

Verbrennungstechnik I

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger

SoSe 2025

Vorlesung:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger

Tel.: 0271 740-3124

E-Mail: thomas.seeger@uni-siegen.de

Übungen:

Jonas Hölzer, M.Sc.

Tel.: 0271 740-2880

E-Mail: 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, 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*



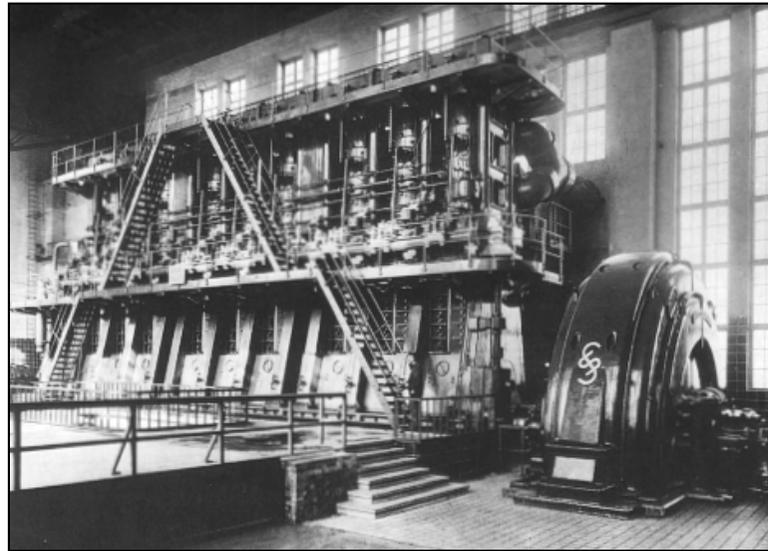
Die Strafe des Prometheus, weil er der Menschheit Feuer brachte (T. Velasquez)

Aufgaben der Verbrennungstechnik

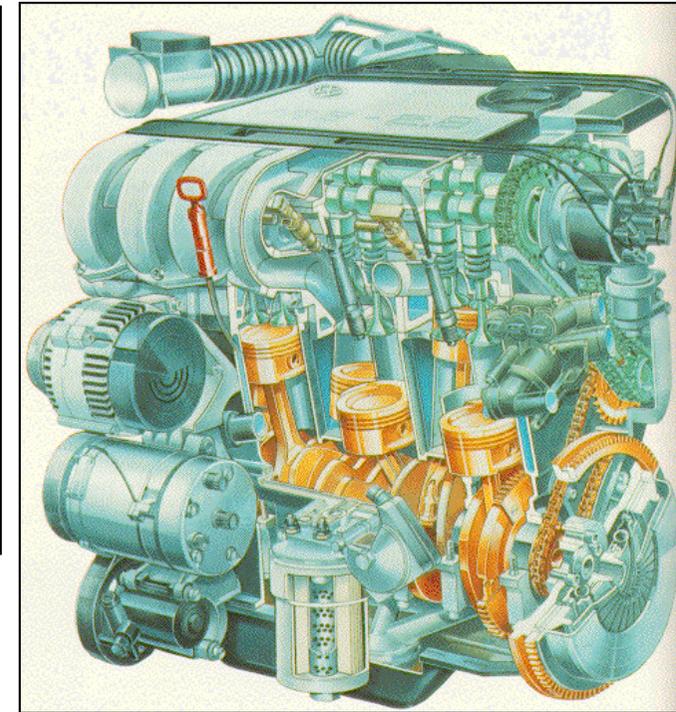
Vorlesung VERBRENNUNGSTECHNIK

- **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“

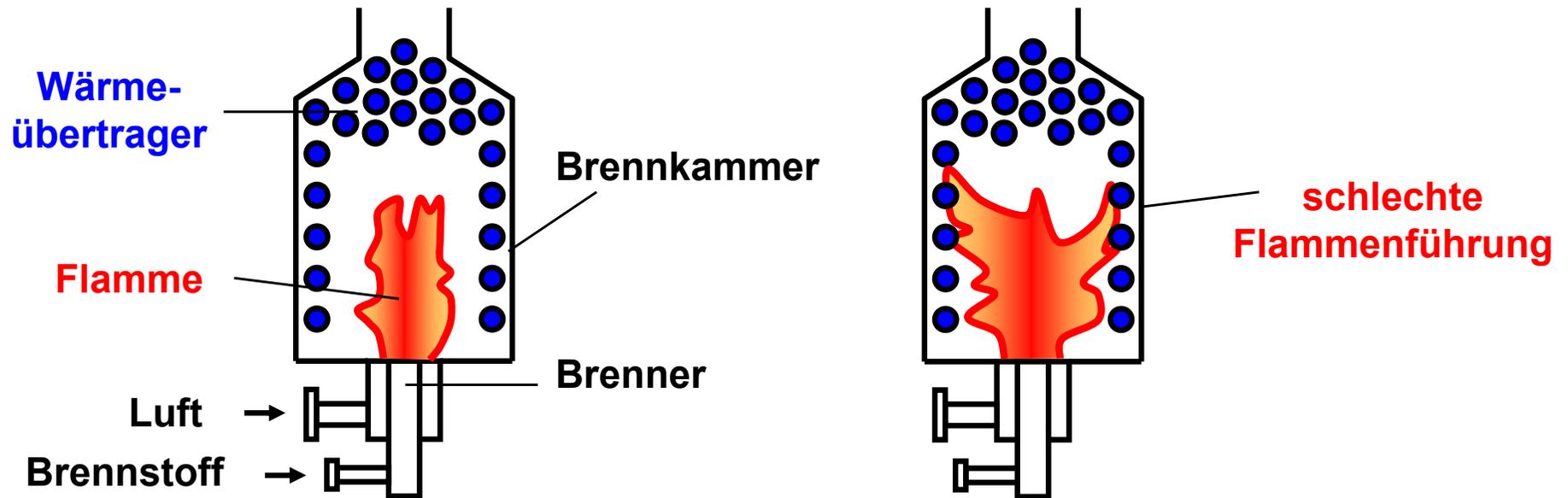
“ULEV“ – Ultra“ Low Emission Vehicle

“ZEV“ – Zero Emission Vehicle

“Single-Digit NO_x“ – (< 10 ppm NO_x)

