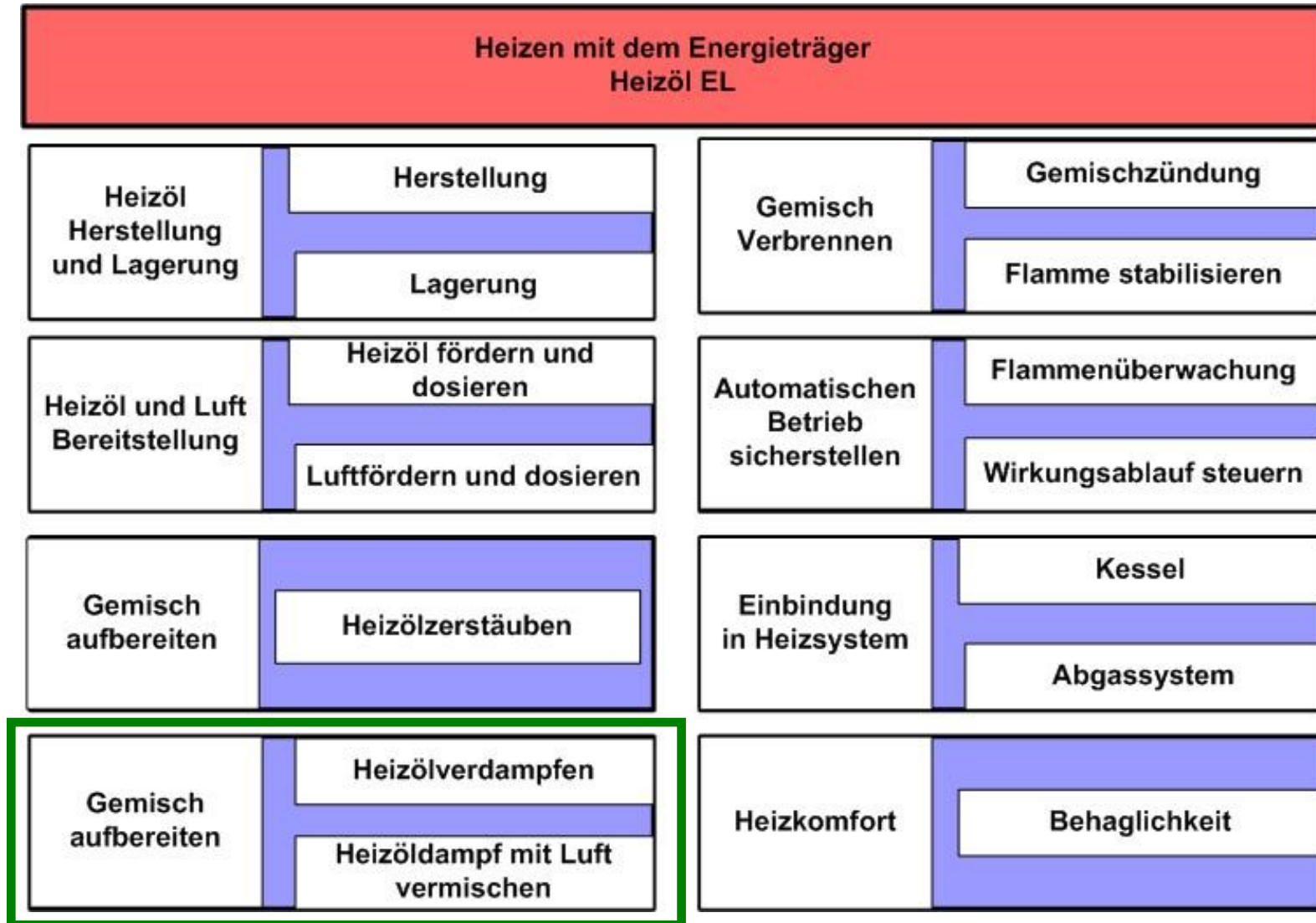


# Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

# Inhalte der Vorlesungen



# Verdampfung $\Leftrightarrow$ Verdunstung

Für die homogene Mischung Brennstoff/Luft ist zuerst eine vollständige Verdampfung des Brennstoffs notwendig.

## Verdampfung

Dampfdruck  $\approx$  Gesamtdruck,  
Neben der Dampfphase des  
verdampfenden Stoffes sind  
nur geringe Mengen anderer  
Gase vorhanden.

## Verdunstung

Dampfdruck  $\ll$  Gesamtdruck,  
Die Dampfphase des  
verdunstenden Stoffes stellt  
nur einen geringen Teil des  
gesamten Gasgemisches  
dar.

## Verdampfung des flüssigen Brennstoffes

**Direkte  
Verdampfung**

**Verdampfung  
im Abgasstrom**

**Verdampfung im  
inerten Medium**

**Verdampfung in vorgewärmter  
Verbrennungsluft**

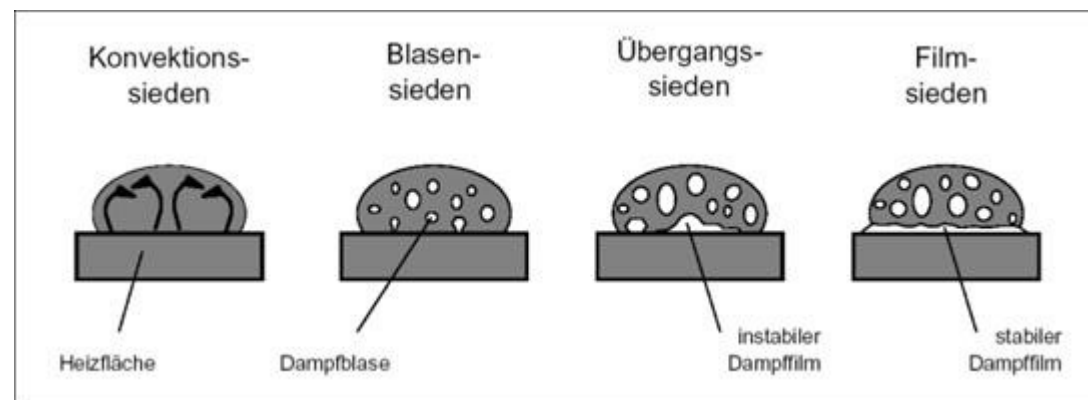
- Verdampfung ohne Vorreaktion
- Verdampfung mit Vorreaktion (Kalte Flamme)
- Verdampfung unter Ausnutzung des Verzugszeit

# Verdampfung

## Verdampfung auf heißer Oberfläche:

Je nach Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächen- und Flüssigkeitstemperatur unterscheidet man **4 Zustände**.

- Konvektionssieden
- Blasensieden
- Übergangssieden
- Filmsieden



[Dröschel 1998].

# Verdampfungsmöglichkeiten

## (A–B) Freie Konvektion:

kleine Temperaturdifferenzen  
Flüssigkeit erwärmt sich ohne Phasenänderung durch freie Konvektion.

## (B–C) Blasensieden:

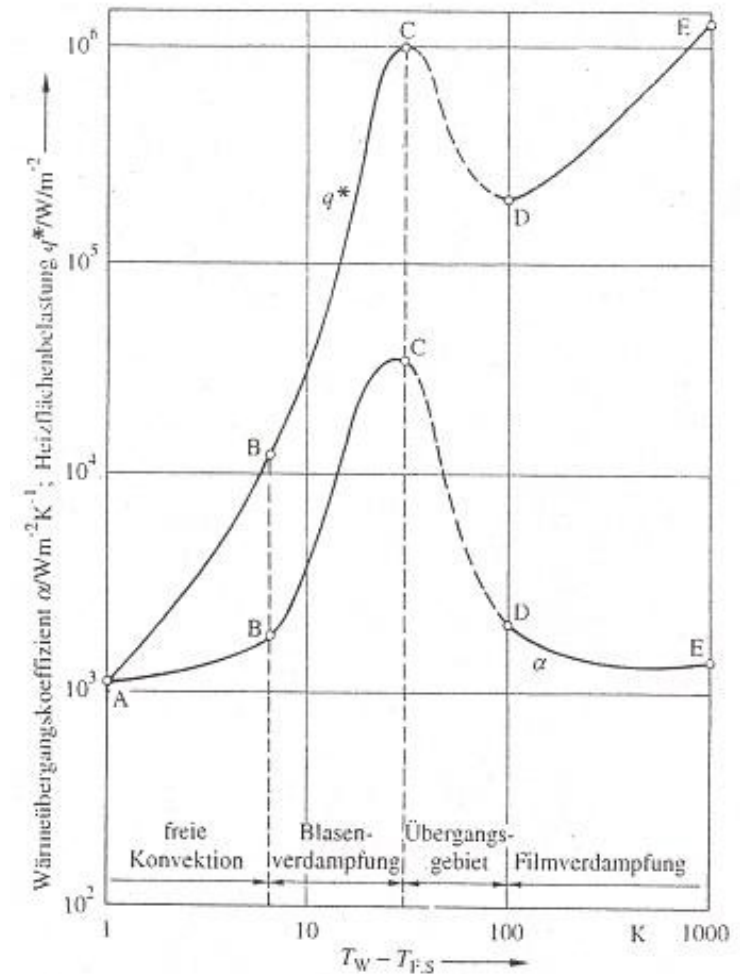
Bei weiterer Steigerung der Temperaturdifferenz bilden sich viele Blasen. Die Wärmeübergangskoeffizient auf verbessert sich auf Grund der besseren Durchmischung  
In diesem Bereich werden praktisch alle Verdampfer betrieben.

## (C–D) Übergangssieden:

Zusammenwachsen der Dampfblasen  
Es tritt auf der Heizfläche ein instabiler Dampfteil auf.

## (D–E) Filmsieden:

Mit weiter steigender Temperaturdifferenz bildet sich auf der Oberfläche ein stabiler, isolierender Dampfteil. Der Wärmeübergangskoeffizient wird dadurch kleiner.



Wärmeübergangskoeffizienten und Heizflächenbelastungen bei verschiedenen Siedezuständen.

# Direkte Verdampfung

## Bereich 1:

Die durchströmende Flüssigkeit wird zunächst mit einer kleinen Wärmeübergangskoeffizient erwärmt bis die ersten Blasen entstehen.

