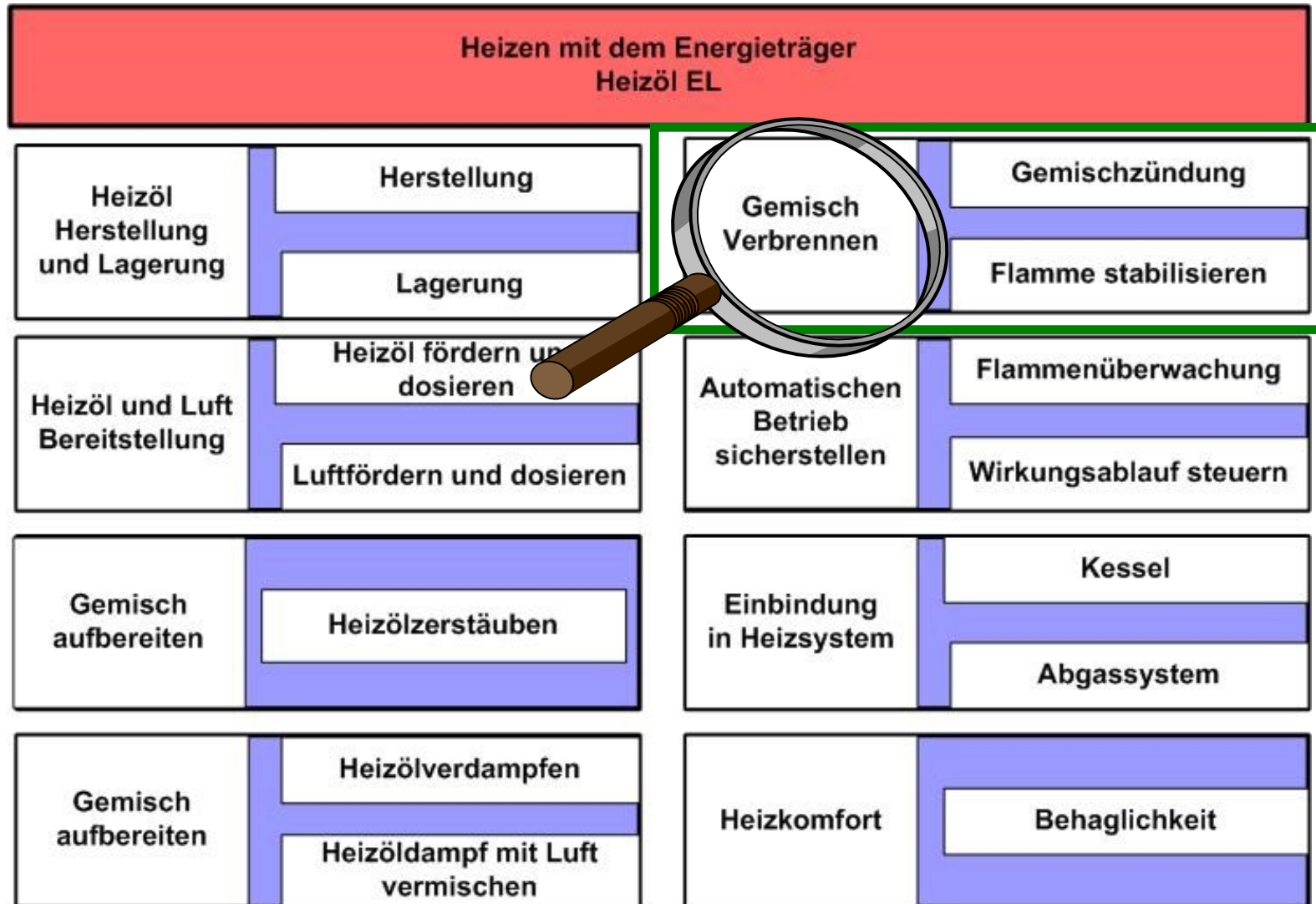


# Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

# Inhalte der Vorlesungen

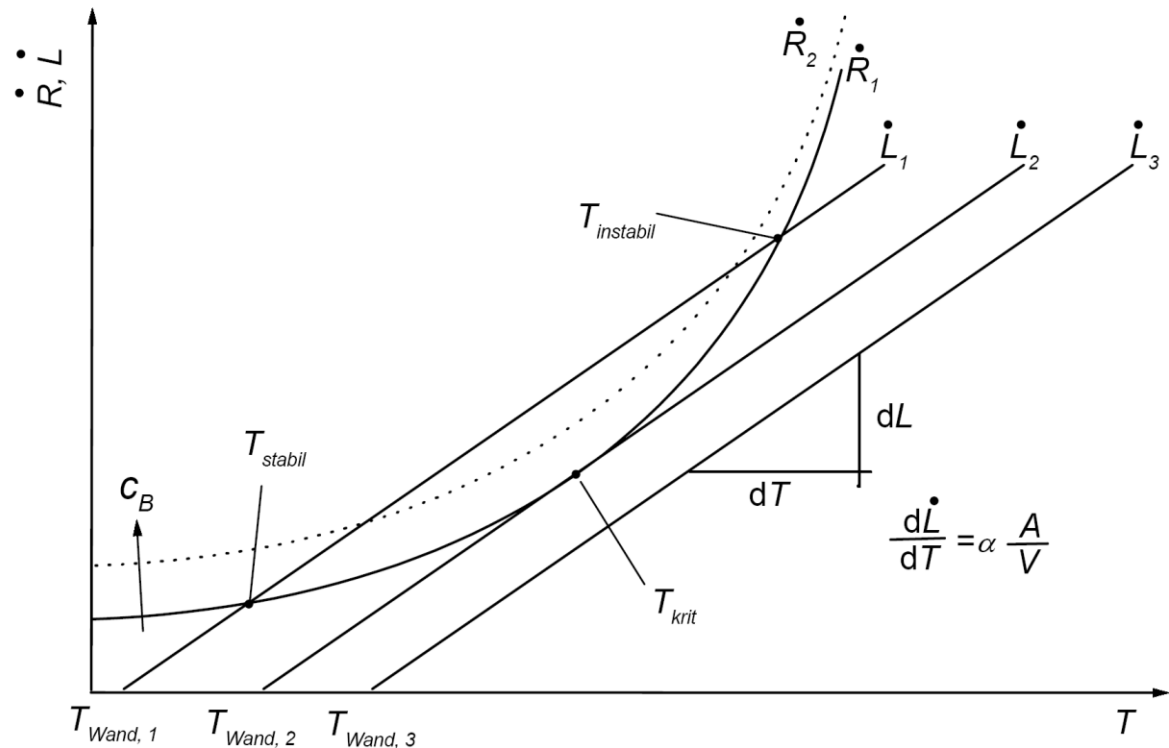


# Thermische Explosion - Modell von Semenov

Thermischen Explosion (3. Explosionsgrenze) Modell von Semenov [Warn97].  
 Die zeitliche Temperaturänderung in einem Volumen  $V$  ergibt sich aus der freigesetzten Reaktionswärme und dem über die Wandflächen konvektiv abgegebenen Wärmestrom.

$$\frac{\dot{Q}_R}{V} = \dot{R} = \Delta U \cdot A^* \cdot e^{\left(-\frac{E}{R_n T}\right)} \cdot c_B$$