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

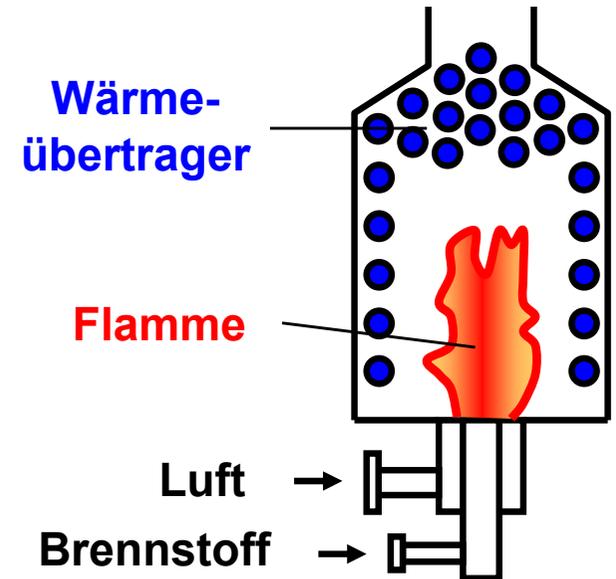
Traditionell

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

Zunehmend

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

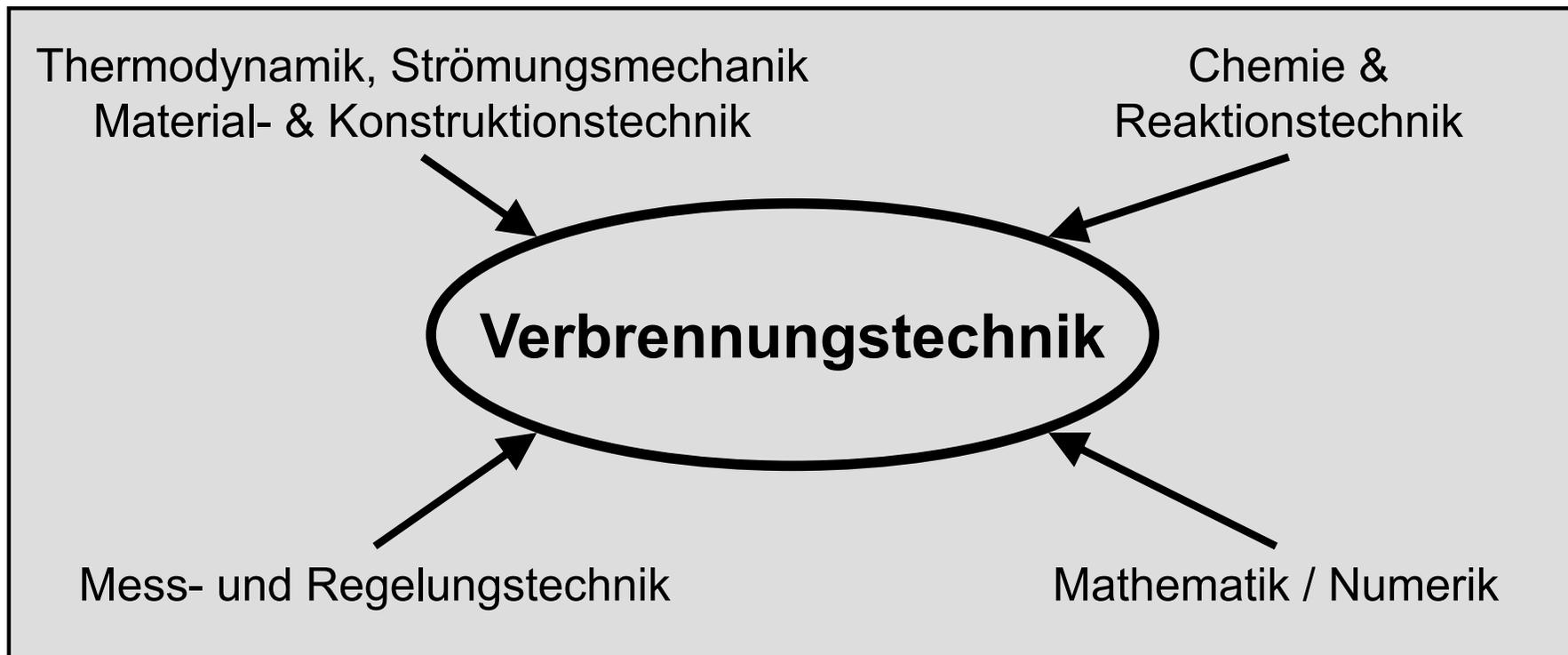
- Wärme-, Stofftransport durch konvektive Strömung
- durch Diffusion
- Verdampfung
- Reaktion
- Strahlung, usw. ...



**Zunehmend
Interdisziplinär**

Aufgaben der Verbrennungstechnik

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



1.2 Charakterisierung und Begriffe

Verbrennung:

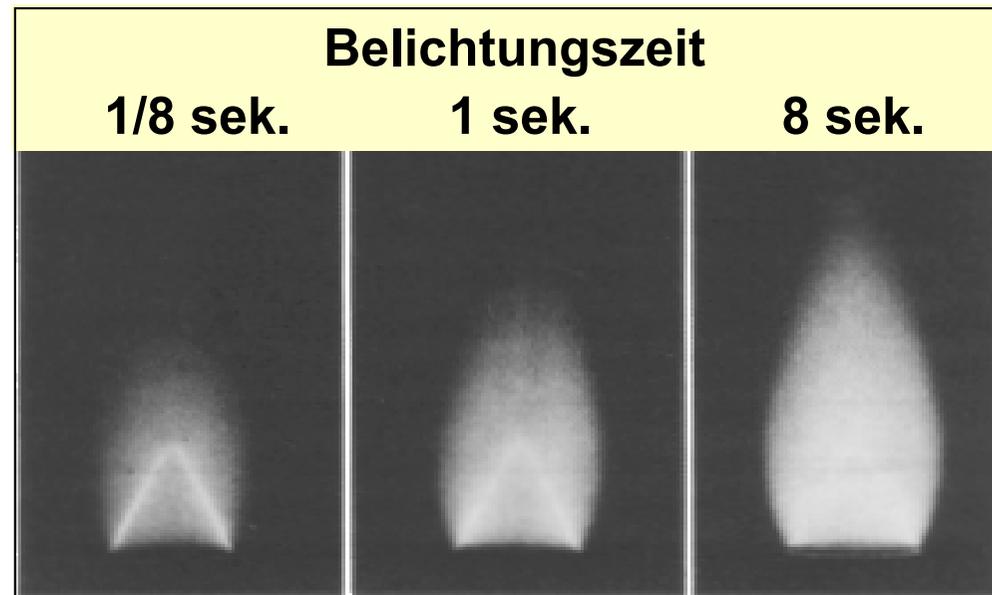
"Umwandlung chemisch gebundener Energie in Wärme"

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, CO₂)

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 ⁻³ 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

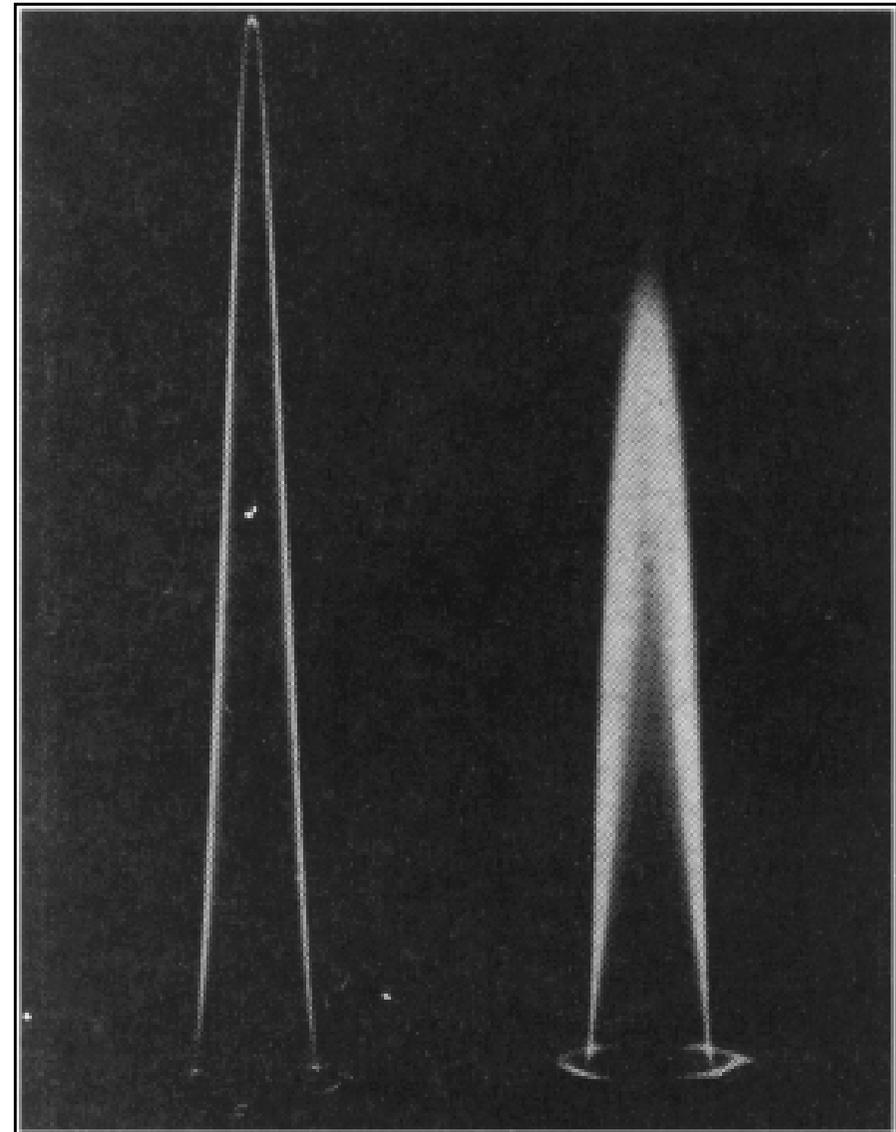
Charakterisierung und Begriffe

Wesentliches Merkmal:

Laminare

und

turbulente Flamme





2 Grundtypen von Flammen

Diffusionsflammen:

Br. + Ox. kommen in Reaktionszone zusammen

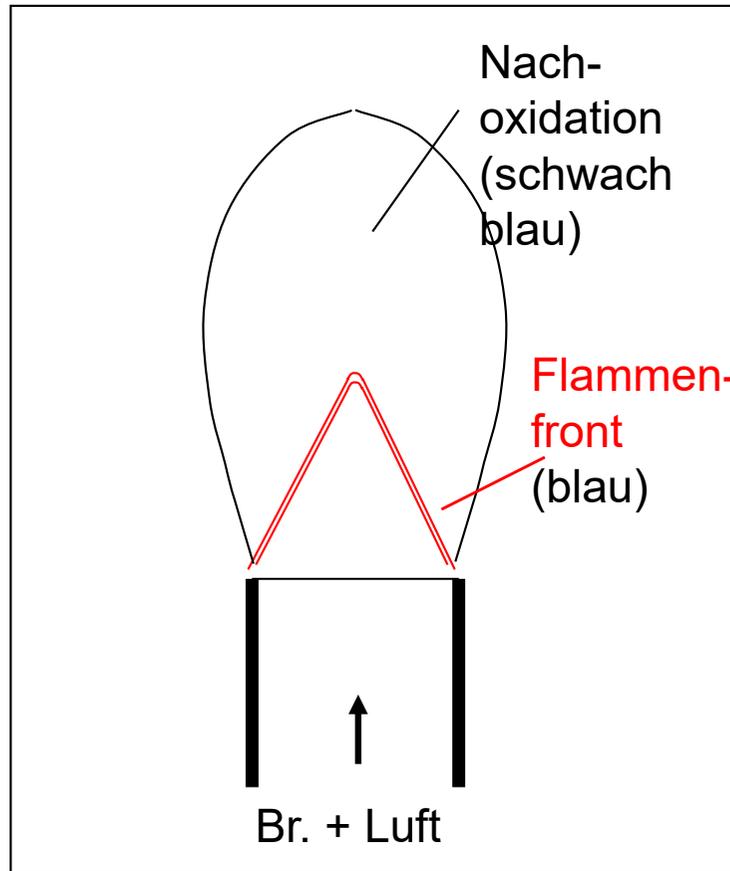
Vormischflammen:

Br. + Ox. schon vor der Reaktionszone gemischt

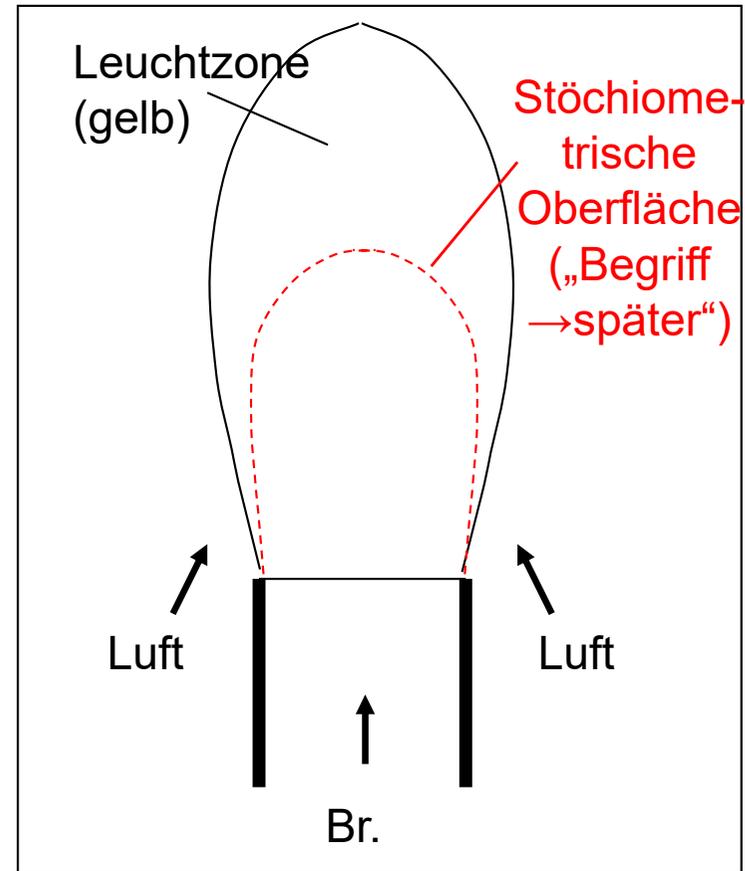
Bem. 1: Wir werden später sehen, dass auch in Vormischflammen die Diffusion ein sehr wesentlicher Vorgang ist, insofern ist der Name "*Diffusionsflamme*" unglücklich gewählt; besser wäre "*nichtvorgemischte Flamme*", im Englischen ist "*nonpremixed flame*" üblich).

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

Flammentypen (Bunsenflammen)