## Bereich 2:

Entwicklung der Blasen und damit Erhöhung der Wärmeübergang.

## Bereich 3:

Maximaler Wert der Wärmeübergangskoeffizient in Folge des Blasensiedens.

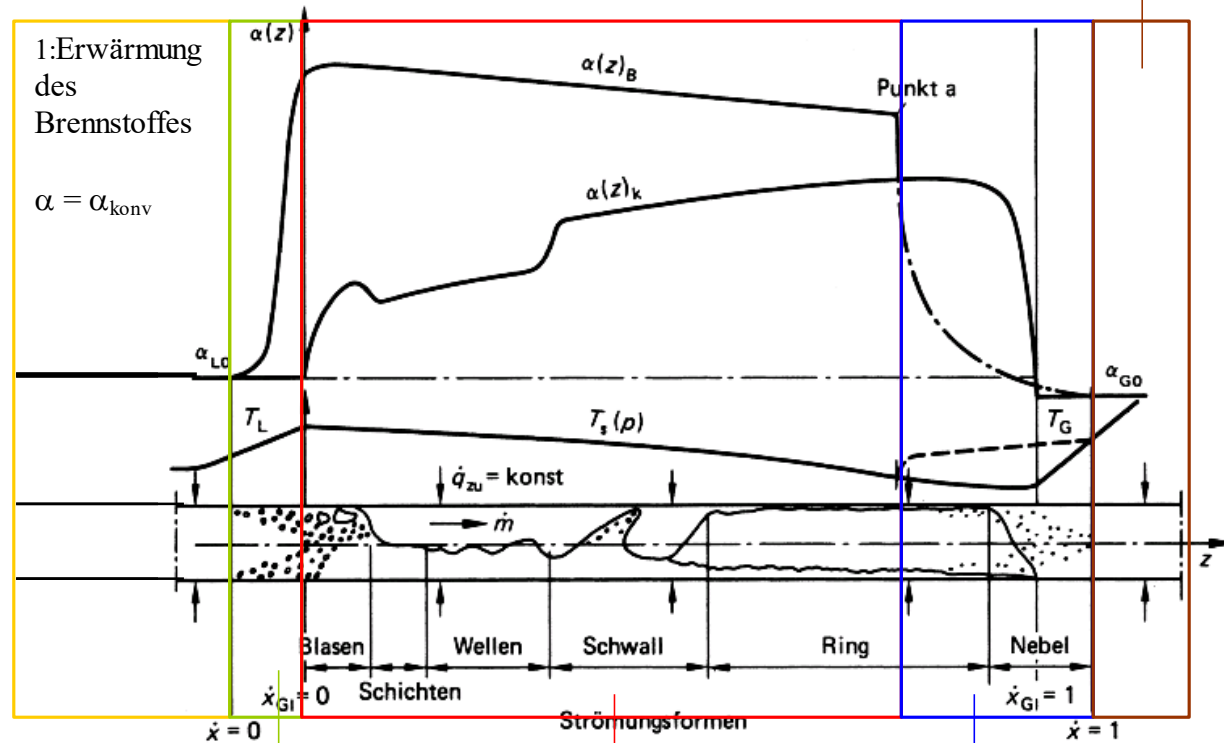
## Bereich 4:

Übergang zur Tröpfchenströmung. Der Wärmeübergangskoeffizient wird kleiner.

## Bereich 5:

Bei weiterer Wärmezufuhr wird der Dampf überhitzt

Verdampfung bei Strömung in einem beheizten Rohr



5: Dampfüberhitzung

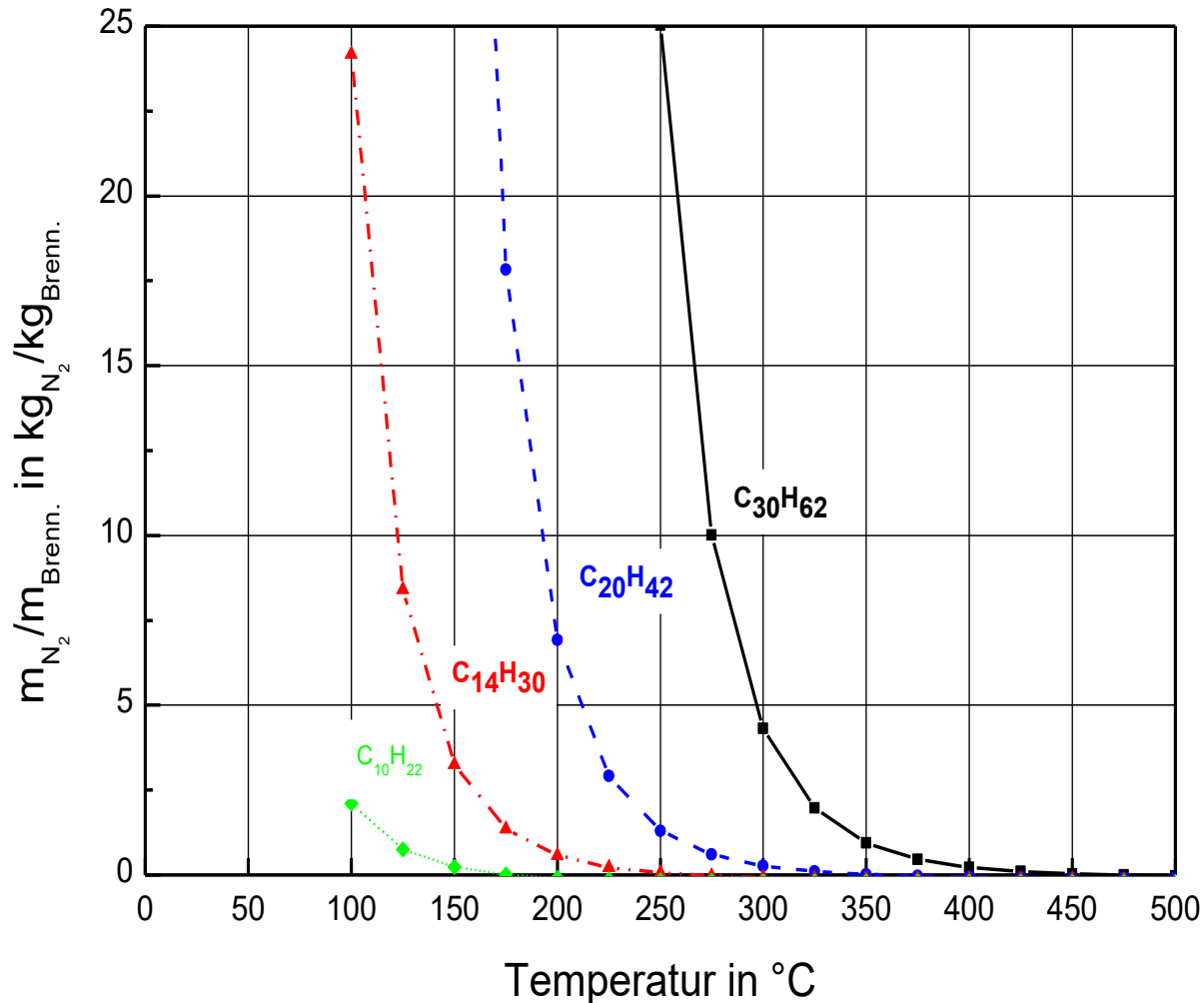
2: Beginn der Dampfentwicklung, der konvektive Wärmeübergang wird erhöht

3: Bereich des Blasensiedens mit max. Wärmeübergang  
 $\alpha = \alpha_{BS}$

4: Übergang zur Tröpfchenströmung mit stark reduziertem WÜK  
 $\alpha = \alpha_{TS}$

# Verdunstung im inerten Medium

Auf Grund des niedrigen Brennstoffpartialdrucks im Gemisch kann die Verdunstung bei niedrigeren Temperaturen stattfinden



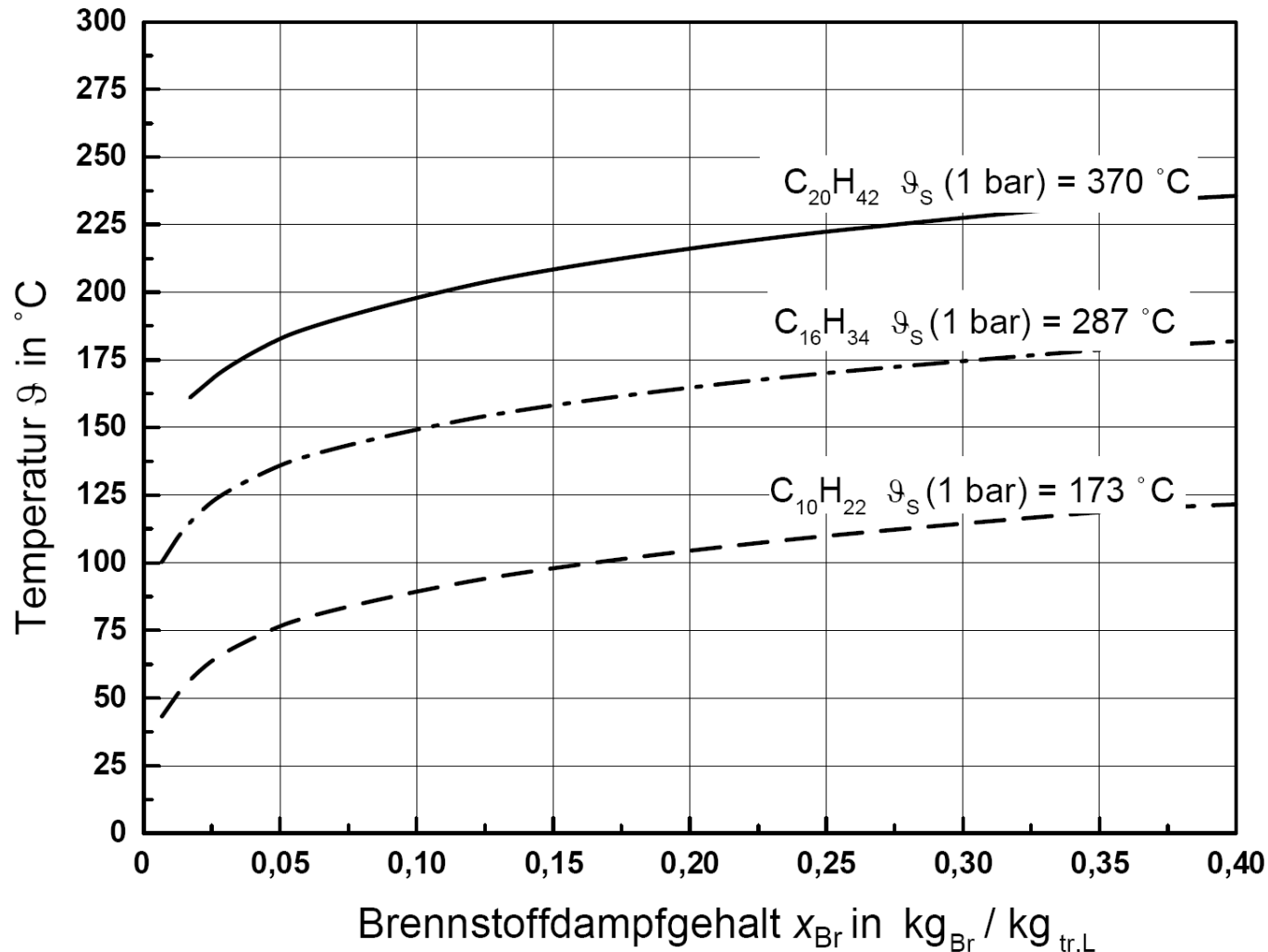
Paraffin Heptan ( $C_7H_{16}$ ) 98 °C	Olefin Hepten ( $C_7H_{14}$ ) 93 °C
Pentan ( $C_5H_{12}$ ) 36 °C	Dekan ( $C_{10}H_{22}$ ) 172 °C

