbulente Verbrennung, später tw. spezieller Schwerpunkt, 83 €)*

Poinsot, T., Veynante, D., "Theoretical and Numerical Combustion", 2nd Ed., Edwards, 2005

*(sehr gute Einführung in numerische Methoden der Verbrennung, 93 €)*

Libby, P.A., Williams, F.A. (Eds.), "Turbulent Reacting Flows", 44, Springer, Berlin (1980).

*(Übersichtsartikel verschiedener Autoren).*

Libby, P.A., Williams, F.A. (Eds.), "Turbulent Reacting Flows", Academic Press, London (1994).

*(Übersichtsartikel verschiedener Autoren, aufbauend auf dem gleichnamigen Buch von 1980).*

## Bücher mit Technischen Schwerpunkten:

### Motorische Verbrennung:

Merker, G. P., Schwarz, C., Stiesch, G., Otto, F., "Verbrennungsmotoren, Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung", 2. Auflage, Teubner 2004  
(Schwerpunkte: Motorische Verbrennungsprozesse, Simulation, ca. 40 €)

Heywood, J. B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988  
(Motorische Verbrennungsprozesse, ausführliche Grundlagen, nicht ganz aktuell)

### Gasturbinen:

Lechner, C., Seume, J. (Hrsg.), "Stationäre Gasturbinen", Springer, 2003  
(Schwerpunkt Kraftwerks-Gasturbinen, verschiedene Aspekte von Grundlagen bis zu Einsatzhinweisen, ca. 1100 Seiten, ca. 200 €)

Cohen, H., Rogers, G.F.C., Saravanamuttoo, H.I.H., "Gas Turbine Theory", Addison Wesley Longman, 4. edition 1996  
(Grundlagen Gasturbinen, Schwerpunkt eher bei Flugtriebwerken, ca. 440 Seiten)

## Industriefeuerungen:

- v. Starck, A., Mühlbauer, A., Kramer, C. (Hrsg.), "Praxishandbuch Thermoprozess-Technik, Band I und II", Vulkan-Verlag 2003  
*(Umfassende Darstellung der Thermoprosesstechnik mit einzelnen Kapiteln zu Brennersystemen)*
- Baukal, C. E. (Ed.) "The John Zink Combustion Handbook", CRC Press 2001  
*(Schwerpunkt Prozesstechnik, Petrochemie; farbenprächtiges schönes Buch, Praxisorientiert, Theorie tw. etwas vernachlässigt, Tabellen leider in englischen Einheiten, ca. 145 €)*

## Biomasse-Verbrennung:

- Hartmann, H. (Hrsg.), "Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen", Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, 2003  
*(Schönes Handbuch besonders zur Brennholz-Nutzung, 180 Seiten, auch elektronisch: [www.fnr.de](http://www.fnr.de), dort auch weitere Literatur )*
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (Hrsg.), "Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren", Springer, 2001  
*(Umfassendes Buch zur Biomasse-Nutzung, 770 Seiten, ca. 110 €)*
- Marutzky, R., Seeger, K., "Energie aus Holz und anderer Biomasse", DRW, Stuttgart, 1999  
*(Schwerpunkt energetische Holznutzung, 350 Seiten, ca. 65 €)*



## Daten:

- VDI-Wärmeatlas
- Baehr, "Thermodynamik", Springer (thermodynamisch relevante Daten im Anhang).
- Recknagel, Sprenger, Schramek, "Taschenbuch für Heizung + Klima Technik", Oldenbourg
- u. a.

## Zeitschriften:

- Combustion and Flame, Elsevier
- Combustion, Science and Technology, Gordon and Breach
- Progress in Energy and Combustion Science, Elsevier (*Übersichtsartikel*)
- Flow, Turbulence and Combustion, Kluwer
- Combustion Theory and Modelling, Institute of Physics
- Proc. of the Combustion Institute (Symposium (International) on Combustion)  
*(qualitativ hochwertige Veröffentlichungen, Bände 1 - 31)*
- Verbrennung und Feuerung - VDI Berichte der deutschen Flammentage, VDI
- u. a. Spezialzeitschriften z.B. zur Kraftwerkstechnik (BWK) oder Motortechnik (MTZ)

## INHALTE

### *Verbrennungstechnik I und II*

- 1. Erscheinungsbild von Verbrennungsvorgängen
- 2. Thermodynamische Grundlagen
- 3. Chemische Reaktionskinetik
- 4. Zündung und Zündgrenzen
- 5. Laminare Flammentheorie
- 6. Schadstoffe der Verbrennung
- 7. Turbulente Verbrennung
- 8. Verbrennung flüssiger und fester Brennstoffe
- 9. Numerische Simulation von turbulenter Verbrennung
- 10. Messgröße und Messverfahren der Verbrennungstechnik
- 11. Anwendungsaspekte turbulenter Verbrennung
- 12. Technische Brennersysteme
- 13. Motorische Verbrennung
- 14. Emissionstomographie von Flammen
- 15. Diagnostik turbulenter Flammen

*VT I*

*VT II*

# Kapitel 1

## Erscheinungsbild von Verbrennungsvorgängen

Eine erste phänomenologisch orientierte  
Einführung zur Verbrennung

## 1.1 Aufgaben der Verbrennungstechnik

## 1.2 Charakterisierung und Begriffe

- Teilprozesse der Verbrennung
  - **Exkurs: Wie kann man eine Flamme löschen ?**
- Laminare - Turbulente Flammen
- Diffusionsflammen - Vormischflammen
- Stationäre - Instationäre Verbrennung
- **Beispiele**
- **Erste vergleichende Bewertung**
- **Nutzen von Verbrennung**

# "Faszination Feuer"



# 1.1 Aufgaben der Verbrennungstechnik

## Verbrennung ist eine der ältesten Technologien der Menschheit

- Brandrodung
- Herdfeuer, Wärme, Schutz vor Tieren,
- Nahrungszubereitung
- Metallbearbeitung
- "Feuerwaffen"

### Feuer ist zweiseitig:

- *Nutztechnologie*
- *Zerstörend / Feuersbrünste*



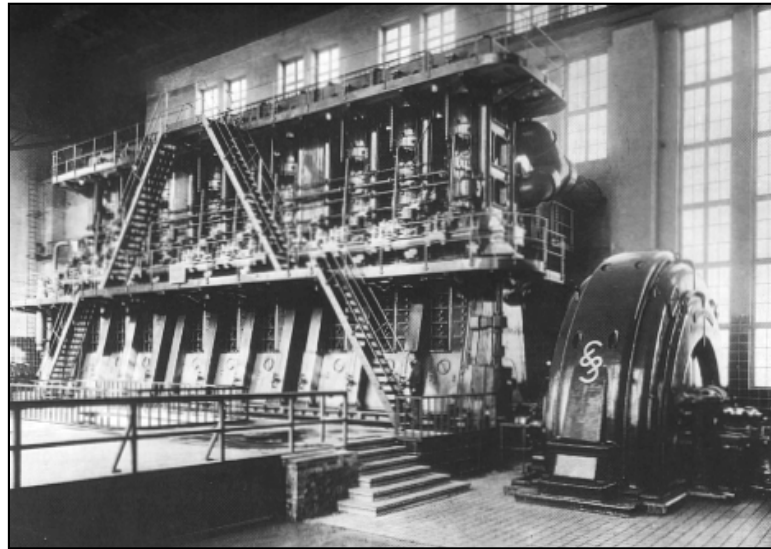
*Die Strafe des Prometheus, weil er der Menschheit Feuer brachte (T. Velasquez)*

# Aufgaben der Verbrennungstechnik

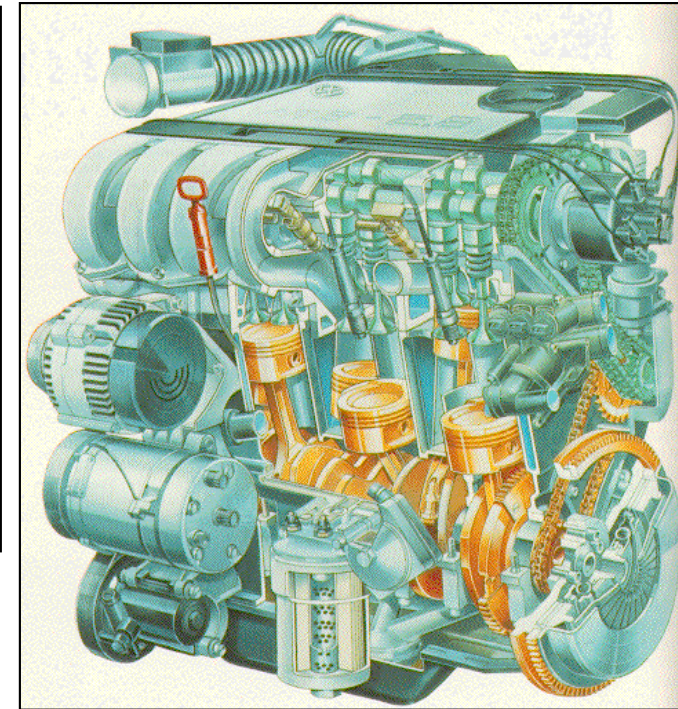
Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK

- **Industrialisierung:**  
**Wesentliche Fortschritte kamen von Energie- und Verbrennungstechnik:**

- Dampfmaschinen
- Kraftwerke
- Kolbenmotoren
- Gasturbinen
- Flugzeugtriebwerke
- Transportsysteme  
(Dampfloz, Eisenbahn, Straßenverkehr, Luftfahrt)



Blohm & Voss 1926, Kraftwerk  
Hamburg-Neuhof, MTZ 54, 52 (93)



Volkswagen, VR6-Ottomotor,  
128 kW, 2.8 l, MTZ 54, 96 (93)