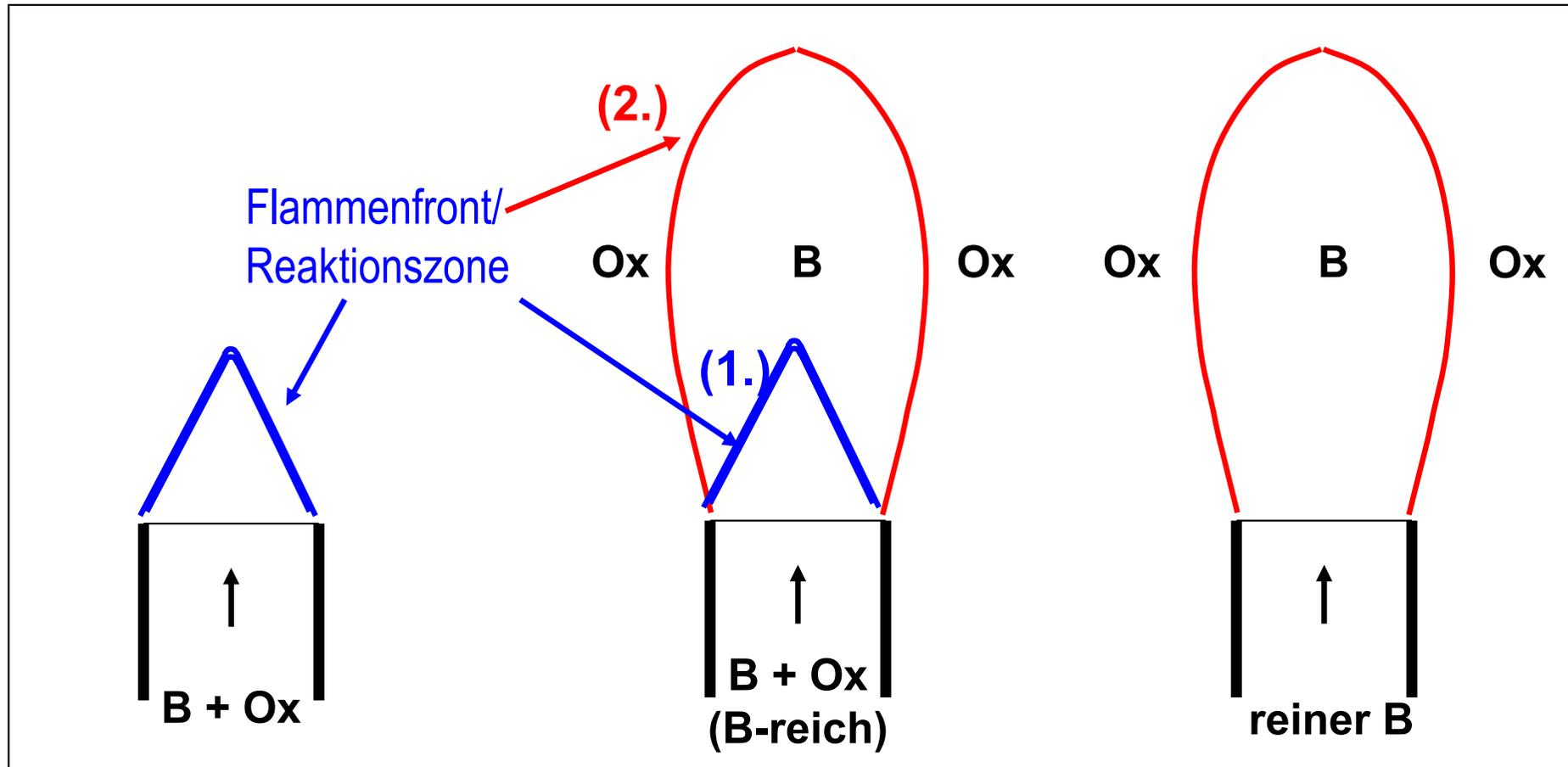


Vormischflamme



Diffusionsflamme

Flammentypen (Bunsenflammen)