Naphten Methylcyclohexan ( $C_7H_{14}$ ) 103 °C	Aromat Toluol ( $C_7H_8$ ) 110 °C
Pentadekan ( $C_{15}H_{32}$ ) 269 °C	Eicosan ( $C_{20}H_{42}$ ) 344 °C

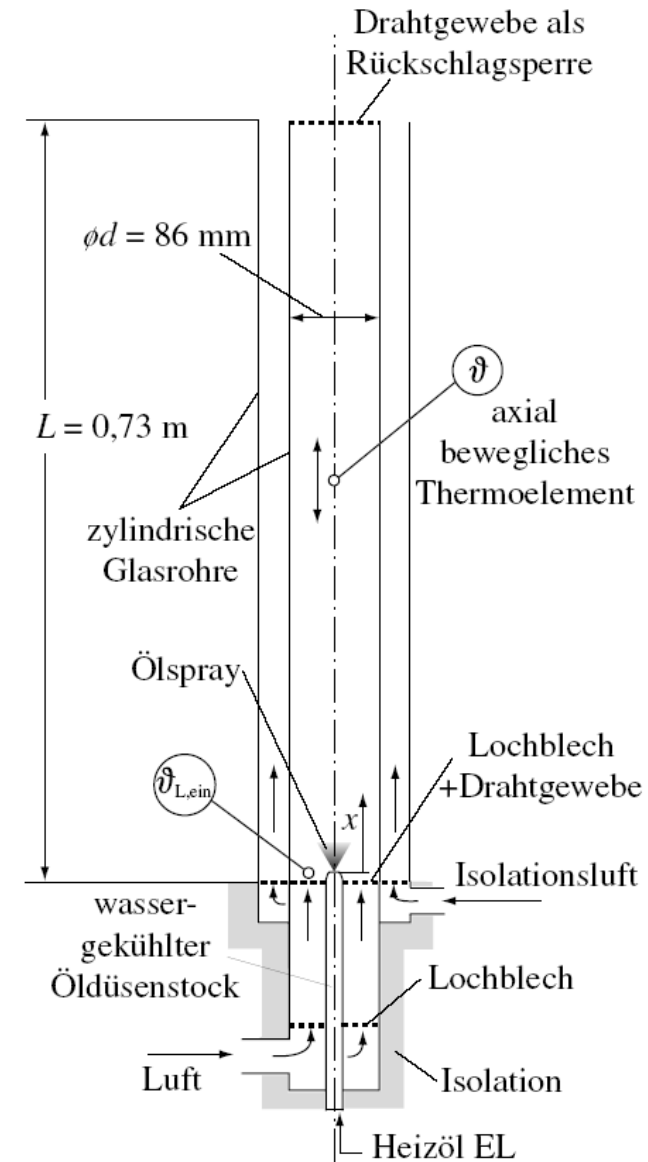
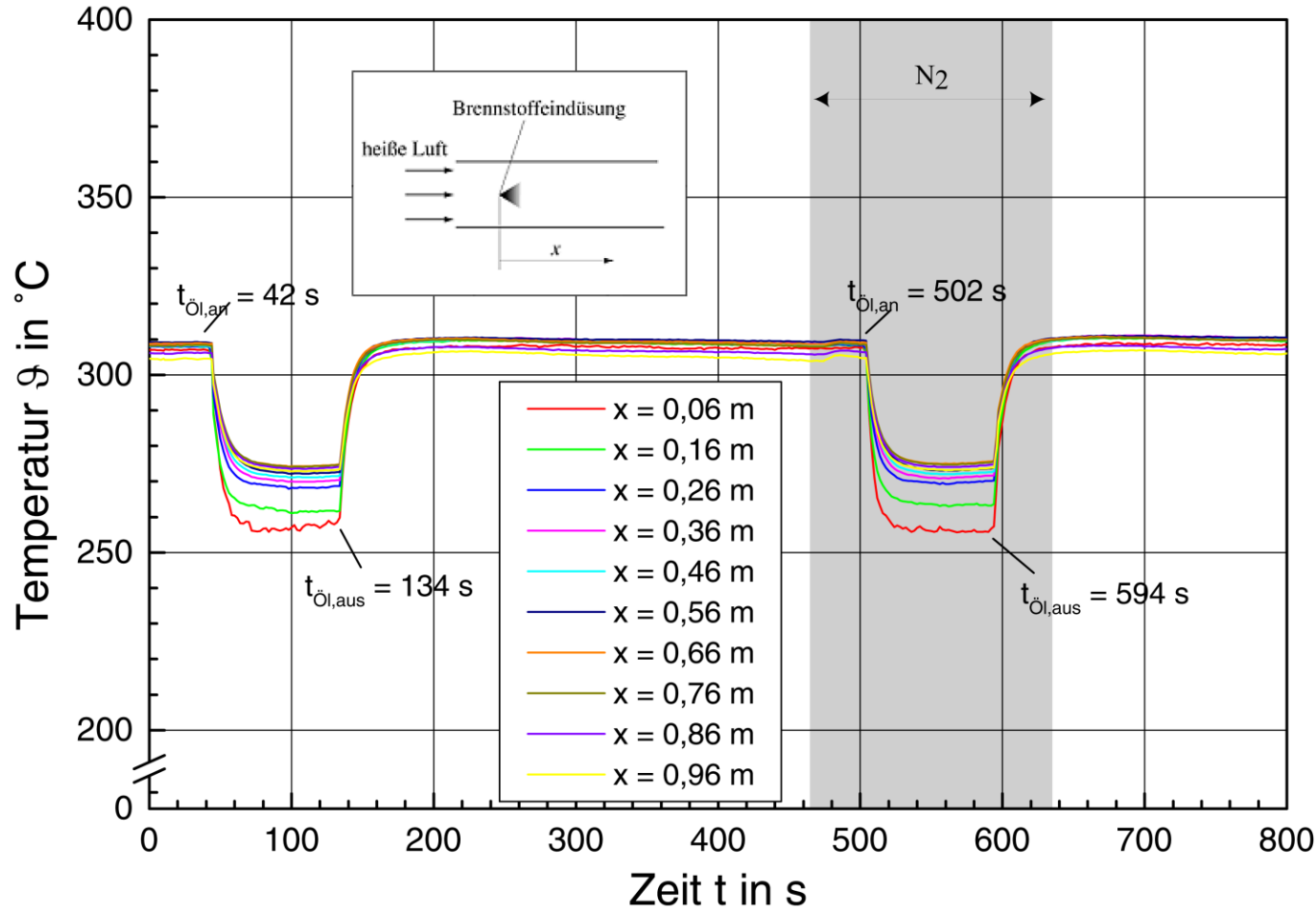
*Siedetemperaturen ausgewählter Kohlenwasserstoffe bei 1 bar [VDI 88]*