**Bemerkenswert: Über 90% der weltweiten technischen Energienutzung geschieht über Verbrennungsvorgänge: (\*)**

- **Stromerzeugung (Kohlekraftwerke, Gas-Verbrennung)**
- **Verkehr**
- **Wärmenutzung (Heizung, Feuerungen, Herde)**

*(\*) Hermann Scheer ("Solare Weltwirtschaft", Verlag A. Kunstmann 2000) weist allerdings mit Recht darauf hin, dass der direkte Solarenergiestrom (Licht, Wärme, Photosynthese und damit Nahrungserzeugung) in dieser Art von Bilanz vergessen wurde, und dass dieser einen nochmals weit größeren Energiestrom darstellt.*



**Also: Aufgaben der Verbrennungstechnik sind:**

- **Verbesserung des Wirkungsgrades**
- **Verringerung der Schadstoffemissionen**
- **Aber auch Technische Auslegung von Systemen und Anpassung an technische Anforderungen, z.B. die Verkleinerung des Brennraumes, Leistungssteigerung etc.**

**Aber wie ?**

- **1. Schritt: Verständnis der Grundlagen**

## Anforderung an die Verbrennungstechnik:

- Wirkungsgradsteigerung
- Verbrauchs- und Schadstoffreduktion



Verfahrensentwicklung



Reduzierung der Brennkammergröße (beispielsweise für Flugtriebwerke entscheidend)

## Schlagworte sind beispielsweise:

“Drei-Liter-Auto“

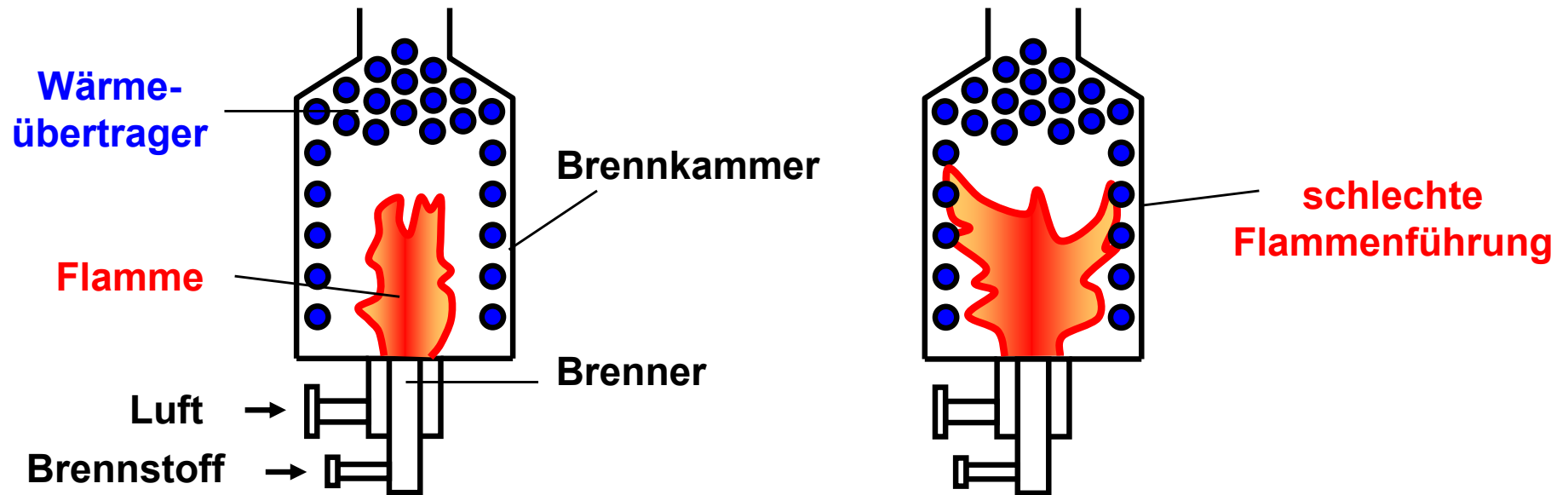
“ULEV“ – Ultra“ Low Emission Vehicle

“ZEV“ – Zero Emission Vehicle

“Single-Digit NO<sub>x</sub>“ – (< 10 ppm NO<sub>x</sub>)

# Aufgaben der Verbrennungstechnik

Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK



- Größe von Flamme und Brennkammer?
- Wie viel Brennstoff, wie viel Luft nötig?
- Wird Brennstoff ökonomisch genutzt? (Ausbrand, Wirkungsgrad)
- Betriebssicherheit
- Schadstoff-Emissionen

# Vorgehensweise

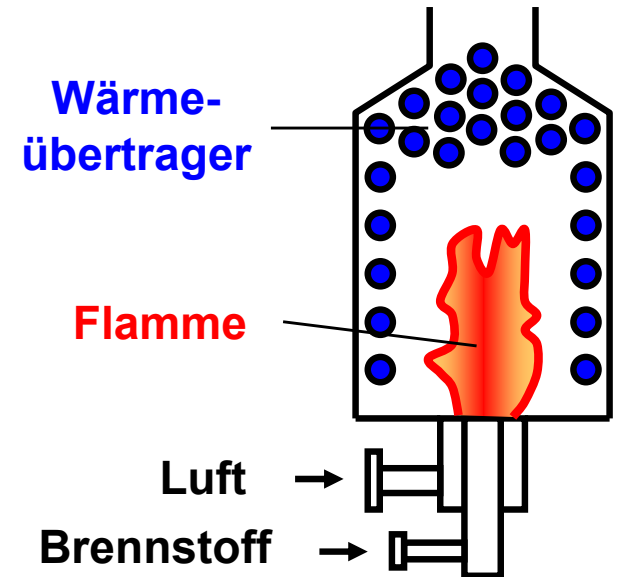
## **Traditionell**

- Empirische Erfahrung
- Verbesserung mittels Trial-and-Error-Methode
- Auslegung mittels globaler Berechnungen

## **Zunehmend**

- Berechnung basierend auf **lokalen** physikalischen und chemischen Prozessen:

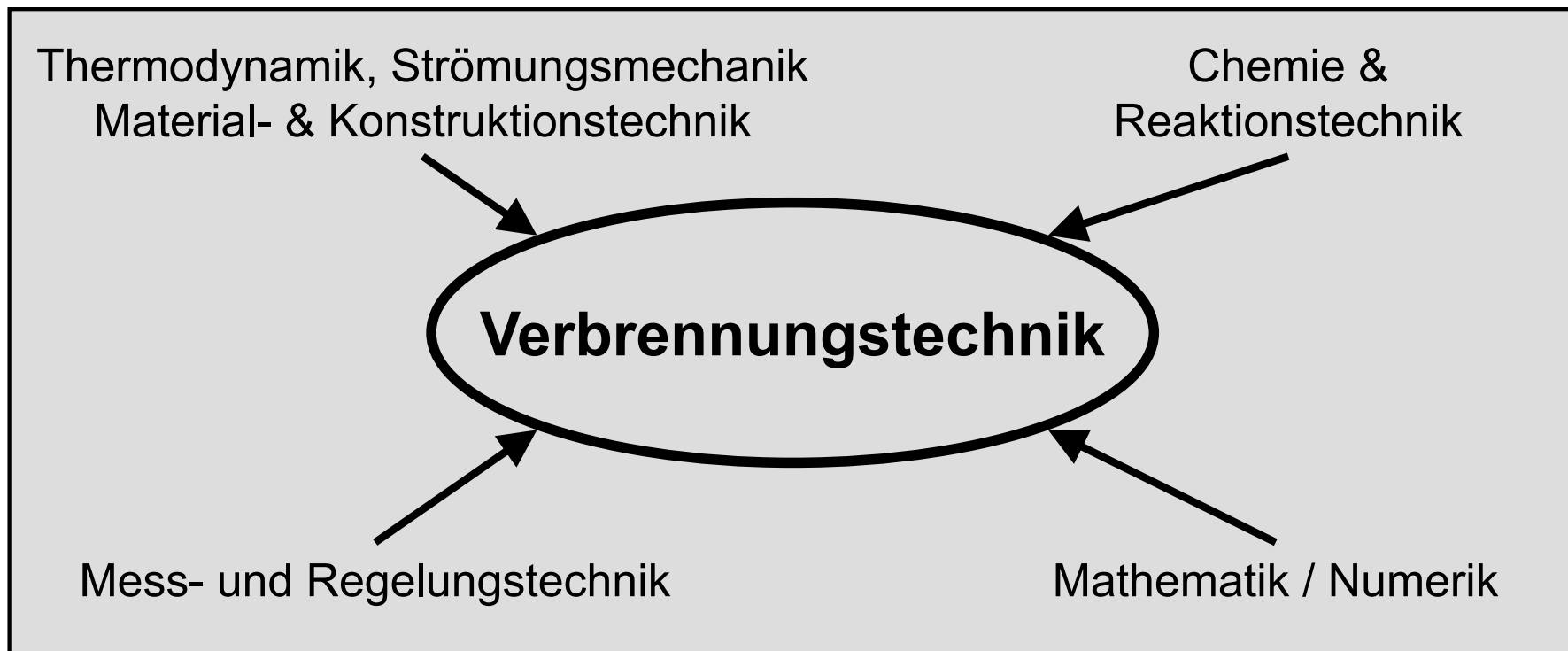
- Wärme-, Stofftransport durch konvektive Strömung
- durch Diffusion
- Verdampfung
- Reaktion
- Strahlung, usw. ...