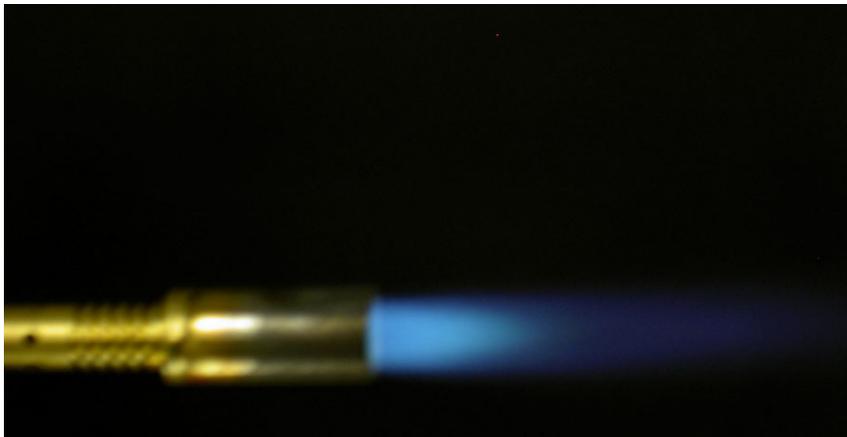
**reine
Vormischflamme**

**teilvergemischte
Flamme**

**reine
Diffusionsflamme**

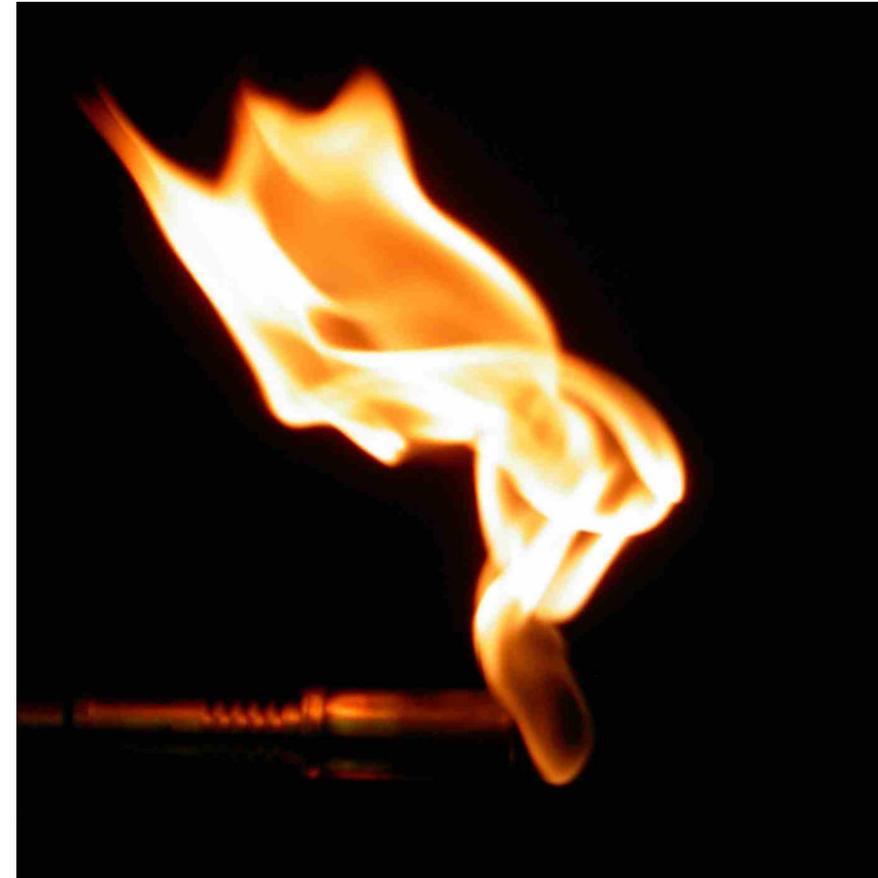
Flammentypen

**Teilvorgemischte
Flamme
(Partially Premixed
Flame)**



**Vormischflamme
(Premixed Flame)**

Fotos von F. Dinkelacker, 2005



**Diffusionsflamme
(Nonpremixed Flame)**

Butan/Luft

Auslassdurchmesser 18 mm

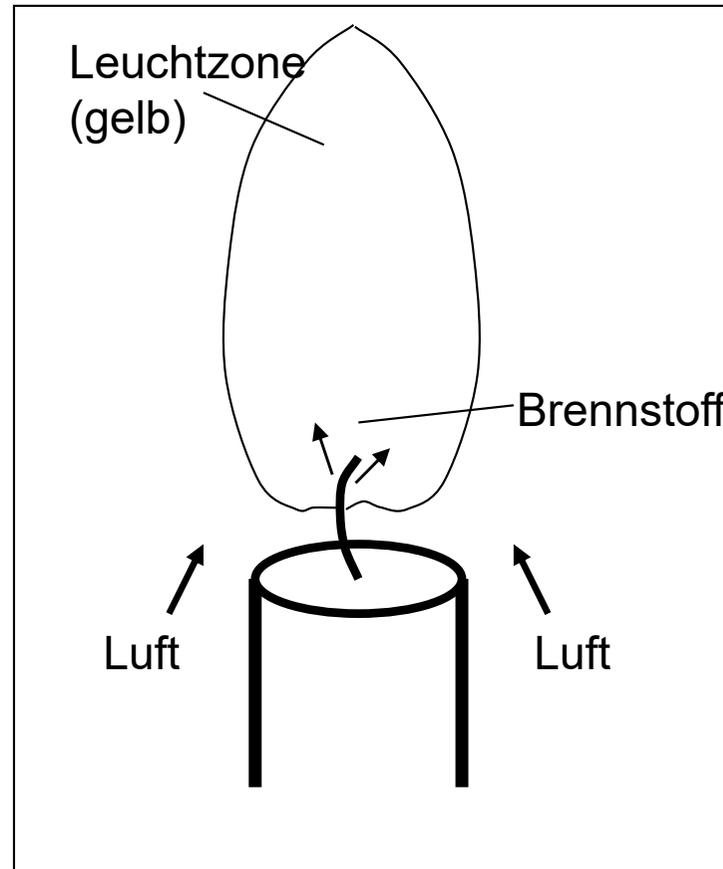
Brennstoffstrom ist konstant gehalten

Einteilung von Flammen

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

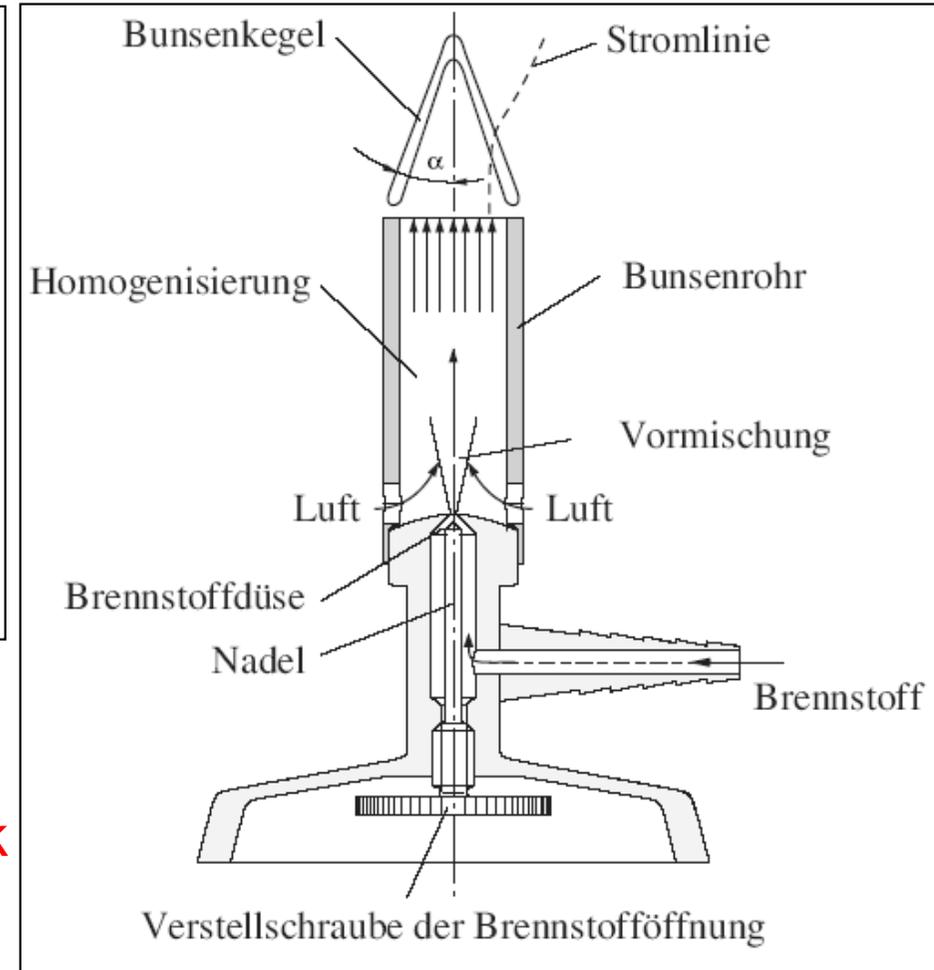
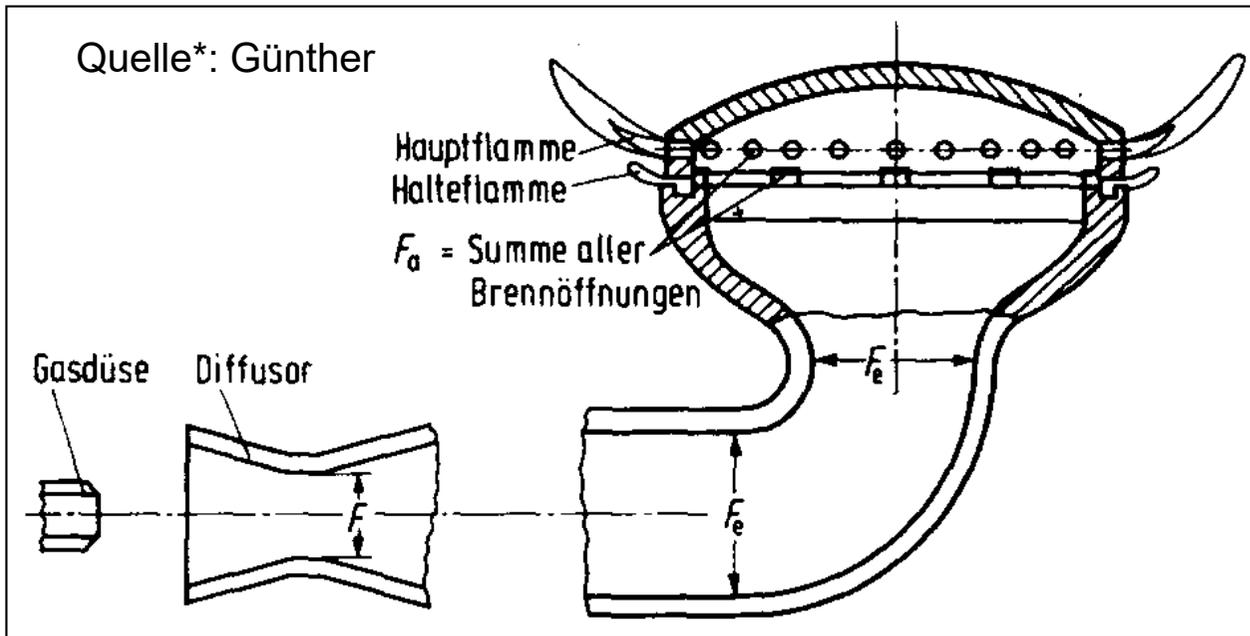
Beispiele folgen:

Kerzenflamme



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

Beispiele für Verbrennungssysteme

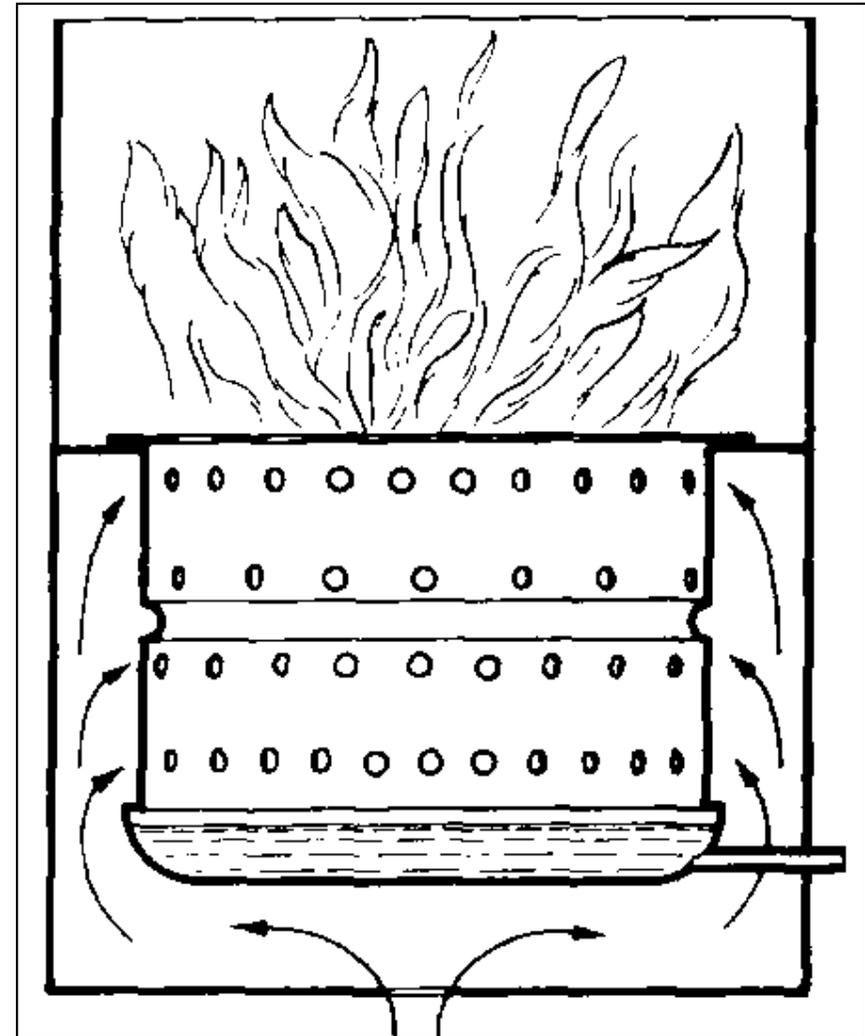


Kochstellenbrenner Teilvorgemischte
Flamme, Luftansaugung durch Gasleitungsdruck

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

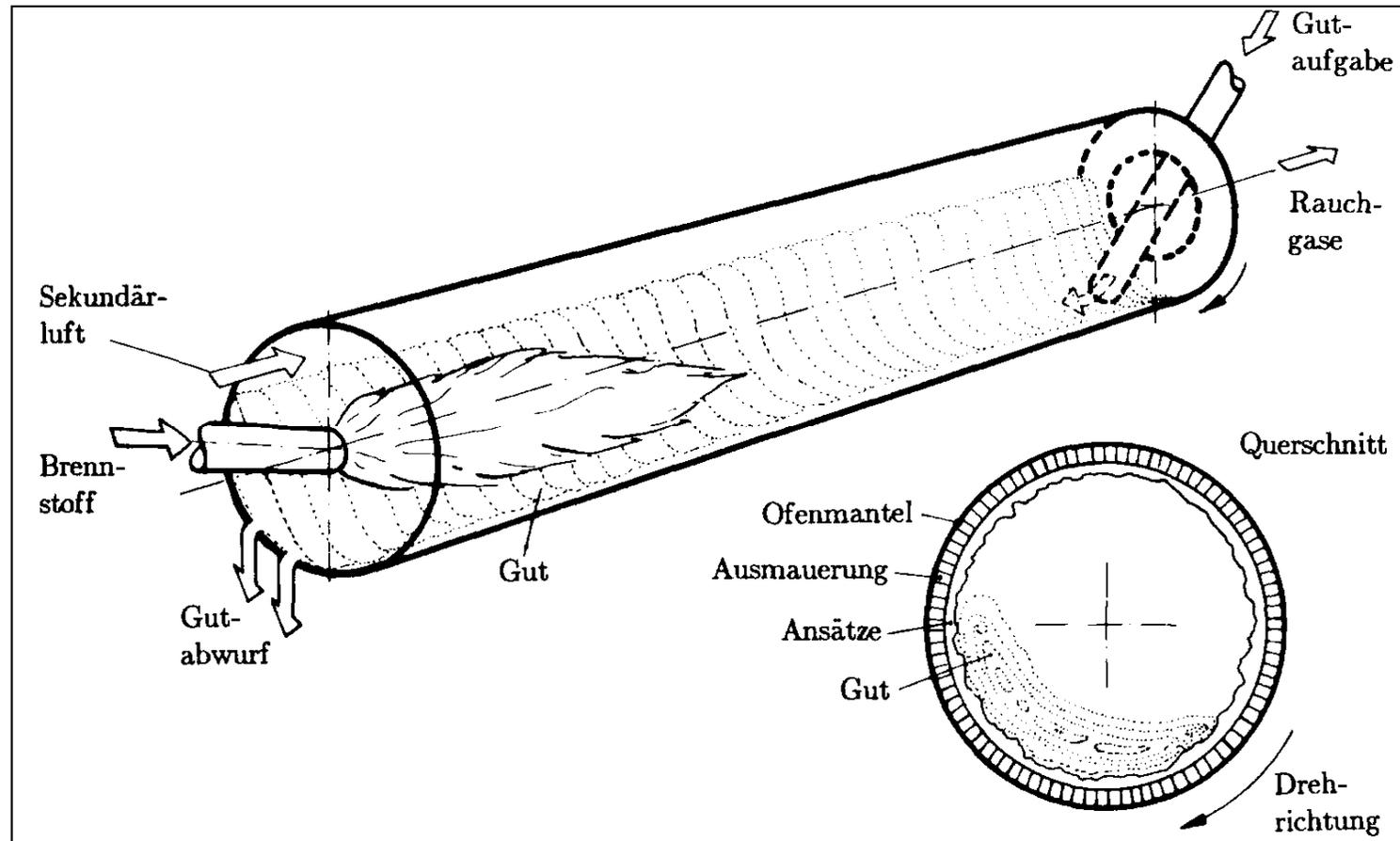


Quelle: TU-Sofia

Tangentialfeuerung in Kraftwerk
Turbulente lange Diffusionsflammen

ca. 10 m Kantenlänge