# Verdampfung in vorgewärmter Luft ohne Vorreaktionen

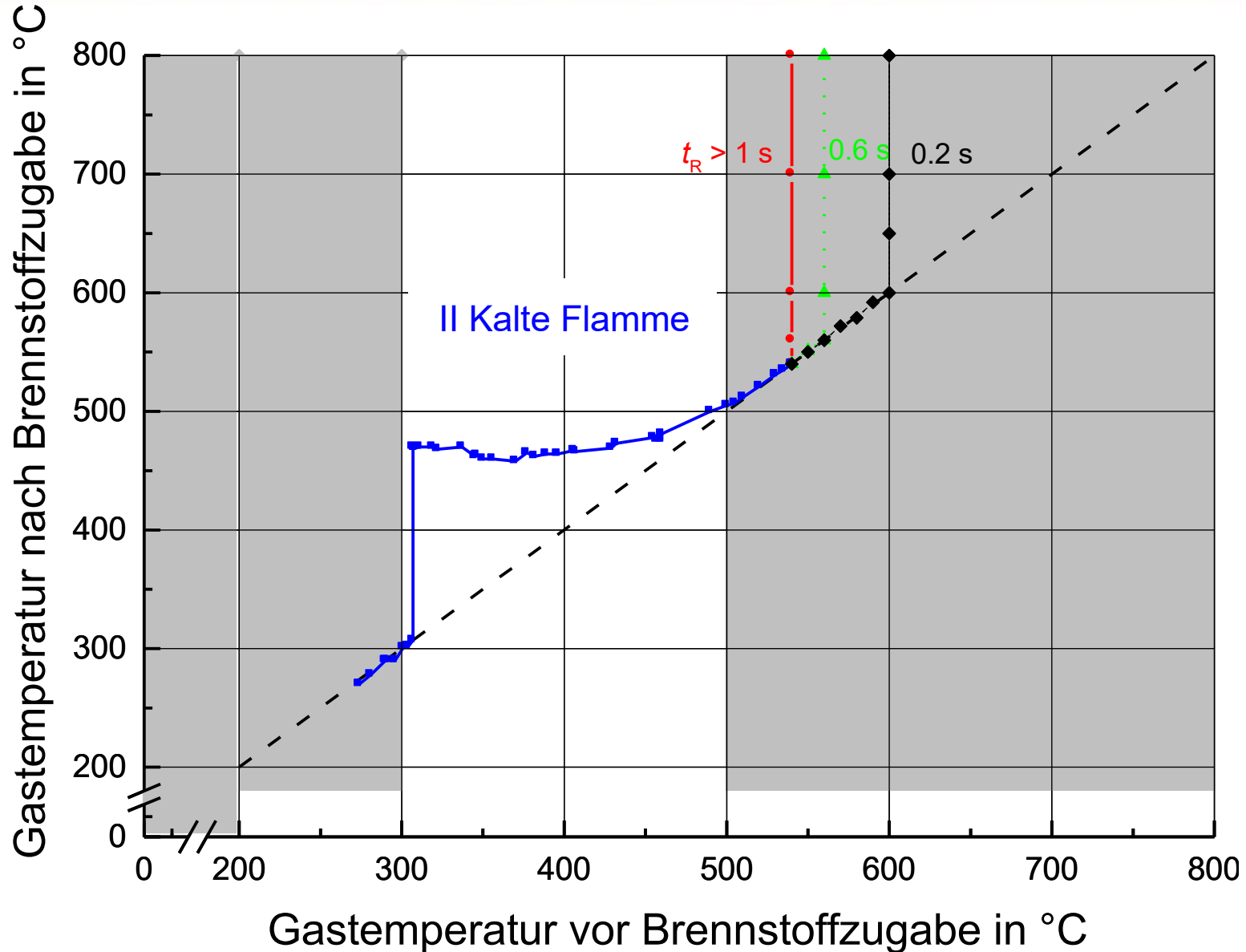
Auf Grund des niedrigen Brennstoffpartialdrucks im Gemisch kann die Verdunstung bei niedrigeren Temperaturen stattfinden



# Verdampfung in vorgewärmter Luft ohne Vorreaktionen



# Verdampfung in vorgewärmter Luft mit Vorreaktionen



# Bewertung

Medium	Inert N <sub>2</sub> / Abgas (O <sub>2</sub> -frei)		Direktverdampfung reiner Brennstoff
<b>Eigenschaften</b>			
Prozessführung	endotherm		endotherm
Vollständige Verdampfung	ja		ja
Temperaturbereich	frei		frei
Zündfähigkeit	Nicht zündfähig		Nicht zündfähig
Eduktbeeinflussung	nein		nein
Mischung mit Oxidator	notwendig		notwendig
Modulation	eingeschränkt		eingeschränkt
<b>Anwendungen</b>	Sättiger Reformer		Freemix Technik [Herrmann]
Medium	Luft *bei 1 bar		
<b>Eigenschaften</b>			
Prozessführung	endotherm	exotherm	neutral
Vollständige Verdampfung	nein	ja	ja
Temperaturbereich	<300°C *	300°C bis 480°C *	>500°C *
Zündfähigkeit	fremdzündfähig	fremdzündfähig	selbstzündend
Eduktbeeinflussung	nein	ja	geringfügig
Mischung mit Oxidator	nicht notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig
Modulation	eingeschränkt	nicht eingeschränkt	eingeschränkt
<b>Anwendungen</b>	Aerosolbrenner [Schilling]	Kompaktbrenner [IWO]	Blaubrenner
	Strahlungsbrenner [IWO]	Reformer [IWO]	Verdampfungsbrenner [IWO]
		Porenbrenner [DBU]	FLOX [Wünning]

# Ablagerungsbildung

## Einflussparameter der Ablagerungsbildung

### Chemische Parameter

Zusammensetzung

Sauerstoffgehalt  
des Kraftstoffes

### Physikalische Parameter

Druck

Strömungsfeld

Temperatur

**T > 500 °C**  
**pyrolytische Ablagerungen** durch  
Crackreaktionen

**T > 150 °C**  
**Autooxidation** der Kohlenwasserstoffe  
mit dem im Kraftstoff gelöstem  
Sauerstoff

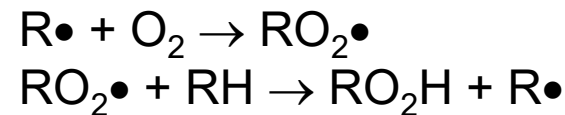
## Autooxidation der Kohlenwasserstoffe

Die Autooxidation läuft als eine Serie von Kettenreaktionen der freien Radikale ab und es bilden sich als Produkt gummiartige Beläge. [Behrens 1998]:

Startreaktion:



Fortpflanzung:



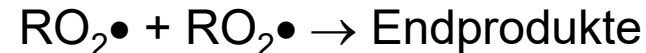
Beschleunigungsreaktion:



Gumbildung:



Abbruch:



Bildung fester Partikel:



A• ist der Precursor für die Ablagerung.

## Pyrolyse (Coking, Verkoken):

findet oberhalb einer Temperatur von 500 °C durch Crackreaktionen statt und beginnt mit der Bildung von Gasen im Kraftstoff [Behrens 1998].

Bei der Ablagerungsbildung durch Pyrolyse unterscheidet man 3 unterschiedliche Morphologien der Beläge:

- Faserförmig
- Amorph
- Graphitisch [Baker 1996].

Die Ablagerungsmenge verschiedener Kohlenstoffbeläge ist von der Temperatur abhängig.

## **Druck:**

Bei hohen Drücken ( $\sim 3,45$  MPa) wird die Ablagerungsmenge kleiner [Kirklin 1992]. Auf der anderen Seite ist die Vermeidung der Verdampfung durch erhöhten Druck empfohlen, da die Phasenänderung die Ablagerungsvorgänge beeinflussen kann. Außerdem senken superkritische Konditionen (Supercritical Conditions) die Ablagerungsbildung auf der Kontaktfläche durch eine hohe Löslichkeit des Kraftstoffes.

## **Strömungsfeld:**

Bei Versuchen mit JP-5 Kraftstoff wurde herausgefunden, dass die Ablagerungsrate bei niedrigen Reynoldszahlen größer ist [Kirklin 1992]. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist oberhalb von  $0,3$  m/s gering und sehr viel höher bei niedrigeren Geschwindigkeiten.

## **Sauerstoffgehalt:**

Entfernen des gelösten Sauerstoffes senkt die Ablagerungsrate vieler Kraftstoffe drastisch.

## **Zusammensetzung des Kraftstoffes:**

Die Zusammensetzung sowie die Anwesenheit der Heteroatome (N, S, O) beeinflussen die Oxidationsprozesse des Kraftstoffes [Rawson 2001].

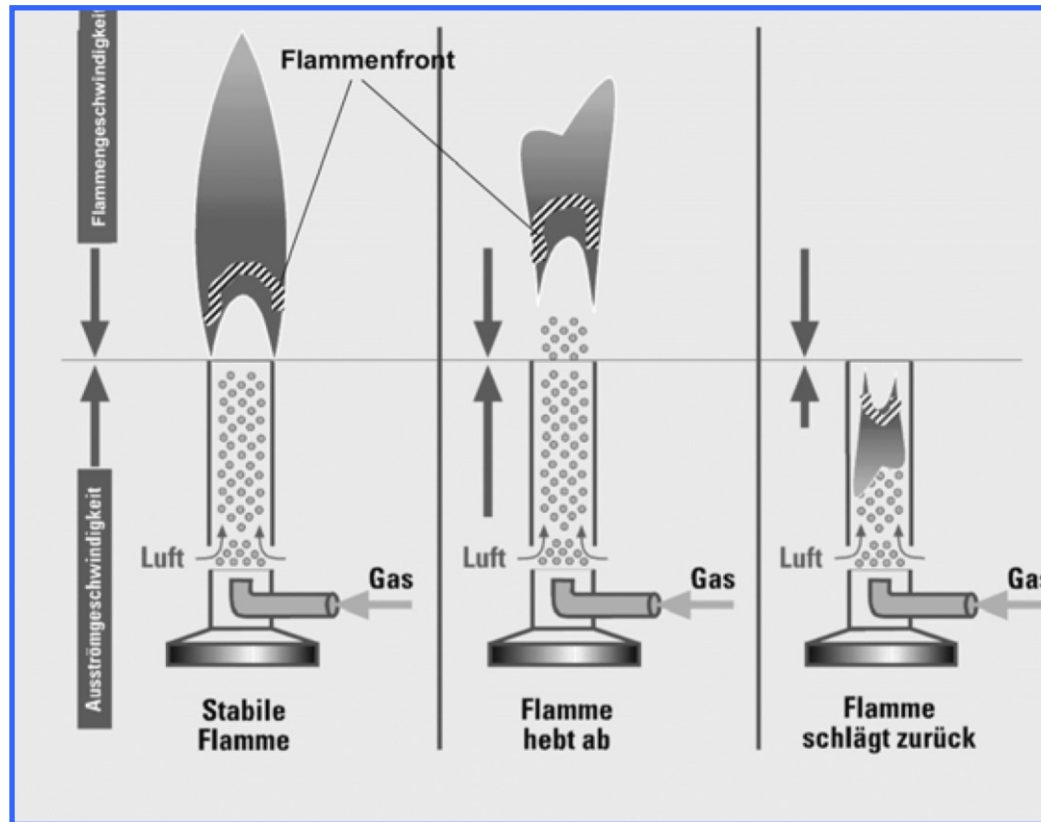
Die Quelle des Rohöls und die Raffinierungsprozesse entscheiden über die Stabilität eines Kraftstoffes. Entfernung der polaren Komponenten (N, S und O) verbessert die thermische oxidative Stabilität vieler Kraftstoffe.