**Zunehmend  
Interdisziplinär**

# Aufgaben der Verbrennungstechnik

Moderne Verbrennungstechnik ist deshalb nicht mehr nur eine Ingenieursdisziplin, sondern interdisziplinär:



# 1.2 Charakterisierung und Begriffe

## **Verbrennung:**

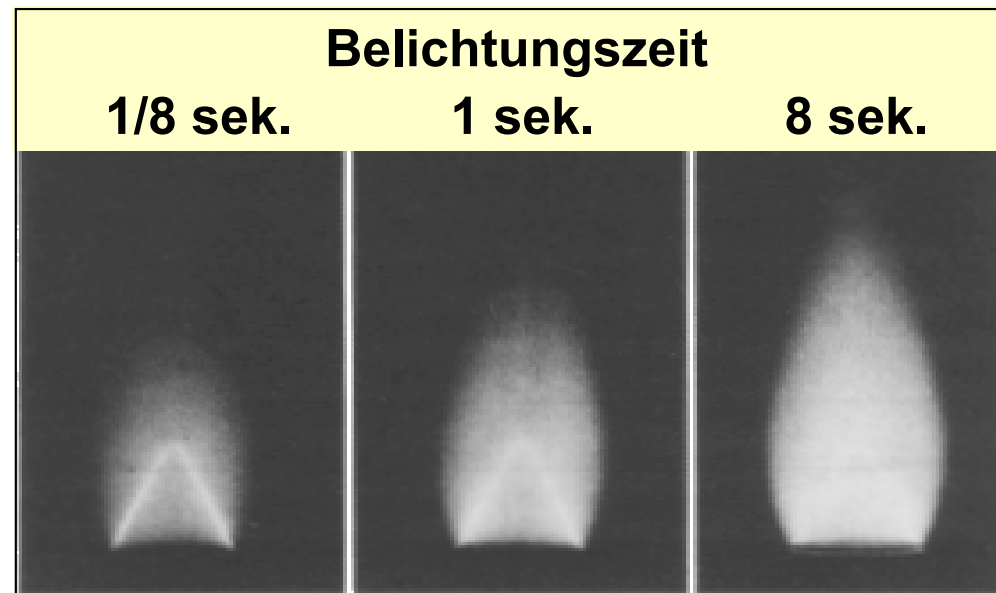
"Umwandlung chemisch gebundener Energie in Wärme"

### **Typisch ist**

- Brennstoff und Oxidationsmittel reagieren miteinander
  - Oxidationsmittel  $O_2$  (Luft).
  - Sprengstoffe, feste Raketentreibstoffe enthalten  $O_2$  chemisch gebunden.
- Energiefreisetzung (exotherme Reaktion)
- Reaktionsverlauf oft "schnell" (bei technisch relevanter Verbrennung)
- Wärme- und Stofftransport maßgeblich am Verbrennungsablauf beteiligt.

**→ Verbrennung ist komplex, nicht vollständig verstanden**

**Reaktionszone: Ort der Leuchterscheinung ???**



Quelle\*:  
R. Günther

**Achtung:**

- Leuchterscheinung ist belichtungsabhängig,
- das Flammenleuchten ist ein sekundärer Prozess (wird später besprochen)
- es gibt auch "flammenlose Verbrennung" (Flamme unsichtbar)
- **Also: Leuchterscheinung definiert nicht unbedingt die Reaktionszone**

(\* ) Quellenangabe, siehe Literaturliste zu Beginn des Buches,  
Abdruckgenehmigung vom Springer-Verlag

# Teilprozesse der Verbrennung

Für eine erste Charakterisierung der Verbrennung unterscheiden wir:

## Vier funktionale Teilprozesse bei Verbrennung (gasförmig):

(1) Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel

(2) Erwärmung, so daß Reaktion starten kann (Zündung)

(3) Verbrennungsreaktion mit Wärmeentwicklung

(4) Wärmeabgabe

Externe Zündung  
Selbstzündung

Rückkopplung

Verbrennung ist  
selbststabilisierender  
Vorgang



## Wie kann man eine Flamme löschen ?

**Brennstoffzufuhr beenden**

**Luft entziehen**  
(Löschdecke,  
Inerte Löschmittel  
wie Halone, CO<sub>2</sub>)

**Wärme entziehen**  
zur Unterbrechung der  
Zündung (Wasser als  
Löschmittel;  
Löschabstand bei  
Rückschlagsperren)

### Vier Teilprozesse:

- (1) Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel
- (2) Erwärmung zur Zündung
- (3) Verbrennungsreaktion mit Wärmeentwicklung
- (4) Wärmeabgabe

Rückkopplung

# Exkurs: Feuerbekämpfung

Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK



## Typische Zeitskalen:

Mischung	≈	0,1 - 10 sek
Reaktion	≈	10 <sup>-3</sup> sek



Mischung dominiert oft die Verbrennung



Oft Mischung durch konvektive Strömung unterstützt:  
laminare oder turbulente Strömung



**Laminare Flammen:** Strömung zeitunabhängig  
**Turbulente Flammen:** Strömung zeitabhängig

z.B.  $T(t) = \bar{T} + T'(t)$  (Temperatur)  
 $T'(t) \equiv 0$  für laminare Verbrennung