$$\frac{\dot{Q}_V}{V} = \dot{L} = \alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot (T - T_{Wand})$$



Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von Wärmeproduktion und Wärmeverlust nach [Griff95]

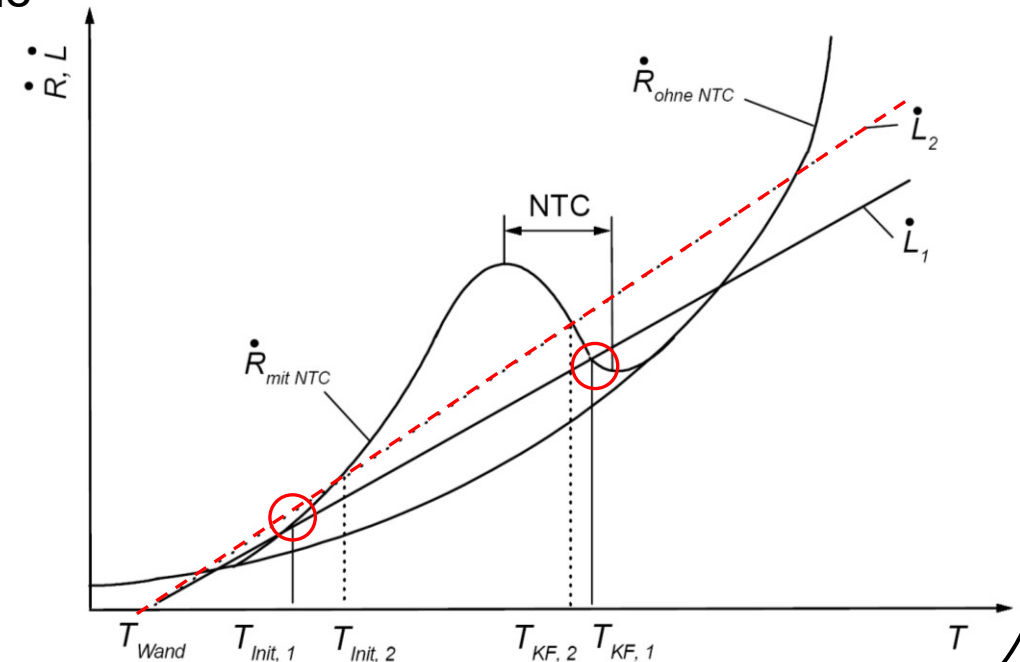
# Wärmefreisetzung der exothermen Vorreaktion

Übertrifft die Wärmeproduktion der Niedertemperaturoxidation die Wärmeabgabe über Reaktorwand so kann die KF-Reaktionen initiiert werden  $T_{Init1}$ .  
Durch die exothermen Reaktionen kommt es zu einer spontanen Wärmefreisetzung, die eine Aufheizung des Gemischs zur Folge hat. Die Reaktionsendtemperatur erreicht  $T_{KF,1}$ .