Die polaren Komponenten führen zu polaren Produkten mit geringer Löslichkeit während der Ablagerungsbildung. Hydrierungsprozesse haben den größten Einfluss auf die Stabilität. Die im Kraftstoff gelösten Metalle und das Material der durchströmten Oberfläche erhöhen die Ablagerungsrate durch katalytische Effekte [Behrens 1998].

**Ende Vorlesung 7**

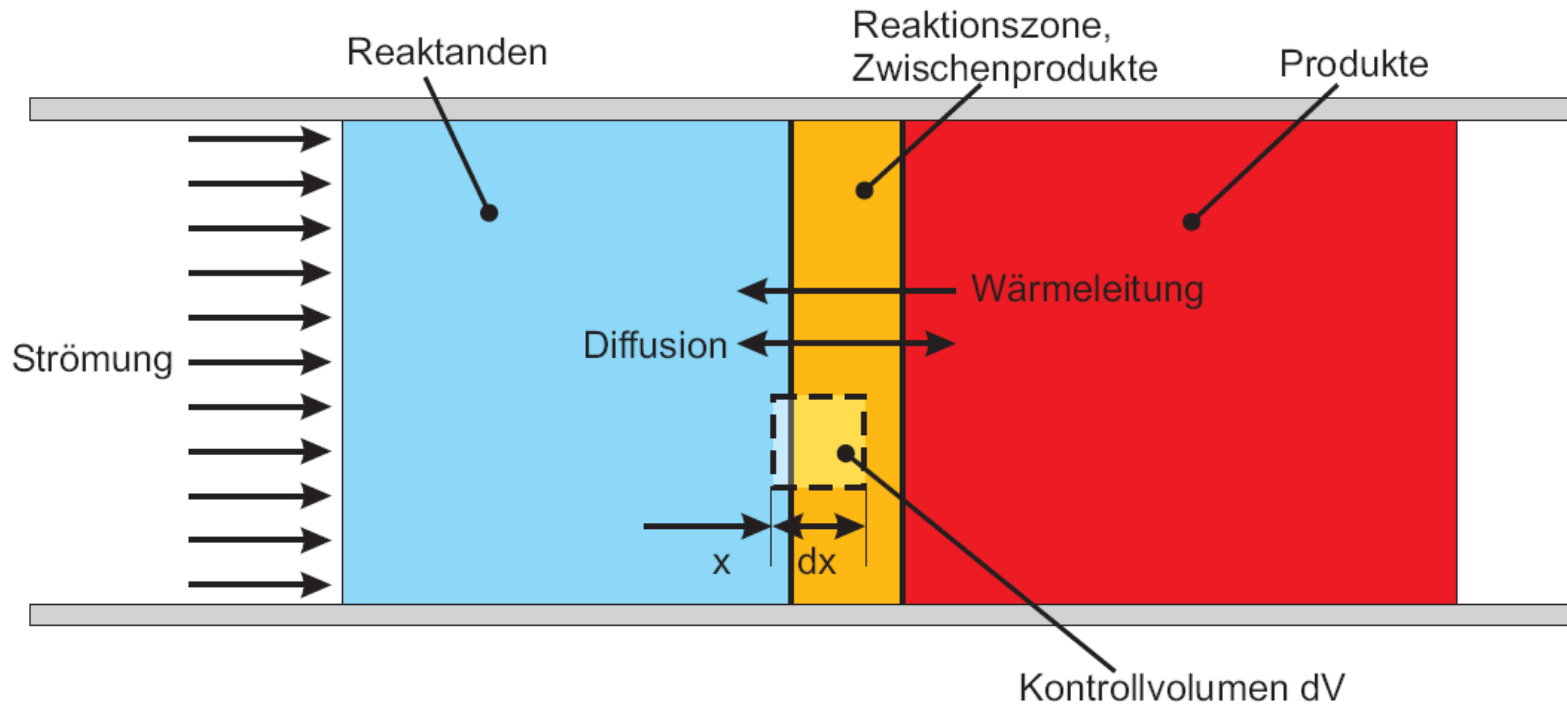
# Laminare Vormischflamme

Als **Brenngeschwindigkeit** bezeichnet man die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine Verbrennungsfront in einem Brennstoff-Luftgemisch fortpflanzt.



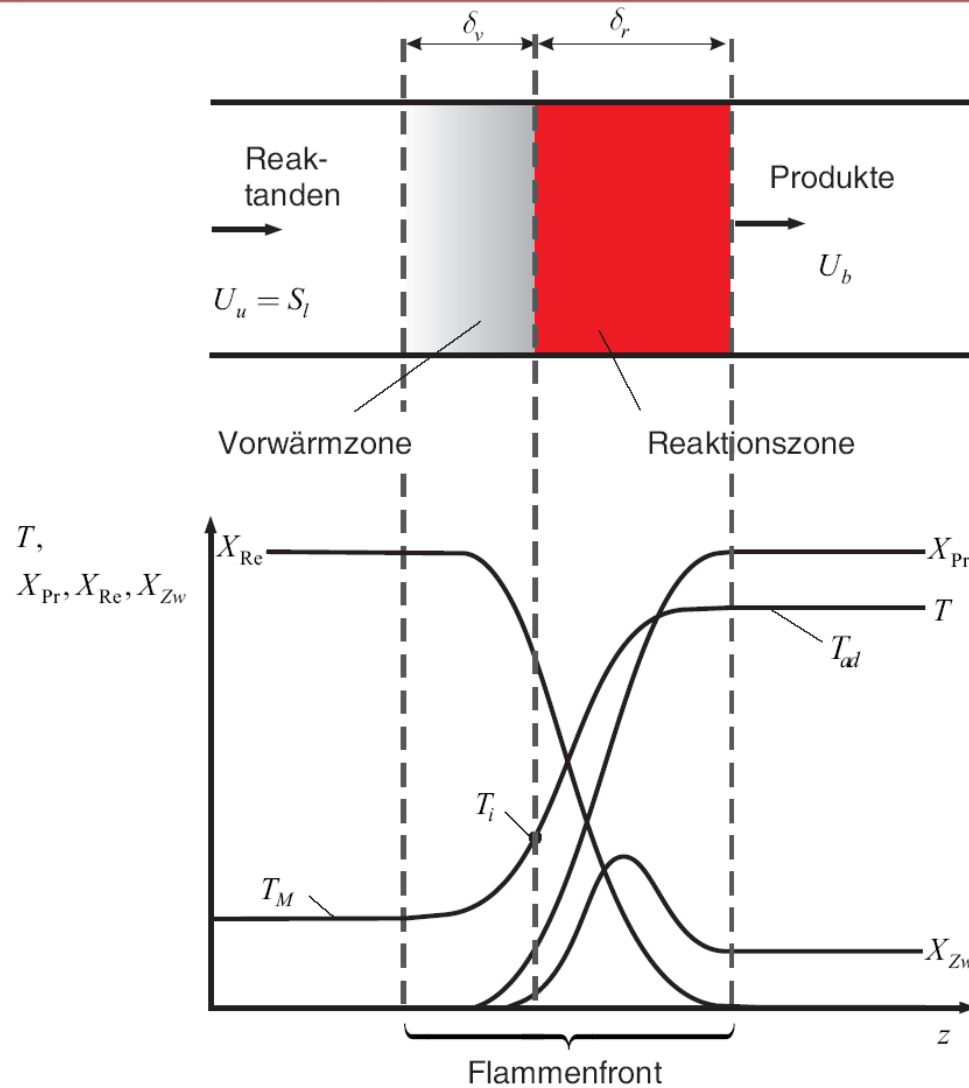
Position der Flamme eines Bunsenbrenners in Abhängigkeit von Zuström- und Brenngeschwindigkeit

# Laminare Flammenfront



Transportschema an einer stationären laminaren Flammenfront in einer eindimensionalen Rohrströmung.