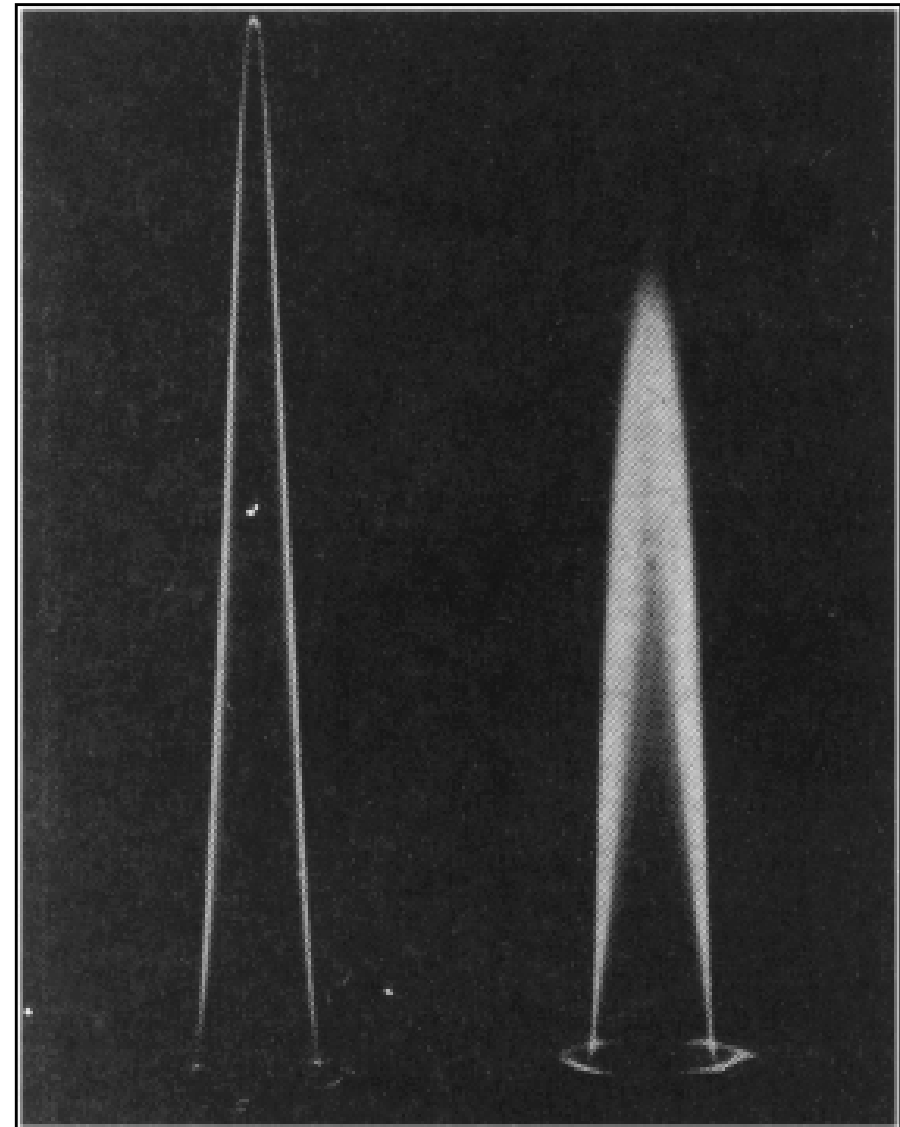
# Charakterisierung und Begriffe

**Wesentliches Merkmal:**

Laminare

und

turbulente Flamme





## 2 Grundtypen von Flammen

### **Diffusionsflammen:**

Br. + Ox. kommen in Reaktionszone zusammen

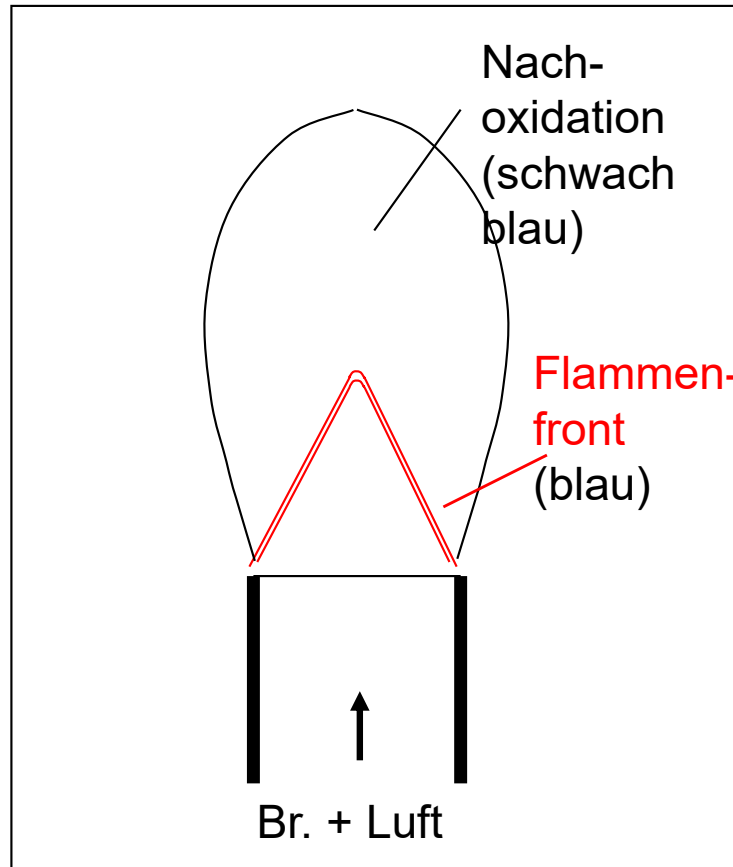
### **Vormischflammen:**

Br. + Ox. schon vor der Reaktionszone gemischt

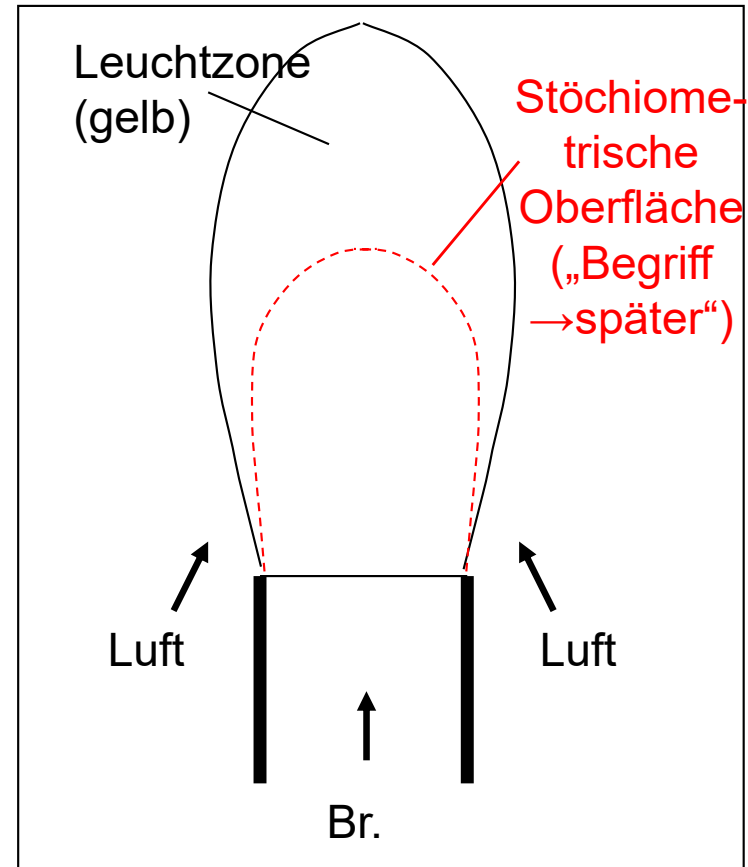
**Bem. 1:** Wir werden später sehen, dass auch in Vormischflammen die Diffusion ein sehr wesentlicher Vorgang ist, insofern ist der Name "*Diffusionsflamme*" unglücklich gewählt; besser wäre "*nichtvorgemischte Flamme*", im Englischen ist "*nonpremixed flame*" üblich).