Beispiel: Drehrohrofen

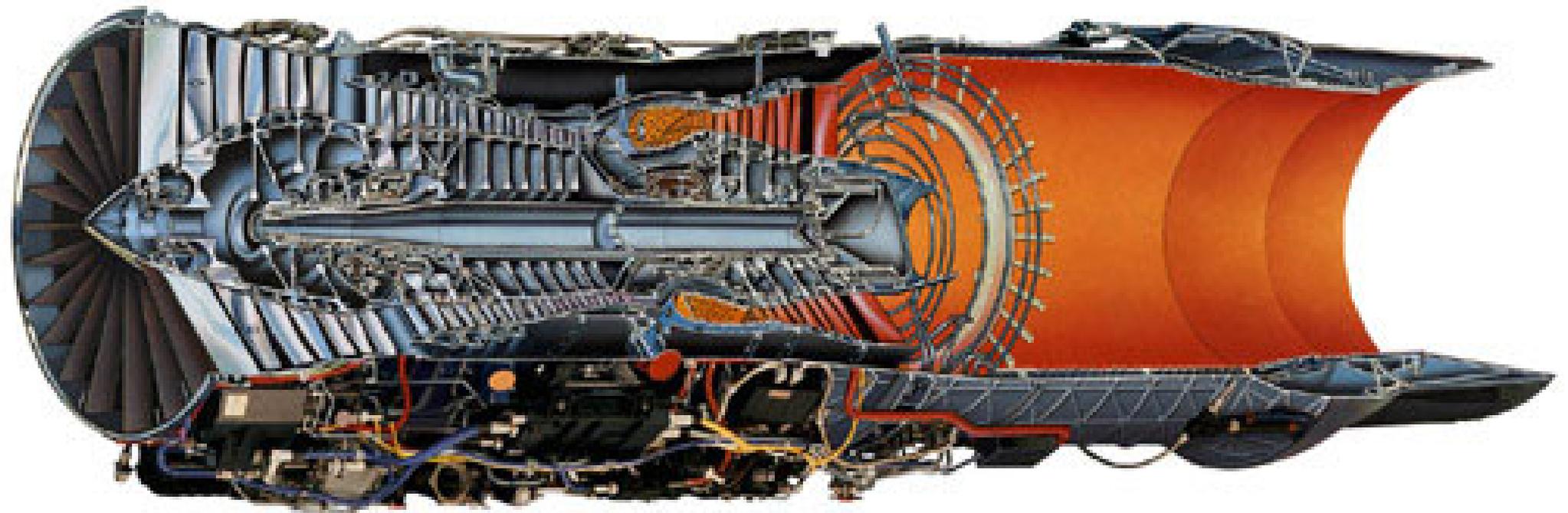


Quelle*:
K. Görner

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

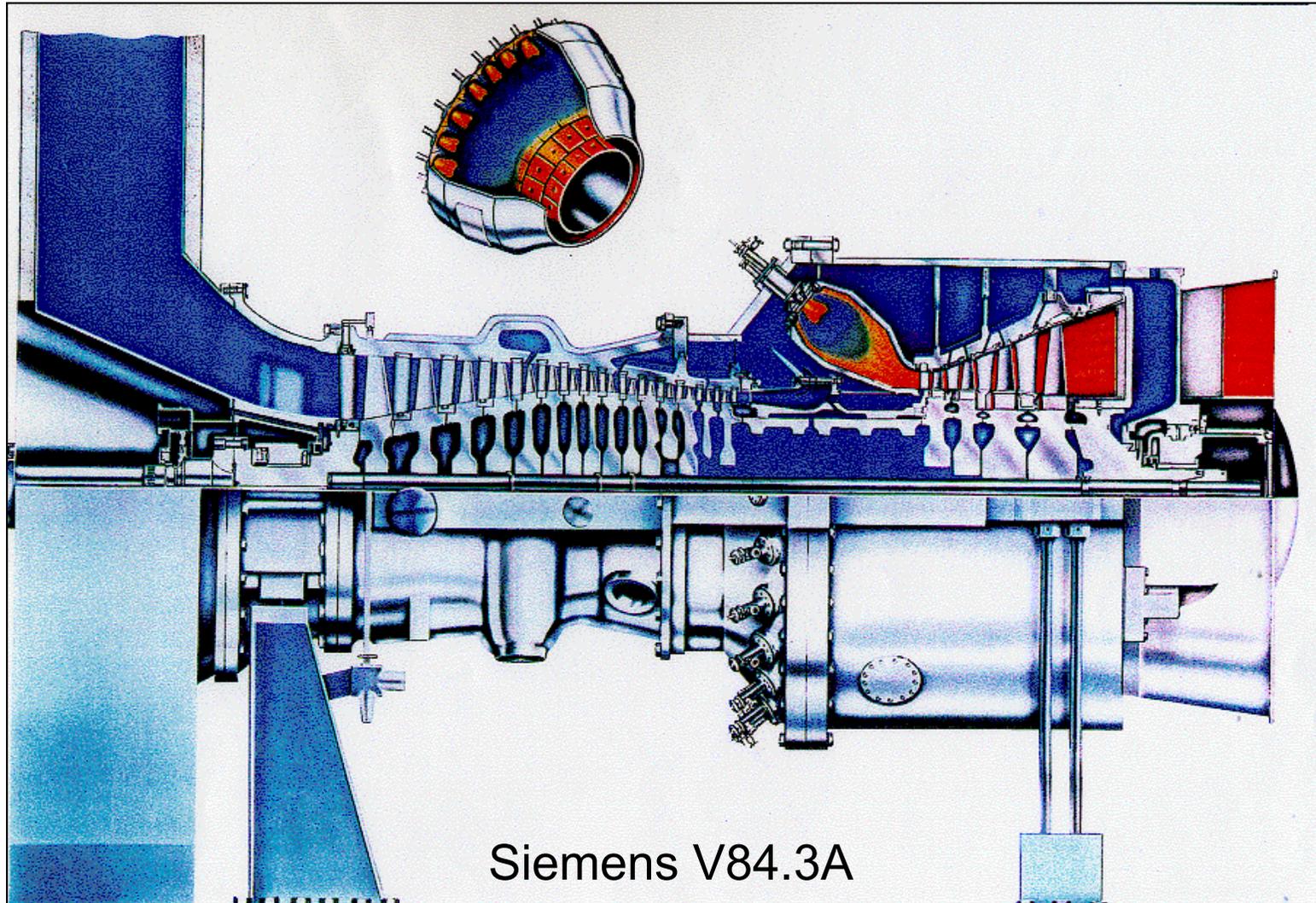
(*) Quellenangabe, siehe Literaturliste zu Beginn des Buches,
Abdruckgenehmigung vom Springer-Verlag und vom Autor

Beispiel: Flug-Gasturbine



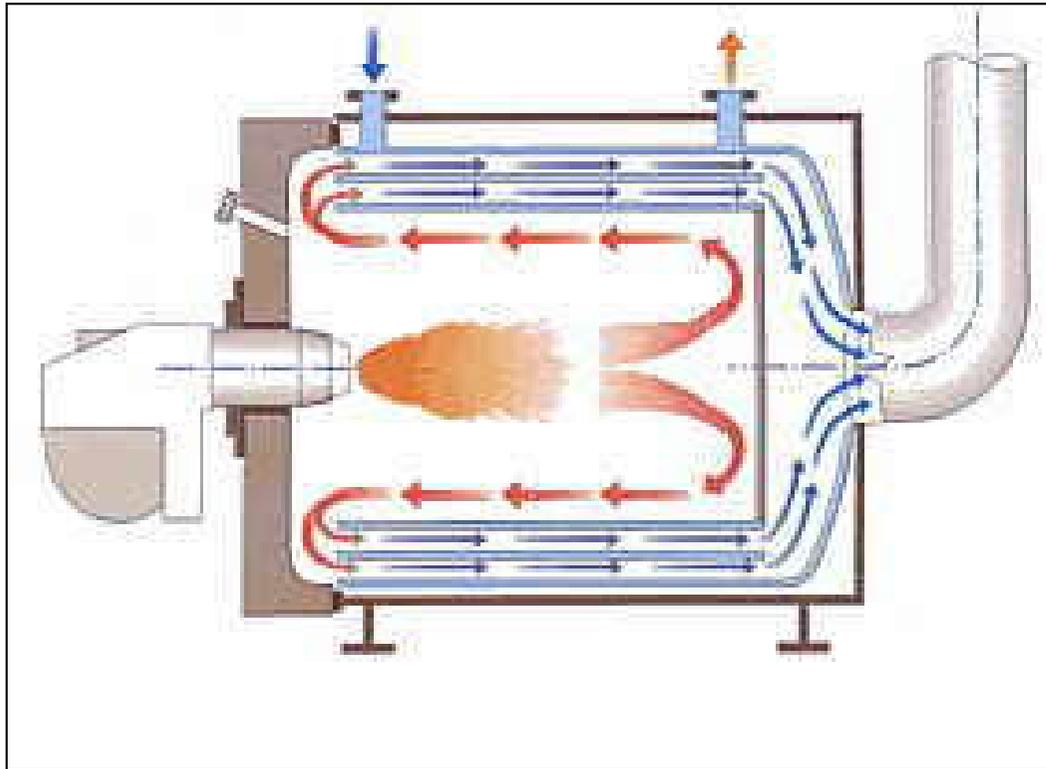
**Pratt & Whitney
F100-PW-229 Engine**
Flugtriebwerk mit Nachbrenner