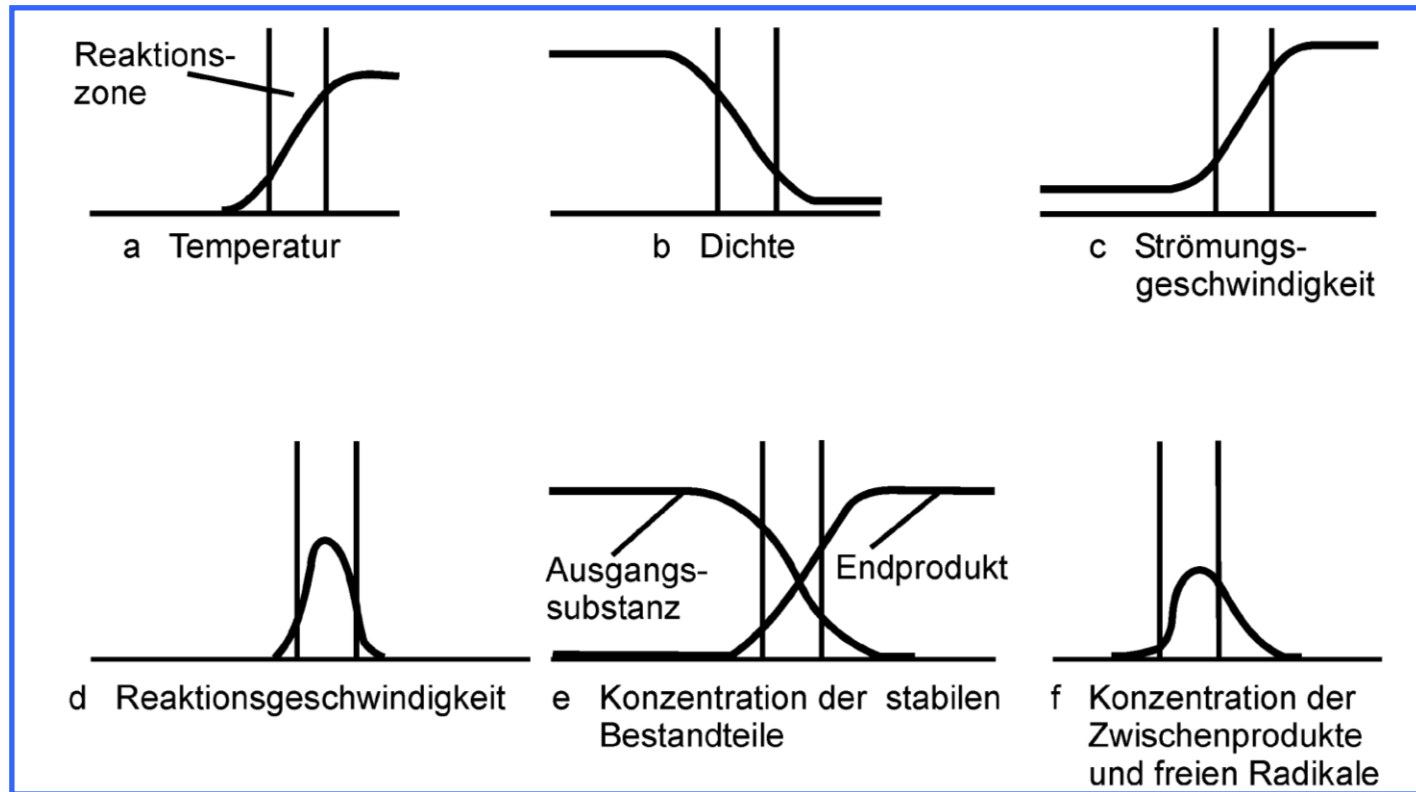
# Laminare Flammenfront



Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs  $T$  und der Molenbruchverläufe von Frischgemisch  $X_{Re}$ , Reaktionsprodukten  $X_{Pr}$  und Zwischenprodukten  $X_{Zw}$  in einer ebenen adiabaten laminaren Flammenfront.

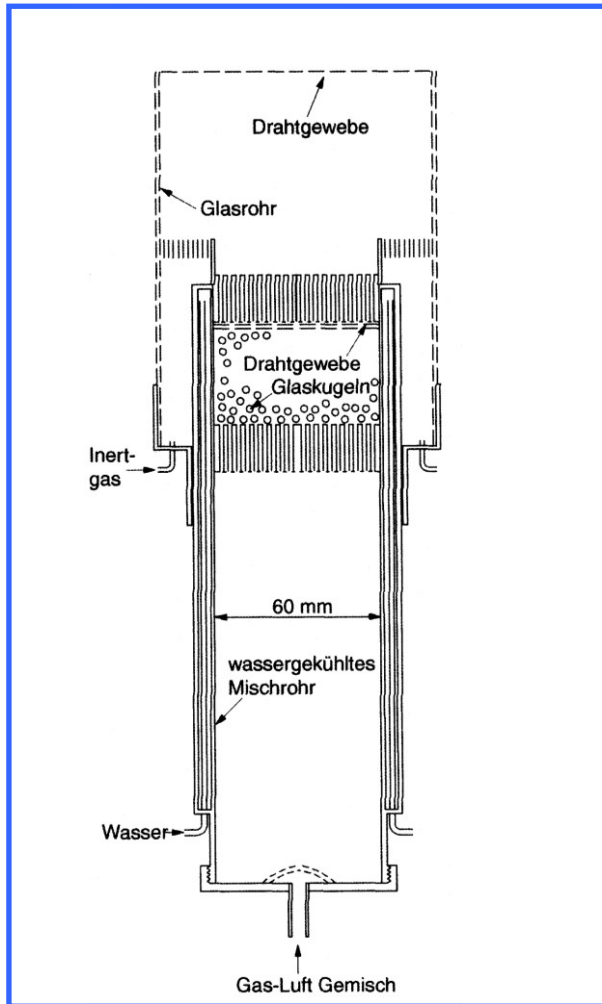
# Laminare Vormischflamme

In der Vorwärmzone wird dem Gemisch Energie zugeführt, so dass es schließlich die Zündtemperatur erreicht und zu reagieren beginnt. Mit schnell steigender Temperatur wird die Reaktion in einer sehr dünnen Schicht weitgehend abgeschlossen.

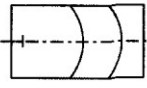
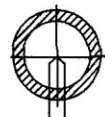
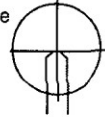
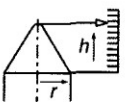

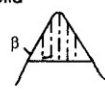
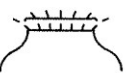



Verlauf der Eigenschaften und der Zusammensetzung des Gemisches auf dem Weg durch die Flammenfront

# Brenngeschwindigkeit



$$S_I = S_M$$

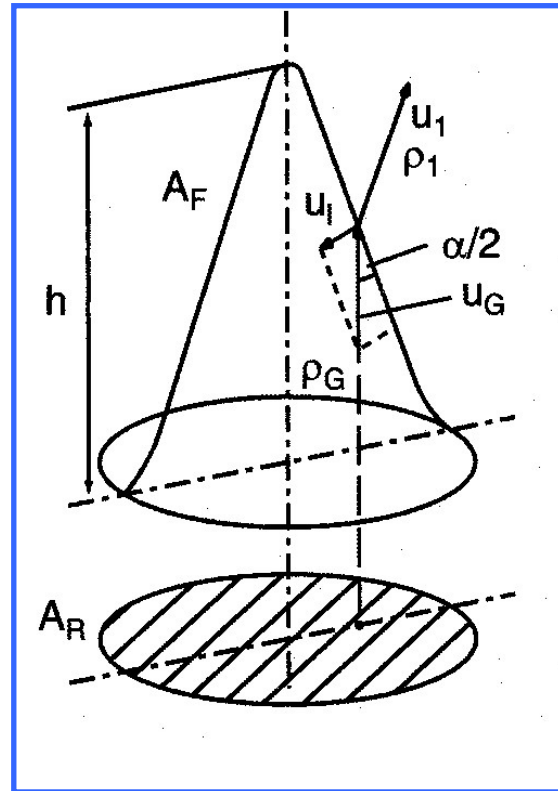
Methode	Beobachtung	Fehler
Rohr 	Laufzeit zwischen zwei Punkten Fotografisch Fotozellen Ionisationssonden	Druckanstieg Wandeffluss
Bombe 	$V = \text{const.}$ Druckanstieg Fotografisch	3-dimensionale Ausbreitung erfordert genaue Zeitmessung Wandeffluss Zündenergie
Seifenblase (Gummi-) 	$p = \text{const.}$ Durchmesserzunahme Fotografisch	3-dimensionale Ausbreitung erfordert genaue Zeitmessung
Kegelhöhe 	Höhenmessung $u_t = u_0 \sqrt{\frac{r}{r^2 + h^2}}$	Proportionalität $h/u_t$ unsicher wegen Spitzenanomalie
Kegelfläche 	Flammenfläche aus Fotografie $A_f \cdot u_t = A_n \cdot u_0$	Verfahren liefert mittleres $u_t$ über Gesamtfläche
Schlierenbild 	$\beta$ aus Schlierenbild $u$ aus Teilchenspuren $u_t = u_0 \cdot \sin \beta$	Flammenkrümmung bei Düsendurchmesser $< 12 \text{ mm}$
Flachflamme 	$u_0 = u_t$ $u_0$ aus Teilchenspuren	Stabilisierung schwierig keine Störung durch Krümmung, Wärmeverlust und Konzentrationsänderung
Flachflamme 	$u_0 = u_t$ $u_0$ aus Volumenstrom oder Teilchenspuren	Wärmeverlust an den Brenner

## Experimentelle Methode zur Messung der Brenngeschwindigkeit

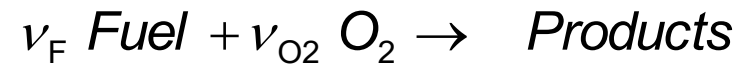
$$s_l = s_M \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$s_l = s_M \frac{A_R}{A_F}$$

$$s_l = s_M \frac{D}{\sqrt{D^2 + 4h^2}}$$



## Brutto Reaktionsgleichung

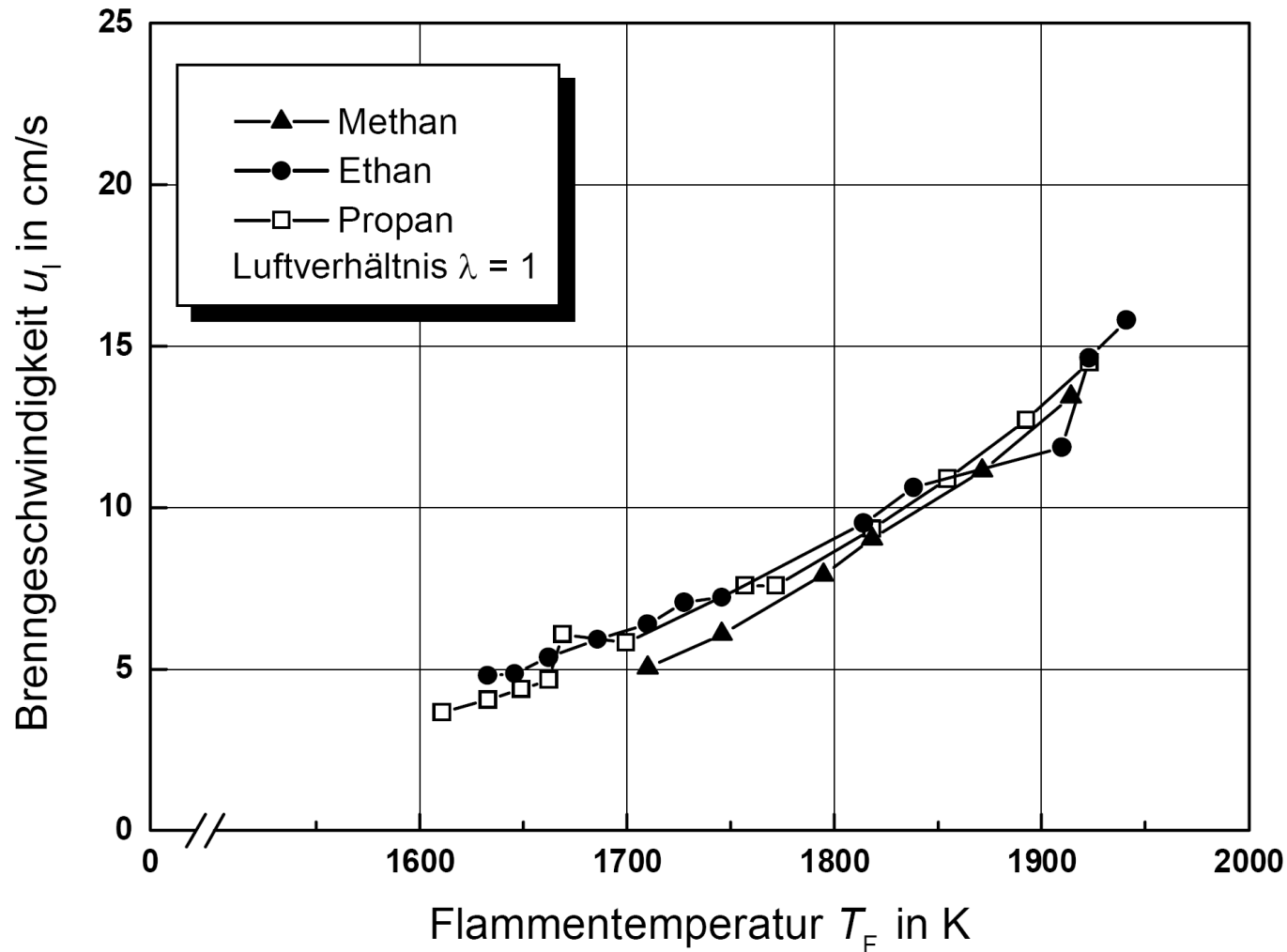


Arrhenius:

$$\frac{dc_F}{dt} = -k c_{Br}^{\nu_F} c_{O_2}^{\nu_{O_2}} e^{-\frac{E}{RT}}$$

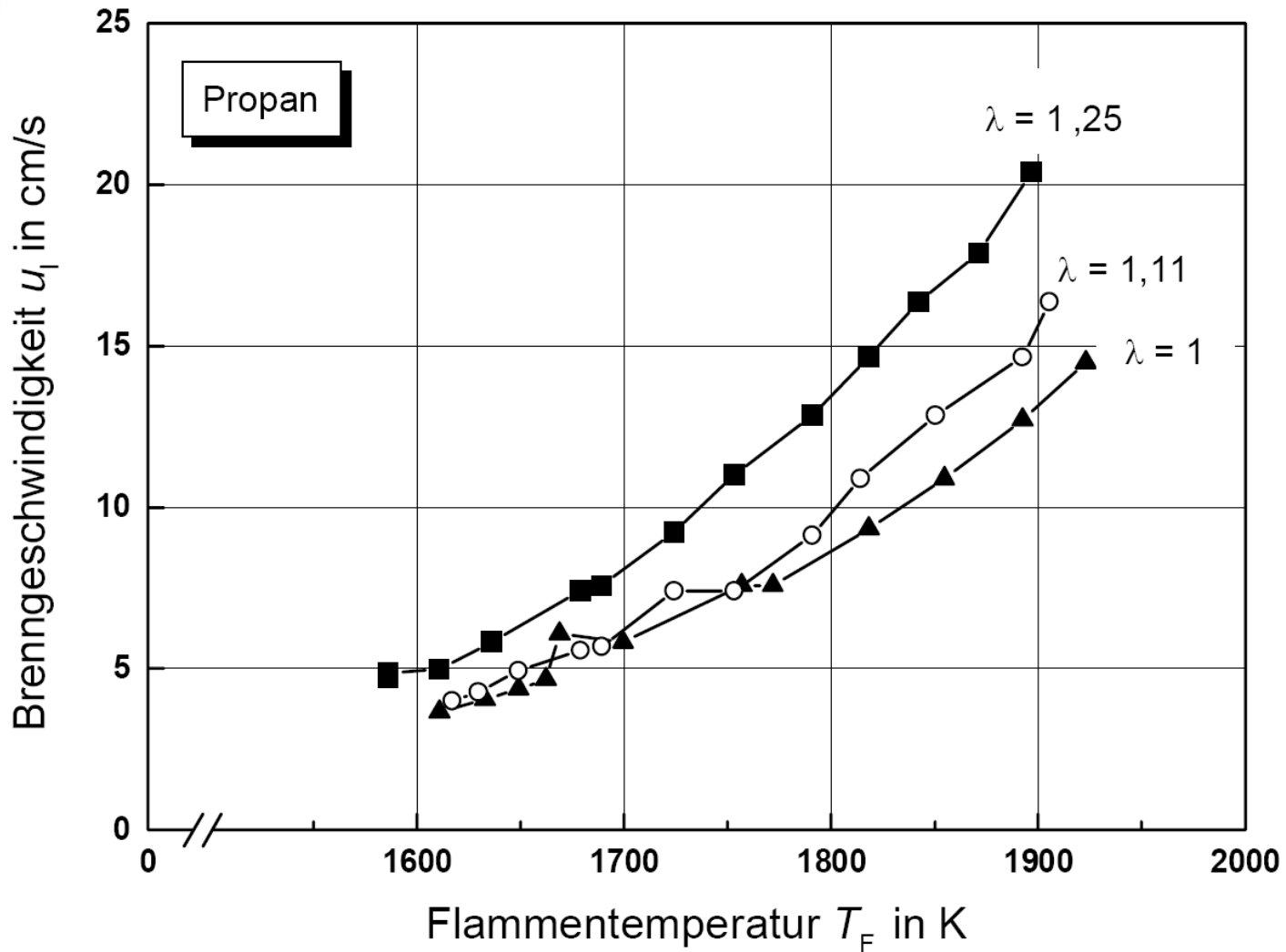
$$\Rightarrow s = -f(T_F, \lambda)$$

# Laminare Vormischflamme



Vergleich gemessener Brenngeschwindigkeiten verschiedener Brennstoffe

# Brenngeschwindigkeit



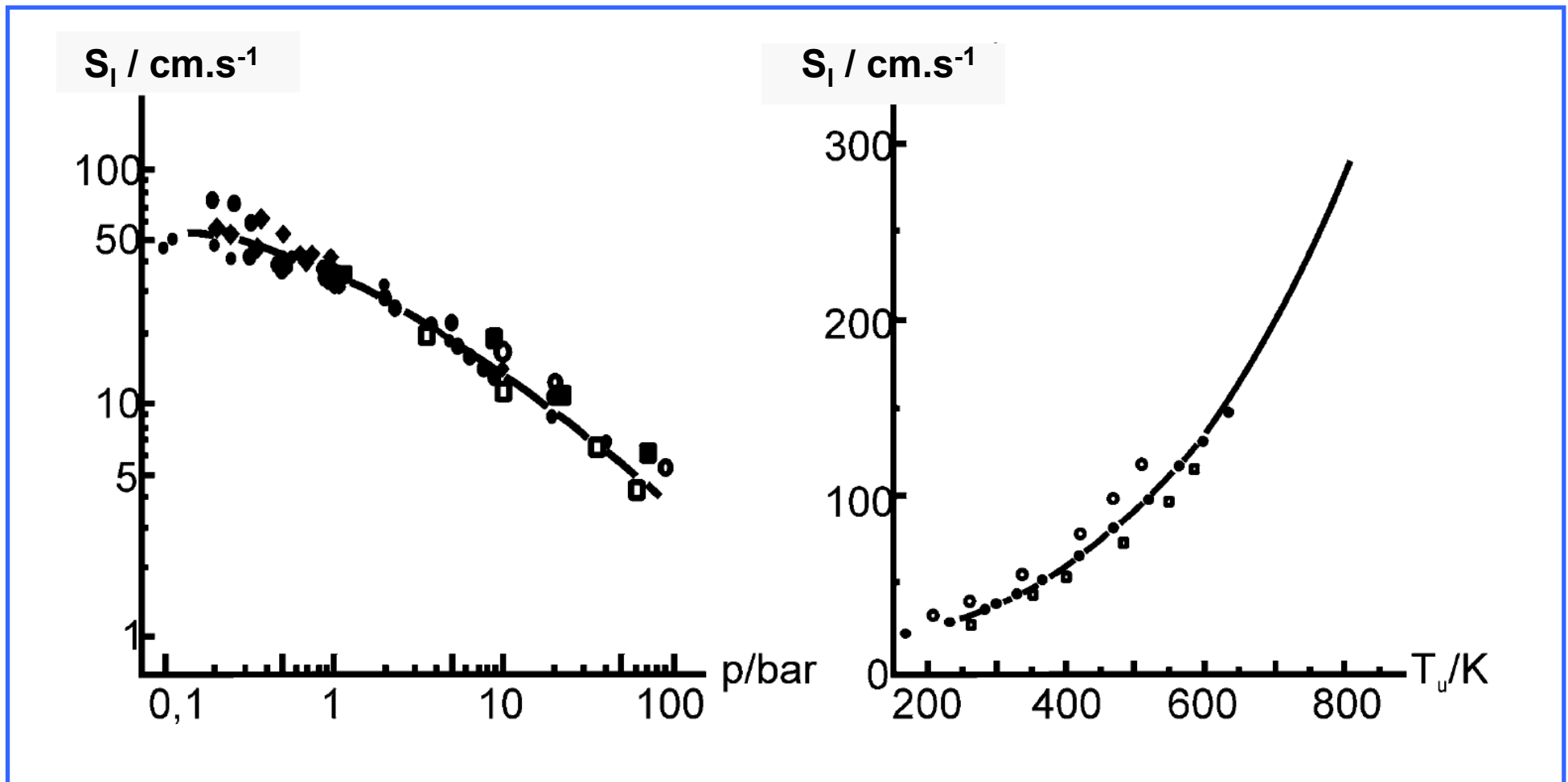
Gemessene Brenngeschwindigkeiten von Propan-Luft-Gemischen