**Bem. 2:** Es gibt auch Zwischenformen, die "*teilvergemischten Flammen*"

# Flammentypen (Bunsenflammen)

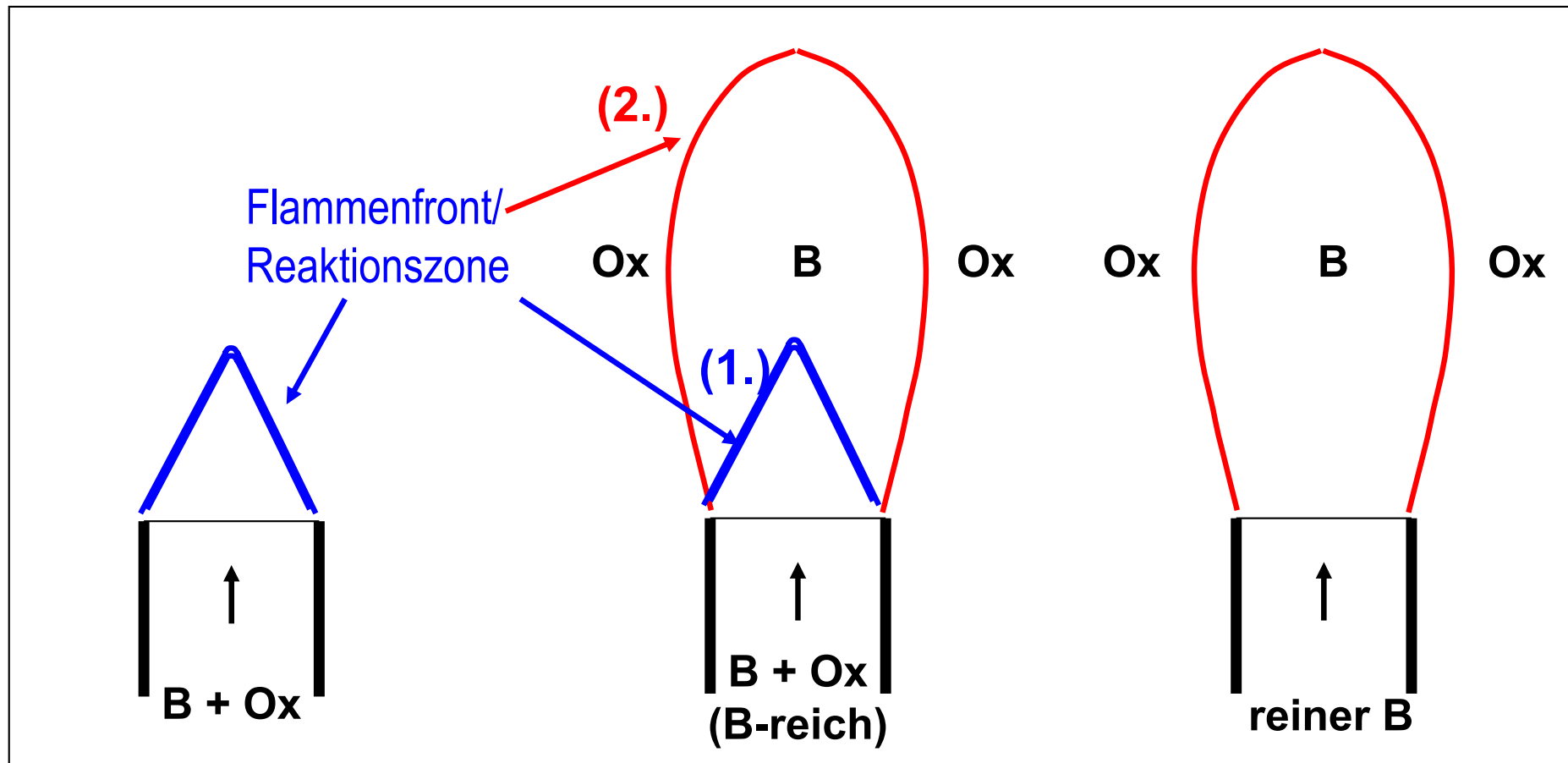


Vormischflamme



Diffusionsflamme

# Flammentypen (Bunsenflammen)



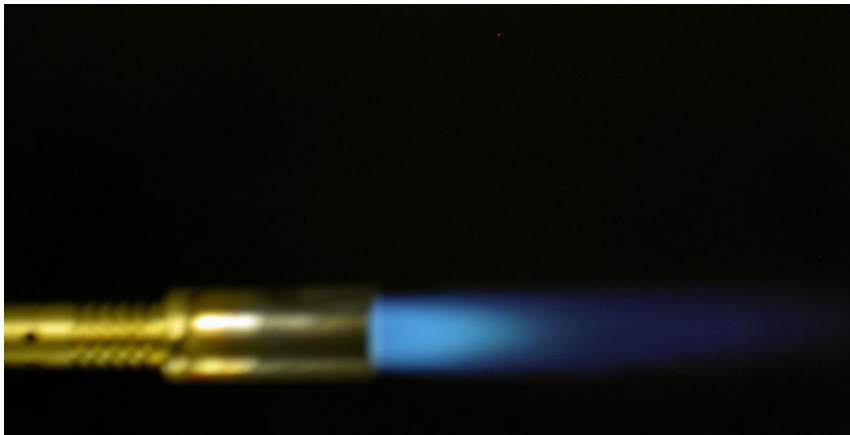
reine  
Vormischflamme

teilvergemischte  
Flamme

reine  
Diffusionsflamme

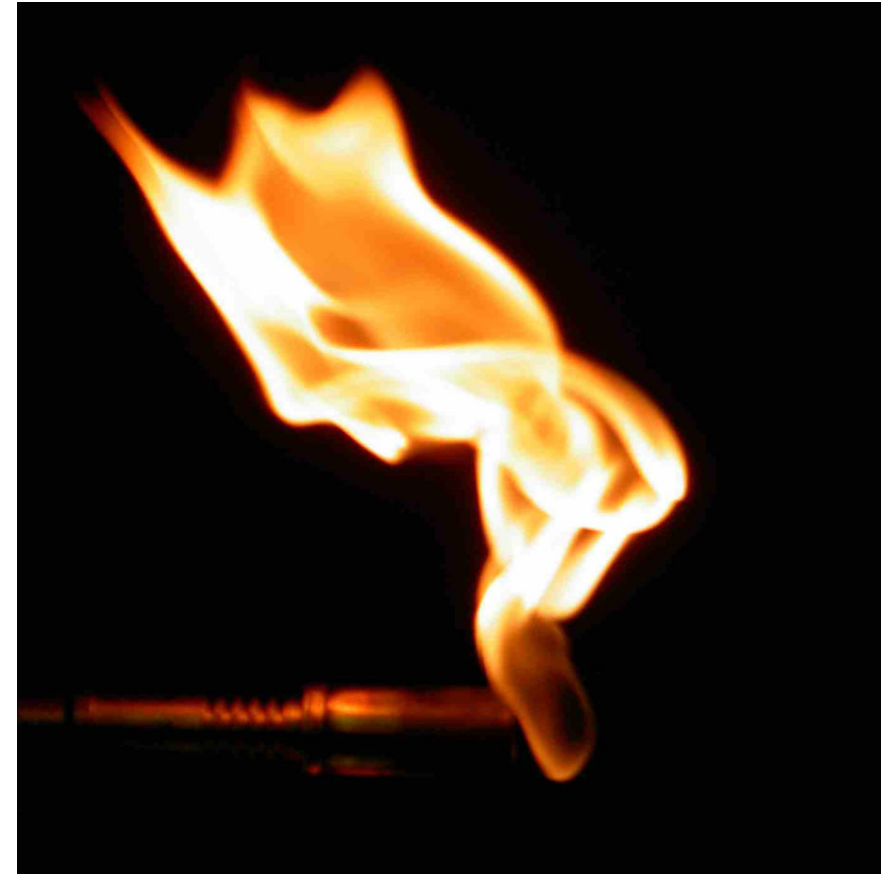
# Flammentypen

**Teilvorgemischte  
Flamme  
(Partially Premixed  
Flame)**



**Vormischflamme  
(Premixed Flame)**

Fotos von F. Dinkelacker, 2005



**Diffusionsflamme  
(Nonpremixed Flame)**

Butan/Luft

Auslassdurchmesser 18 mm

Brennstoffstrom ist konstant gehalten

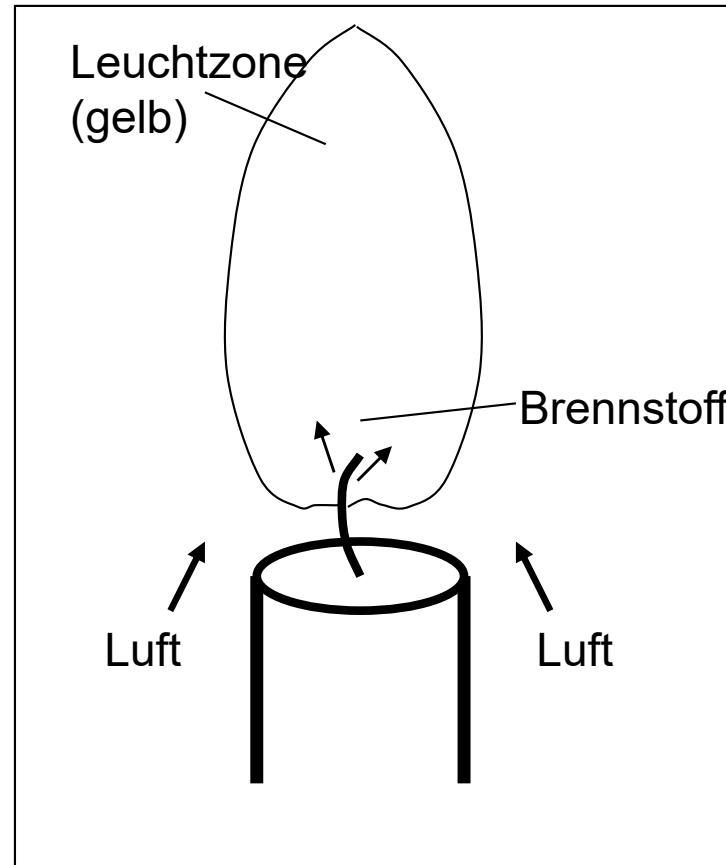


# Einteilung von Flammen

	laminar	turbulent
Diffusions- flamme	Kerze	Feuer, Industriebrenner, Fluggasturbine
Vormisch- flamme	Gasherd (teilweise vorgemischt), Porenbrenner	Moderne Gastrubine

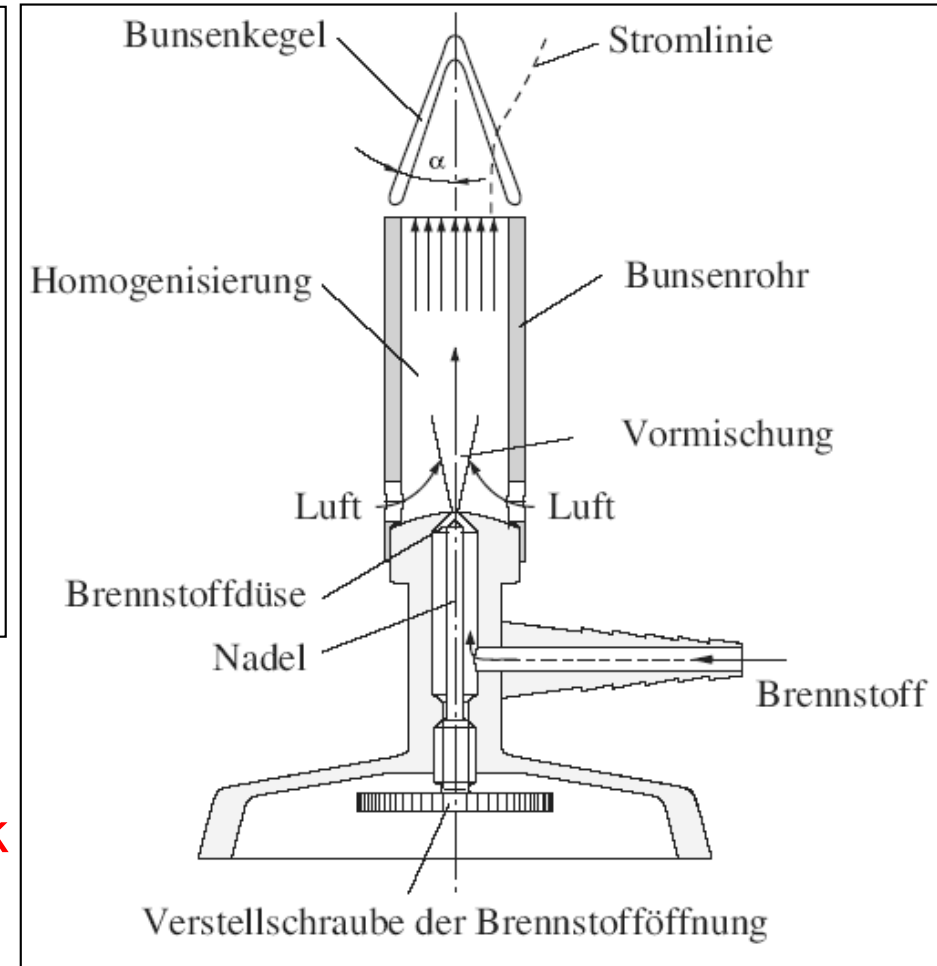
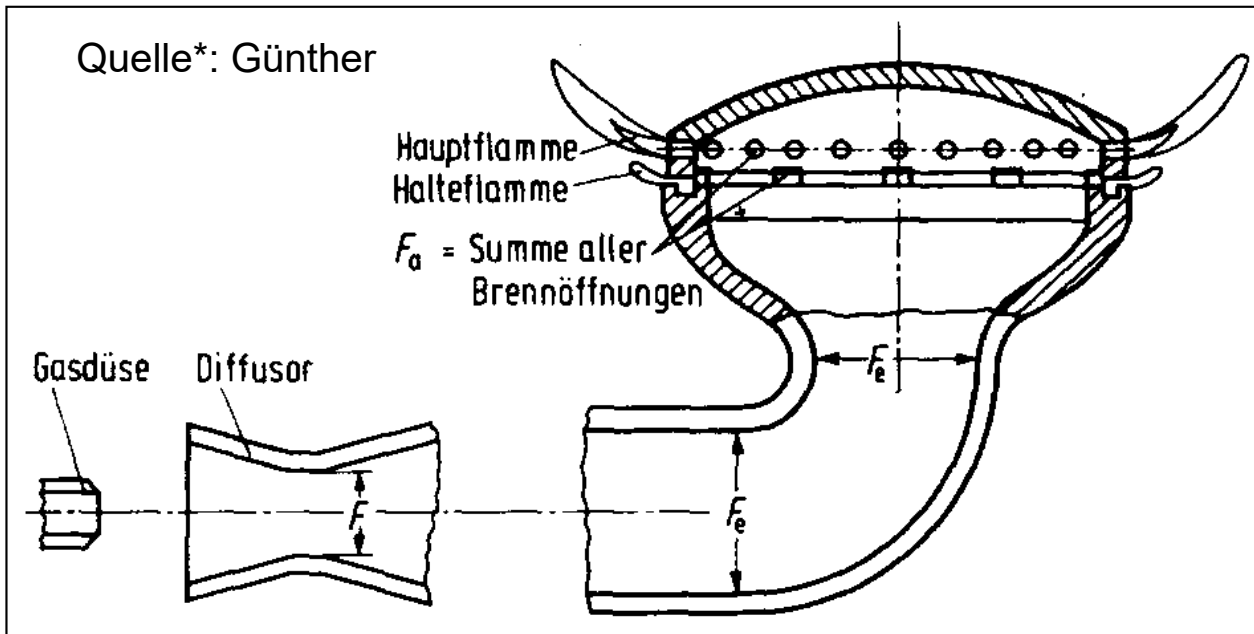
Beispiele folgen:

# Kerzenflamme



***Die Kerzenflamme als klassisches  
Beispiel einer laminaren  
Diffusionsflamme***

# Beispiele für Verbrennungssysteme

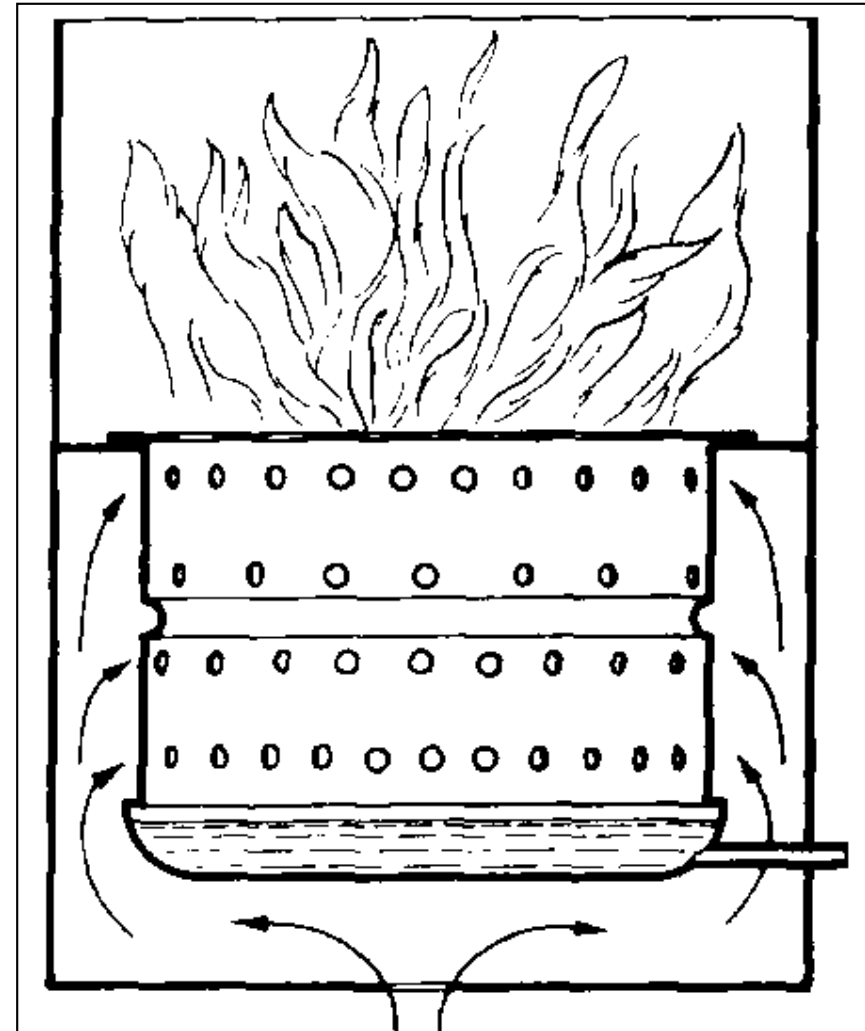


**Kochstellenbrenner** Teilvorgemischte  
Flamme, Luftansaugung durch Gasleitungsdruck

**Bunsenbrenner** Wahlweise vorgemischte oder nicht vorgemischte  
turbulente Flamme, Luftansaugung durch Gasleitungsdruck

# Beispiele für Verbrennungssysteme

Verdampfungsbrenner für  
leichtes Heizöl  
Einfacher Ölbrenner, Zimmerofen,  
Luftzufuhr durch Auftrieb  
(Schornsteinzug)