Beispiel: Stationäre Gasturbine

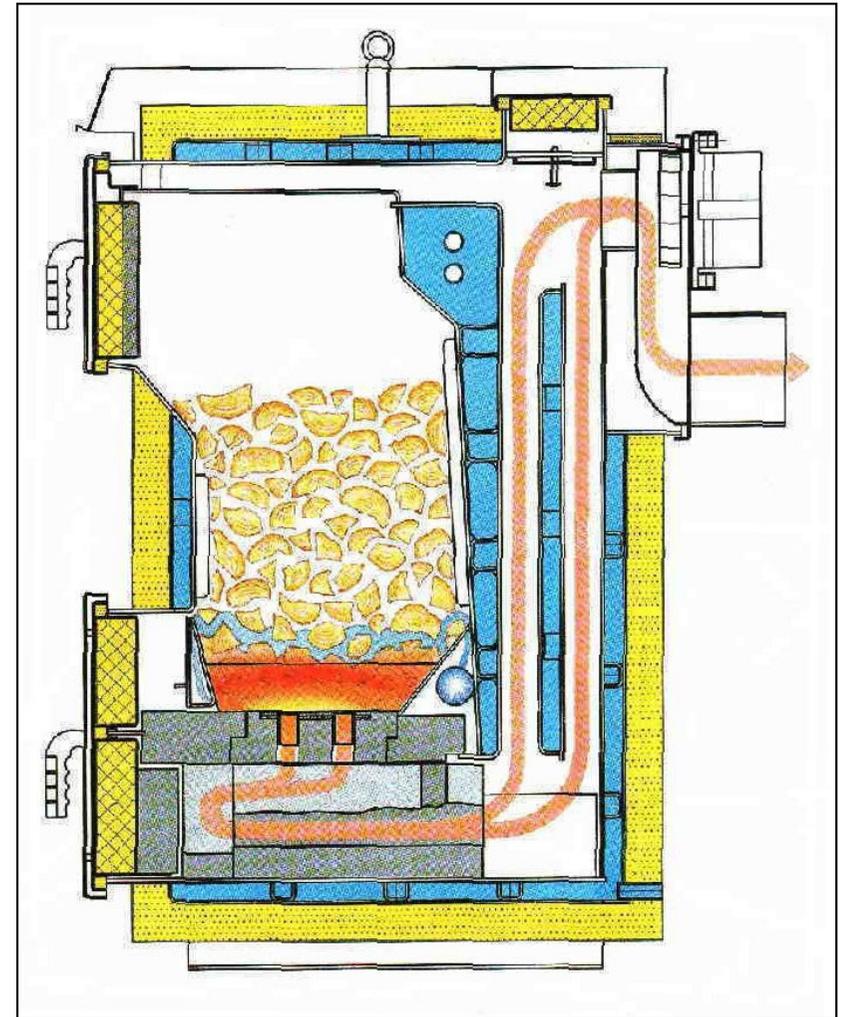


**Moderne Gasturbine mit Ringbrennkammer für vorgemischte Verbrennung:
→ NO_x unter 50 ppm ohne Rauchgasreinigung**

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_x - 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

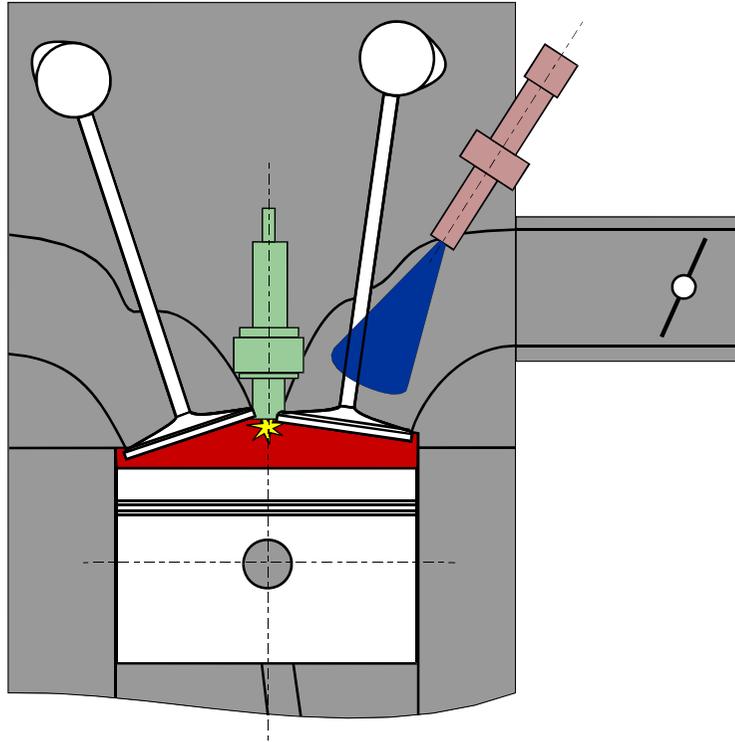
	laminar	turbulent
Diffusions- flamme	Kerze	Feuer, Industrieöfen, Fluggasturbine
Vormisch- flamme	Gasherd (tw. vorgemischt), Porenbrenner	Moderne Gastrubine

stationär

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

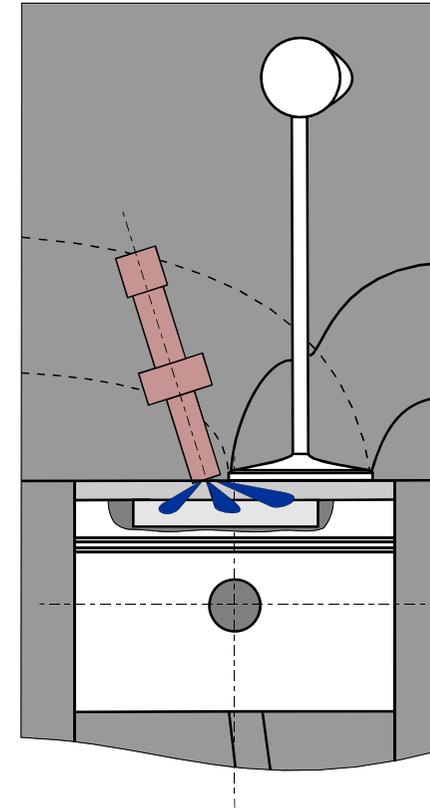
instationär

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

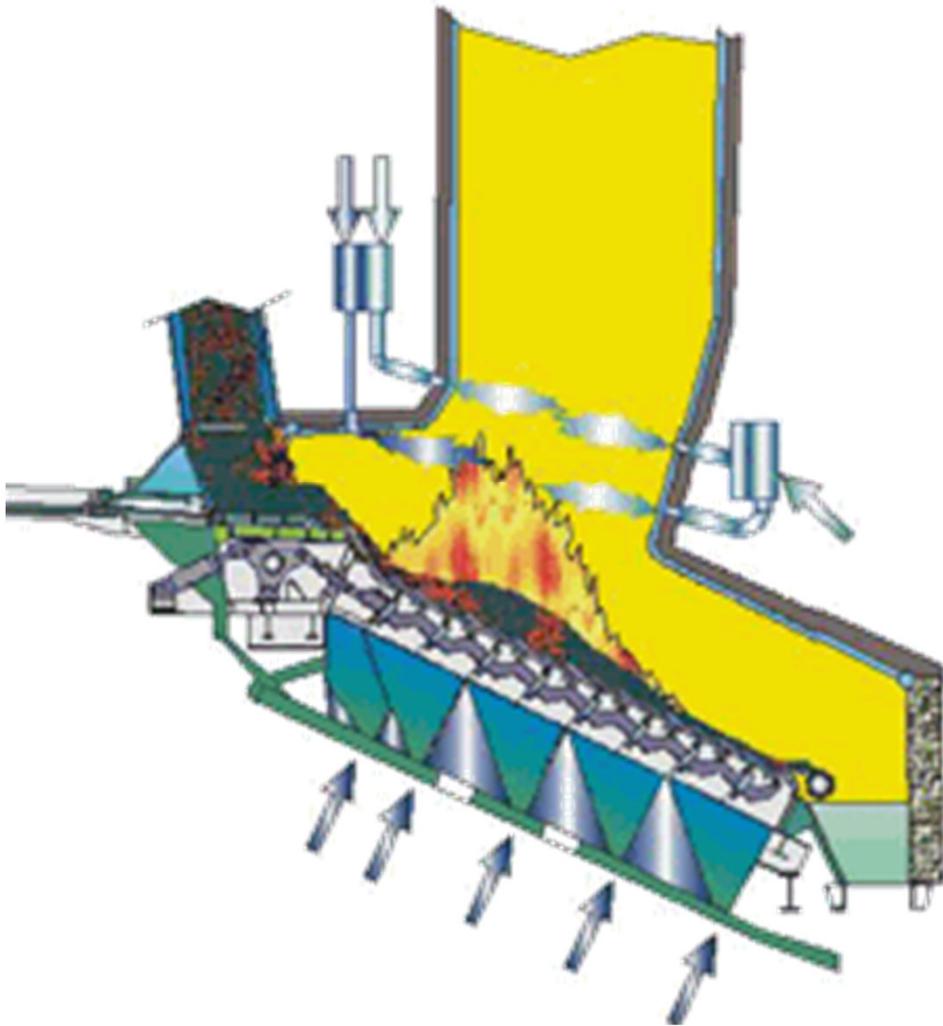
Flug-Gasturbine

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