# Brenngeschwindigkeit

Stoff	$\Lambda_{\max}$ [cm/s]	$c_{\max}$ [Vol. %]	$\Lambda_{\text{et}}$ [cm/s]	$c_{\text{et}}$ [Vol. %]
Methan	43,0	10,17	42,0	9,5
Ethan	48,7	5,99	47,6	5,64
Propan	47,2	4,27	46,0	4,07
Butan	45,2	3,38	43,4	3,13
n-Pentan	55,0	2,64	54,8	2,56
Ethylen	78,0	7,0	77,8	6,55
Propylen	54,7	4,64	54,4	4,51
I-Butylen	53,3	3,48	53,0	3,38
Acetylen	168,0	9,3	155,0	7,75
Wasserstoff	364,0	42,5	237,0	29,58
Kohlenmonoxid	19,5	41,5	17,4	29,58
90% CH <sub>4</sub> + 10% N <sub>2</sub>	41,0	12,6	39,0	11,7
90% CH <sub>4</sub> + 20% N <sub>2</sub>	40,2	14,0	38,0	13,1
Normstadtgas DIN 3362, H <sub>u</sub> = 15600	103,5	25,2	86	21,4
Normferngas DIN 3362, H <sub>u</sub> =17300	91	23,1	81	20,4

Brenngeschwindigkeiten von Brenngas-  
Luft-Gemischen bei 20°C

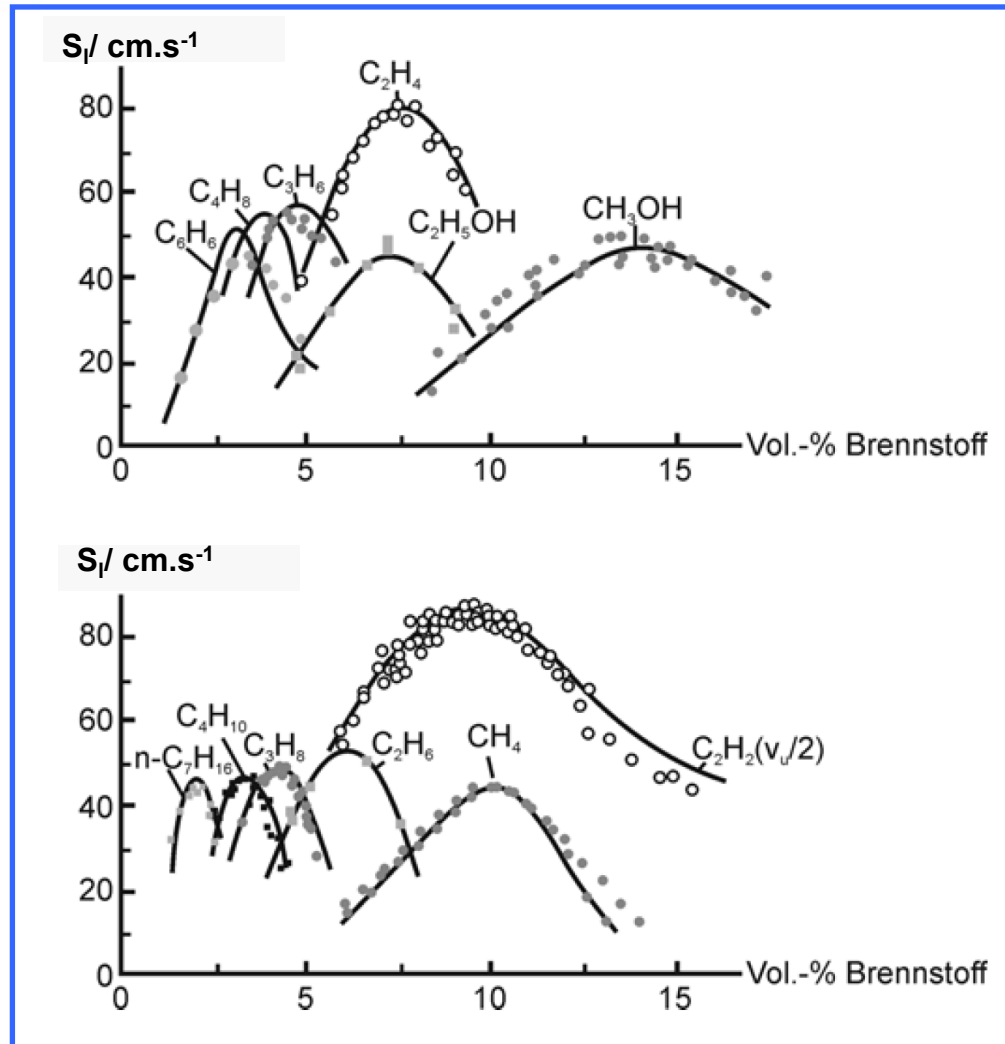
# Brenngeschwindigkeit



**Druckabhängigkeit** der Brenngeschwindigkeit  $S_L$  für  $T_u = 298 \text{ K}$  (links)

**Temperaturabhängigkeit** von  $S_L$  für  $p = 1 \text{ bar}$  (rechts) in stöchiometrischen  $\text{CH}_4$ -Luftgemischen  
(Warnatz 1988)

# Brenngeschwindigkeit

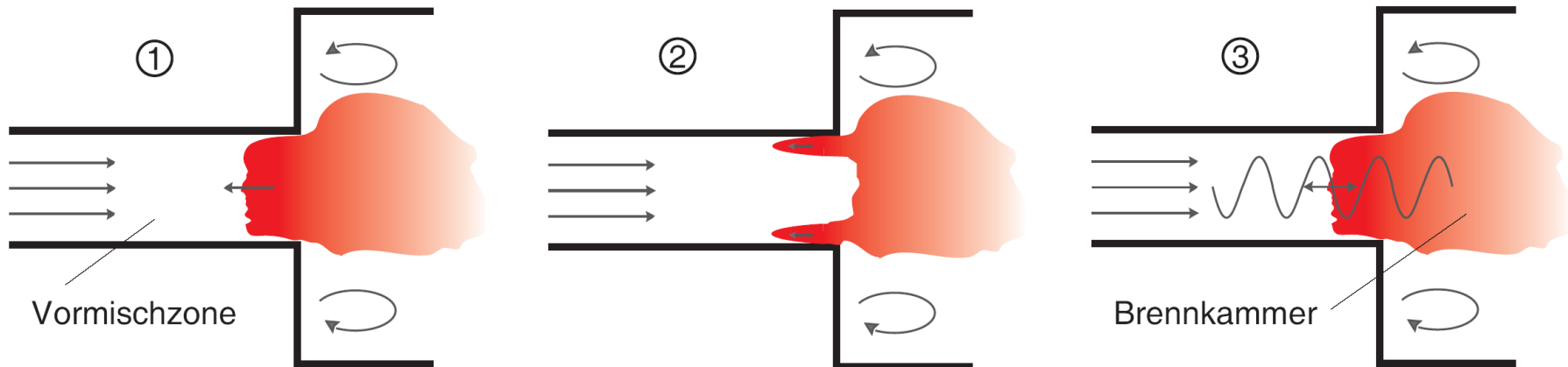


**Konzentrationsabhängigkeit** (bei  $p = 1 \text{ bar}$ ;  $T_u = 298 \text{ K}$ ) der Brenngeschwindigkeit  $S_f$  in verschiedenen Brennstoff-Luftgemischen (Warnatz 1993)

# Flammenrückschlagsursachen

## Flammenrückschlag:

wenn innerhalb der Vormischzone lokal die Brenngeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit überschreitet.



*Illustration der Flammenrückschlagsursachen in drallfreien Vormischbrennern.*

## Flammenrückschlagsursachen

- Flammenausbreitung in der Kernströmung
- Flammenrückschlag in der Wandgrenzschicht
- Flammenrückschlag durch Verbrennungsinstabilitäten

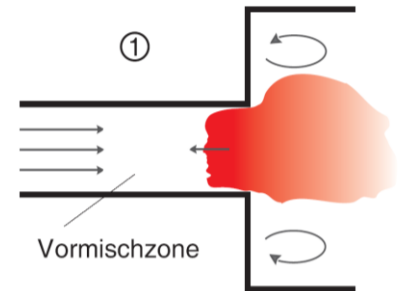
# Flammenrückschlagsursachen

## Flammenrückschlag in der Kernströmung:

kann nur dann auftreten, wenn durch geänderte Betriebsbedingungen die Brenngeschwindigkeit lokal über die Strömungsgeschwindigkeit anwächst

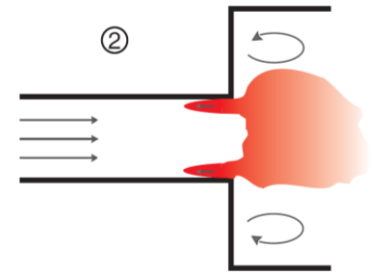
z.B. bei:

fette Gemischstrahlen bei nicht perfekter Vormischung  
die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten



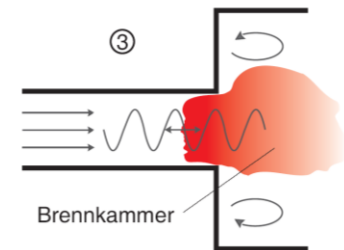
## Flammenrückschlag in der Wandgrenzschicht

Niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in Grenzschichten  
Verlöschen der Flammen aufgrund des Wärmeentzugs durch kalte Flächen  
Zur Rohrwand hin fällt daher die laminare Brenngeschwindigkeit  $S_l$  abrupt ab

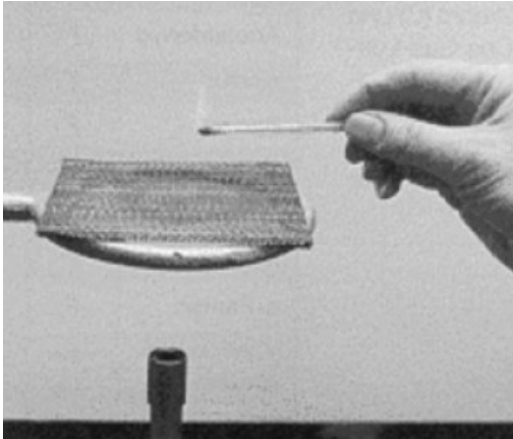


## Flammenrückschlag durch Verbrennungsinstabilitäten

Verbrennungsinstabilitäten treten auf, wenn Schwankungen der Wärmefreisetzung in der Reaktionszone auftreten oder wenn Druck und Geschwindigkeit oszillieren.



# Flammenrückschlagsicherung



Flammenrückschlagsicherungen (Fa. Flammer GmbH)