Quelle\*: Günther

# Beispiel: Kraftwerksfeuerung

Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK

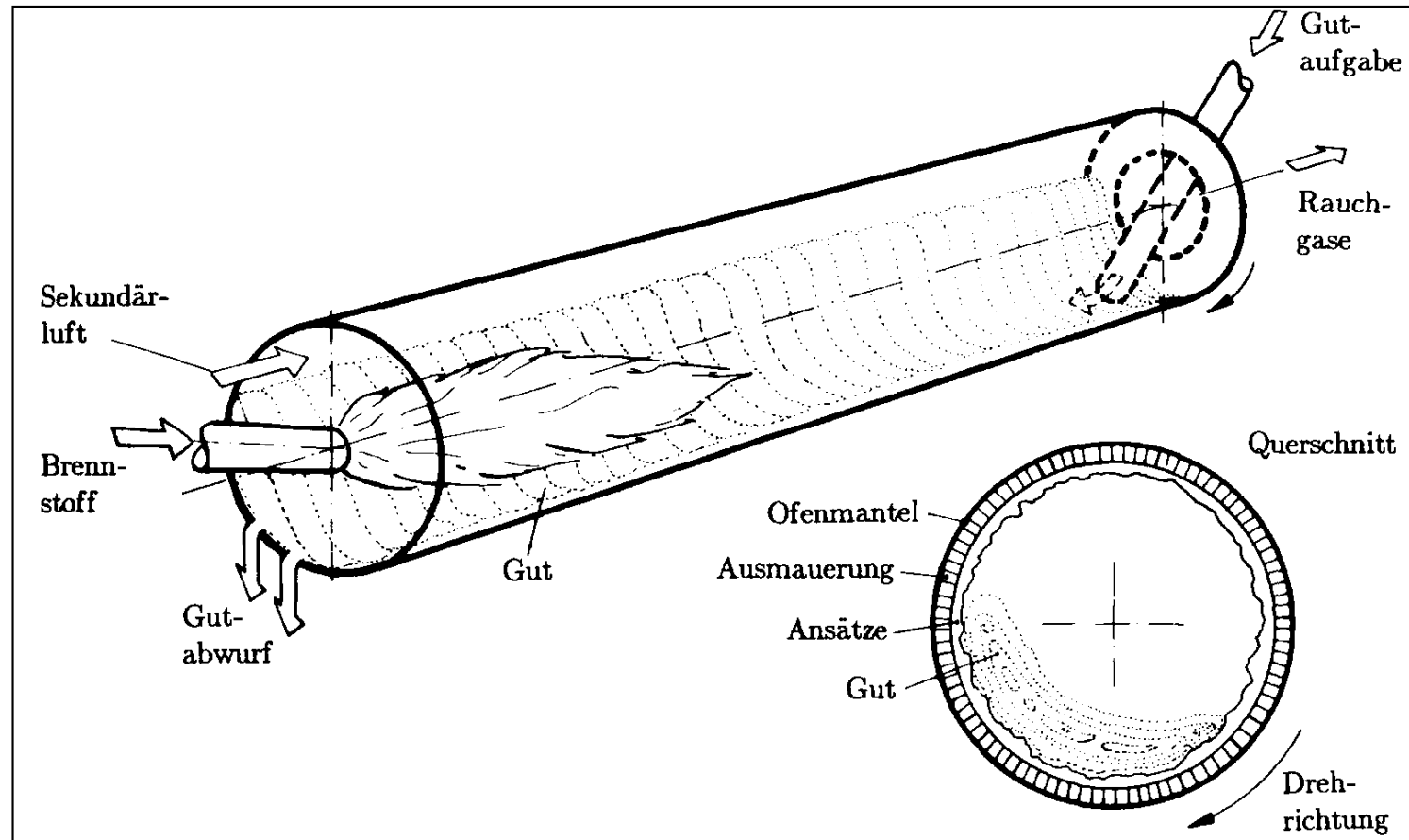


Quelle: TU-Sofia

Tangentialfeuerung in Kraftwerk  
Turbulente lange Diffusionsflammen

**ca. 10 m Kantenlänge**

# Beispiel: Drehrohrofen

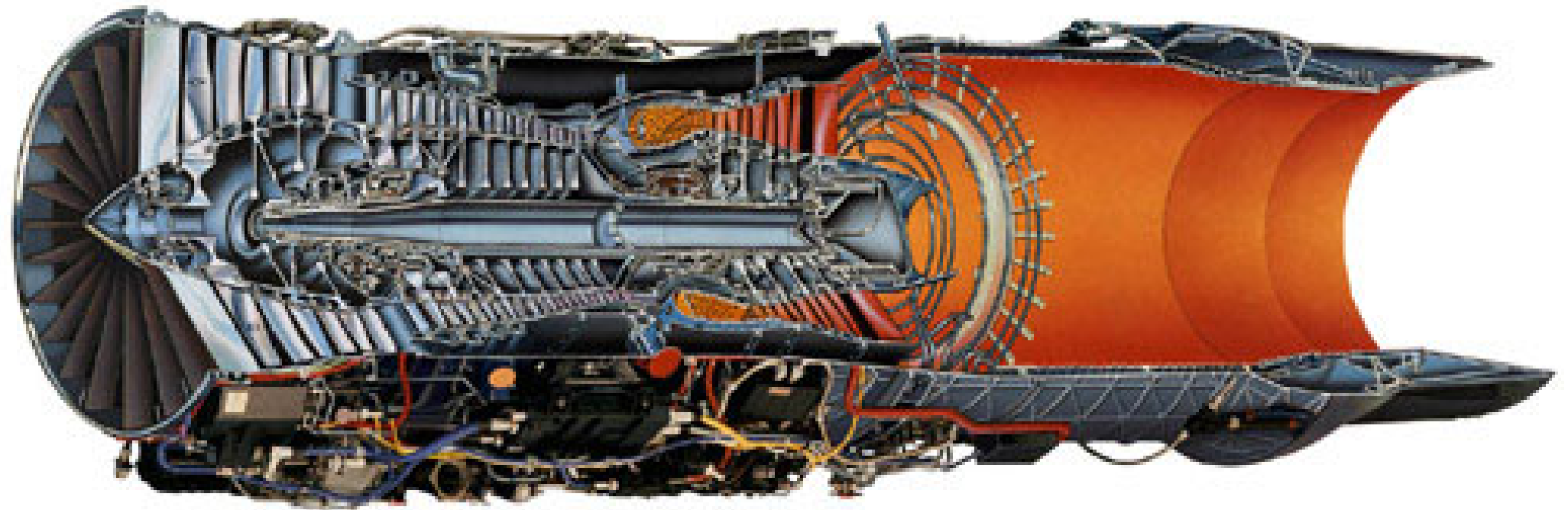


Quelle\*:  
K. Görner

**Drehrohr zur Zementherstellung (Länge 40 - 200 m)**  
**Turbulente lange Diffusionsflamme, Strahlungswärmeübergang**

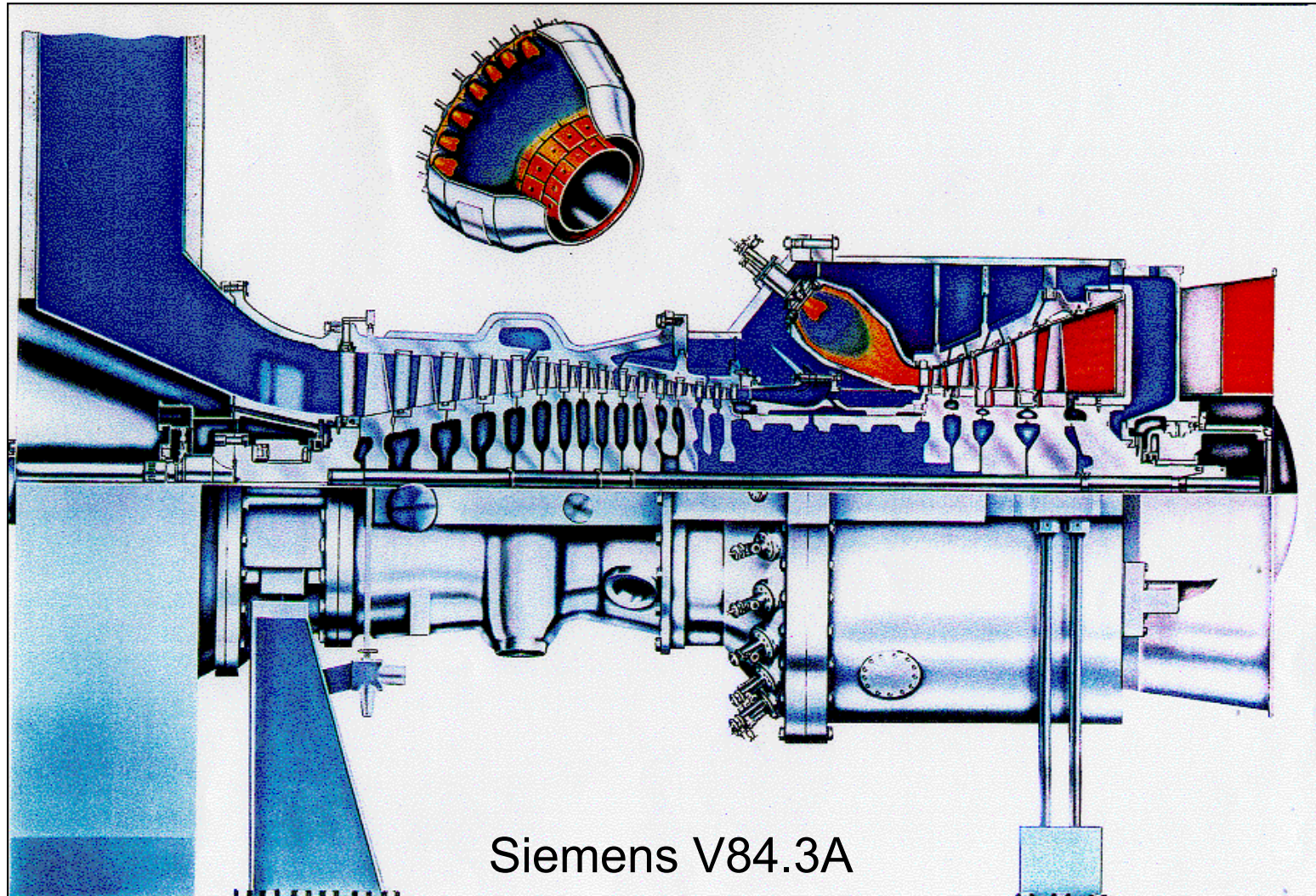
(\* ) Quellenangabe, siehe Literaturliste zu Beginn des Buches,  
Abdruckgenehmigung vom Springer-Verlag und vom Autor

# Beispiel: Flug-Gasturbine



**Pratt & Whitney  
F100-PW-229 Engine**  
**Flugtriebwerk mit Nachbrenner**

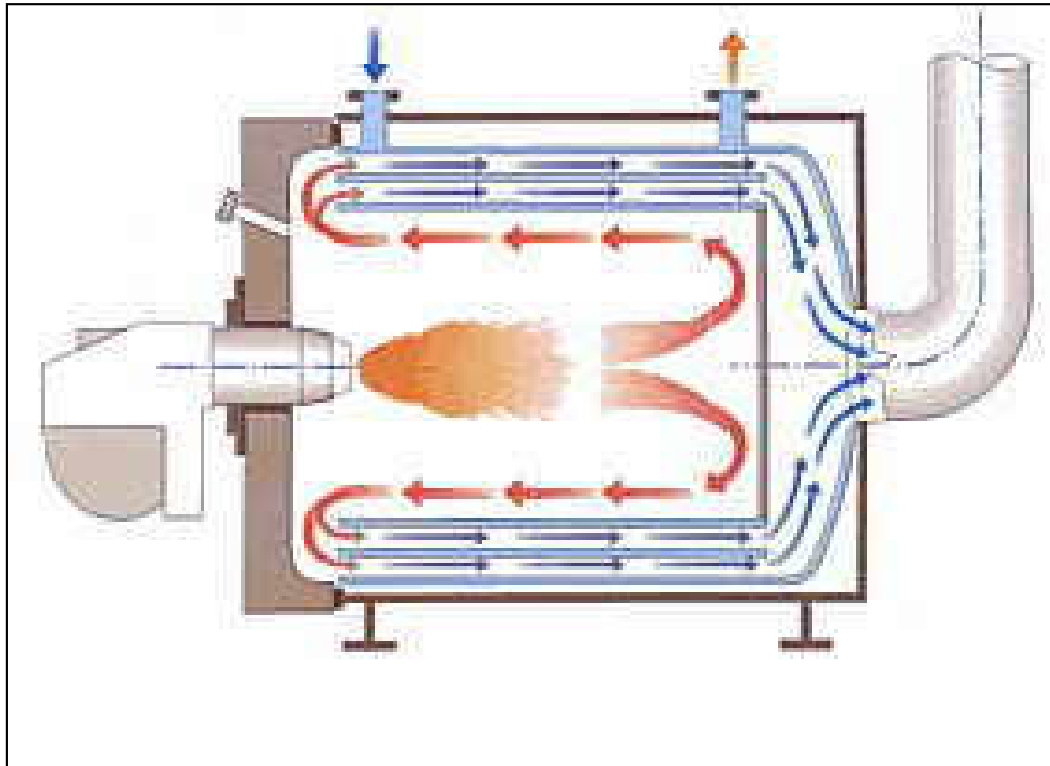
# Beispiel: Stationäre Gasturbine



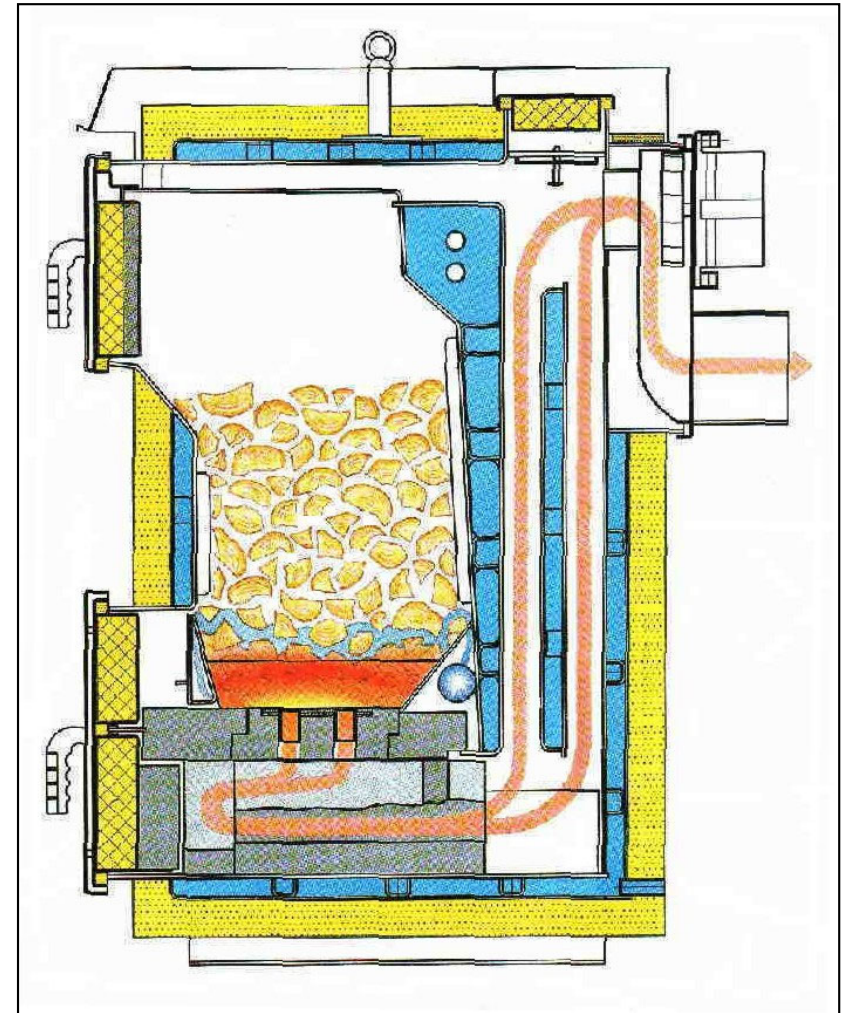
**Moderne Gasturbine mit Ringbrennkammer für vorgemischte Verbrennung:  
→ NO<sub>x</sub> unter 50 ppm ohne Rauchgasreinigung**



# Beispiel: Heizbrenner



Ölheizkessel



Holzschnitzelfeuerung  
(Biomasse)

## Turbulente Flammen:

Mischung wird unterstützt

→ Verbrennung schneller, komprimiert

## Diffusionsflammen:

Lange Flammen

Stark leuchtend, Strahlung

Recht stabile Verbrennung, "sicher"

## Vormischflammen:

Gezielte Reaktionsführung möglich:

→ NO<sub>x</sub> - Reduktion

→ Rußvermeidung

Rückschlaggefahr

## Ein weiteres Merkmal betrifft den zeitlichen Verlauf der Verbrennung:

- **Stationäre Verbrennung**  
Verbrennungsfeld bleibt (im Mittel) ortsfest
- **Instationäre Verbrennung**  
Einmaliger Brennvorgang oder zeitlich veränderliches Verbrennungsfeld

z.B. für turbulente Verbrennung

$$T(t) = \bar{T} + T'(t)$$

( $T$  = Temperatur)

stationär :  $\bar{T} = \text{fest}$

instationär :  $\bar{T} = f(t)$

# Instationäre Verbrennung - Beispiele

Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK

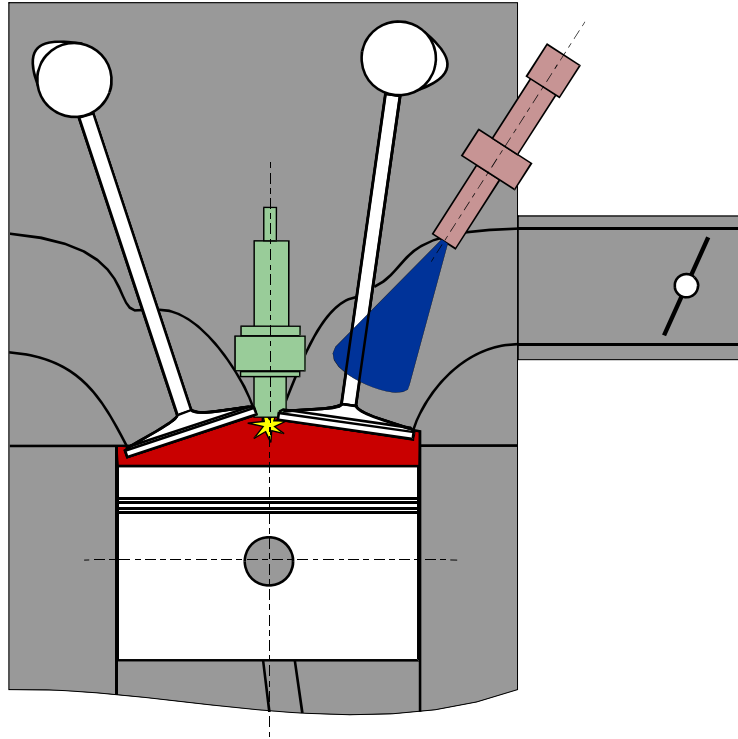
	laminar	turbulent
Diffusions- flamme	Kerze	Feuer, Industrieöfen, Fluggasturbine
Vormisch- flamme	Gasherd (tw. vorgemischt), Porenbrenner	Moderne Gastrubine

stationär

	laminar	turbulent
Diffusions- flamme	Tropfen- zündung	Dieselmotor (mit Direktein- spritzung)
Vormisch- flamme	Zünd- vorgänge	Ottomotor (mit Saugrohr- einspritzung)

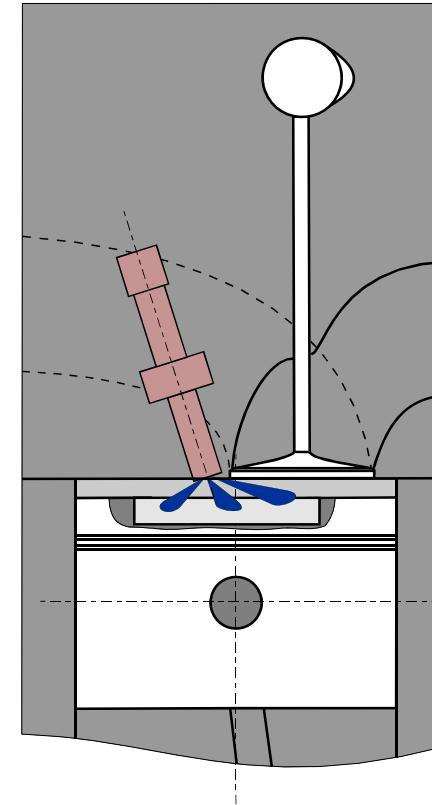
instationär

# Beispiel: Motorische Verbrennung



## Ottomotor mit Saugrohreinspritzung

- Instationäre turbulente vorgemischte Verbrennung
- Fremdzündung



## Dieselmotor mit Direkteinspritzung

- Instationäre turbulente nichtvorgemischte Verbrennung
- Selbstzündung

**Primär wird "chemische Energie" in "Wärme" umgesetzt.  
Diese kann unterschiedlichen Nutzen haben**

## **Nutzen**

Wärme für Heizung

Wärme für Hochtemperaturprozesse

Stromerzeugung

Mech. Leistung, z.B. Verkehr

Chemische Zersetzung

Licht, "Behaglichkeit"

## **Beispiele**

Heizbrenner (Öl, Gas, Feststoffe)

Zementherstellung

Glasschmelzofen

Kraftwerk (Kohle, Öl, Gas)

stationäre Gasturbine

Verbrennungsmotor

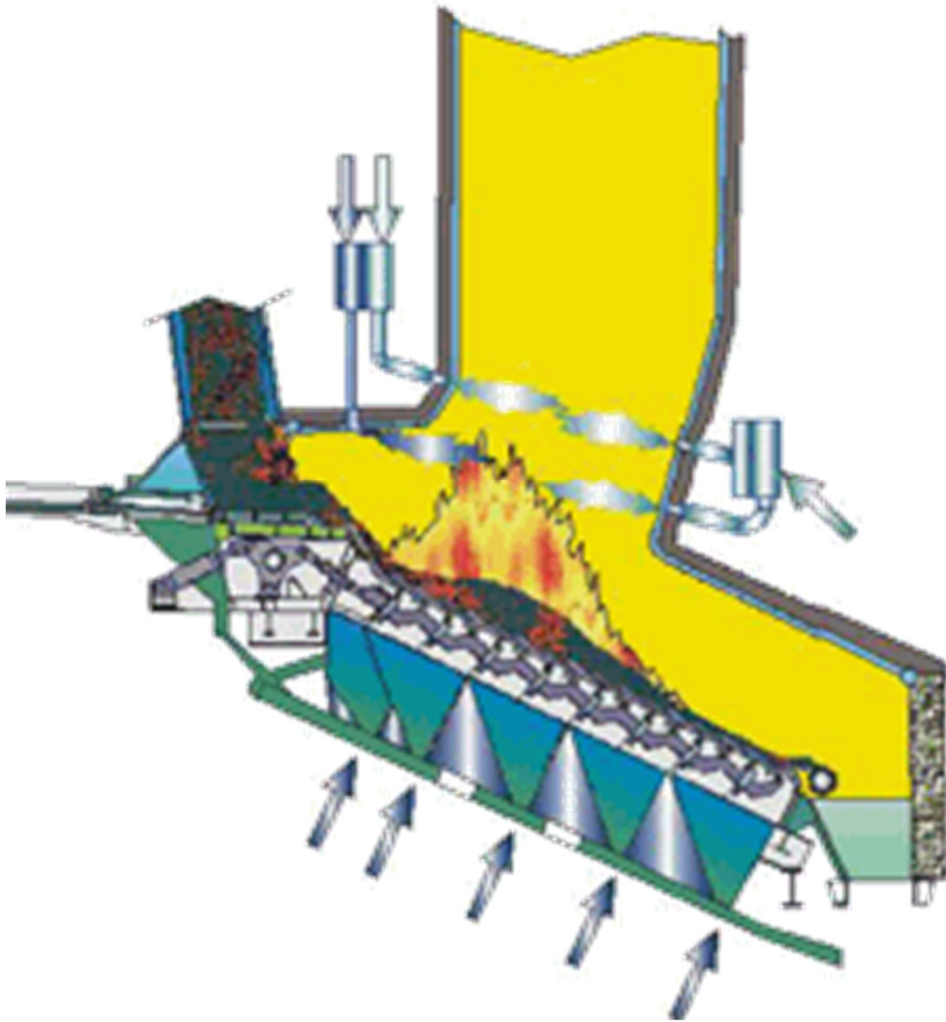
Flug-Gasturbine

Müllverbrennungsanlage

Fackel

Kerze

# Beispiel: Müllverbrennung



Quelle: Martin GmbH, München

# Fackel (Flare)

**Fackeln - zum Abbrennen plötzlich auftretender überschüssiger Brenngase**

## 2. Generation

**Rußend (1. Generation)**





## Zusammenfassung:

- **Verbrennungstechnik** - nach wie vor bedeutende Technologie
- **Wirkungsgradsteigerung und Schadstoffreduktion** hochaktuell
- **Zunehmend Beschreibung der Detailvorgänge** (für Berechnung)
  
- **Charakterisierung und Begriffe**
  - Verbrennung - Flamme
  - 4 wichtige Teilprozesse der Verbrennung
  - Charakterisierungsmerkmale:
    - Laminare - Turbulente Flammen
    - Diffusionsflammen - Vormischflammen
    - Stationäre - Instationäre Verbrennung
  
- **Nutzen von Verbrennung**
  - Wärme, Arbeit, Licht, chemische Zersetzung