Im Gegensatz zur thermischen Explosion ohne NTC-Verhalten kann die Temperatur  $T_{KF}$  ein stabiler und instabiler Betriebspunkt des Systems sein.

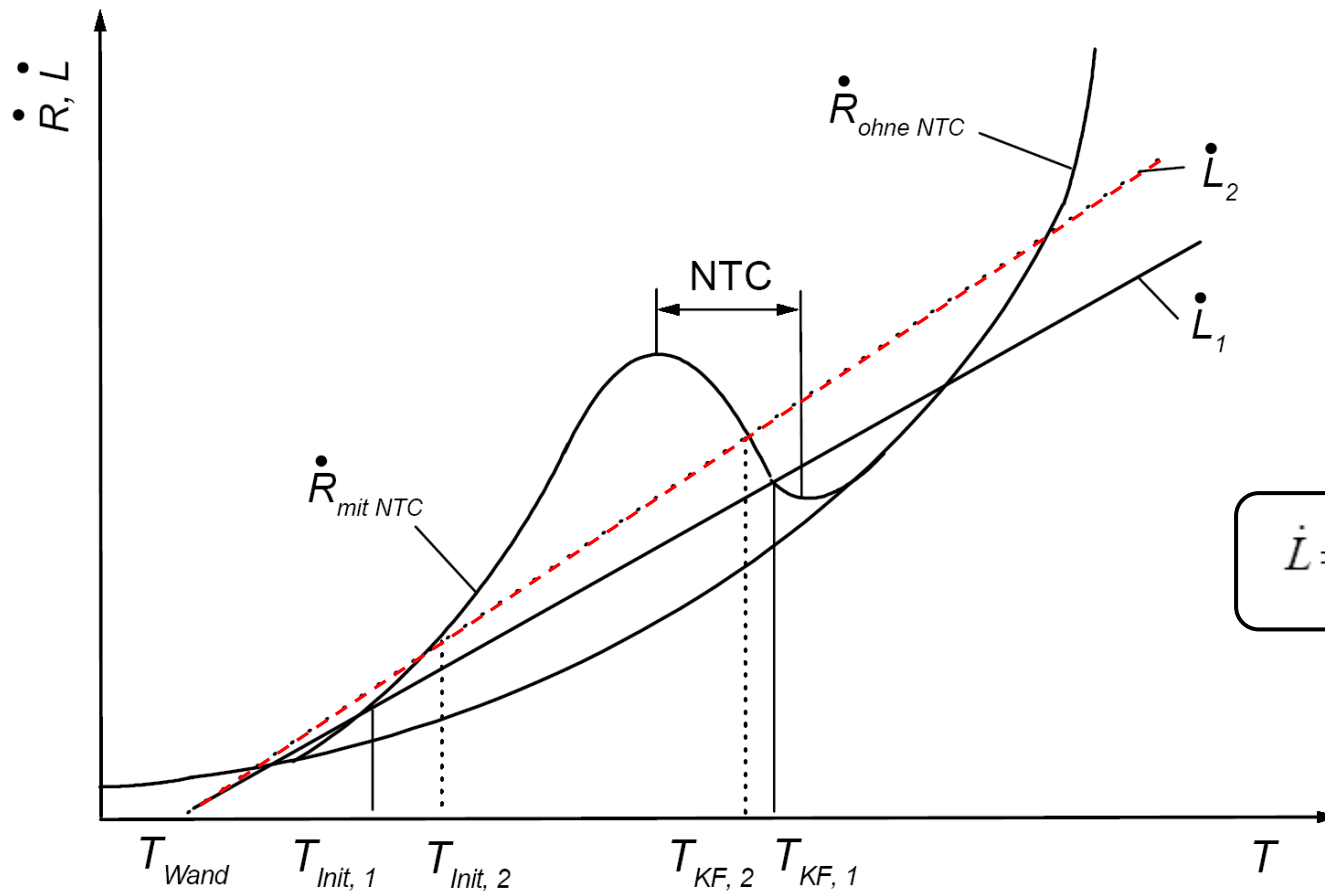
Liegt dieser Schnittpunkt der Reaktionsumsatzkurve mit der Verlustgeraden im NTC-Gebiet ( $T_{KF,1}$  und  $T_{KF,2}$ ), so existieren stabile Verhältnisse.

Andernfalls kann eine Selbstzündung des Gemischs nicht vermieden werden.



**Wärmeproduktion von Kohlenwasserstoff/ Luft-Gemischen mit und ohne negativem Temperaturkoeffizienten und Verlustgeraden**

# Wärmefreisetzung der exothermen Vorreaktion

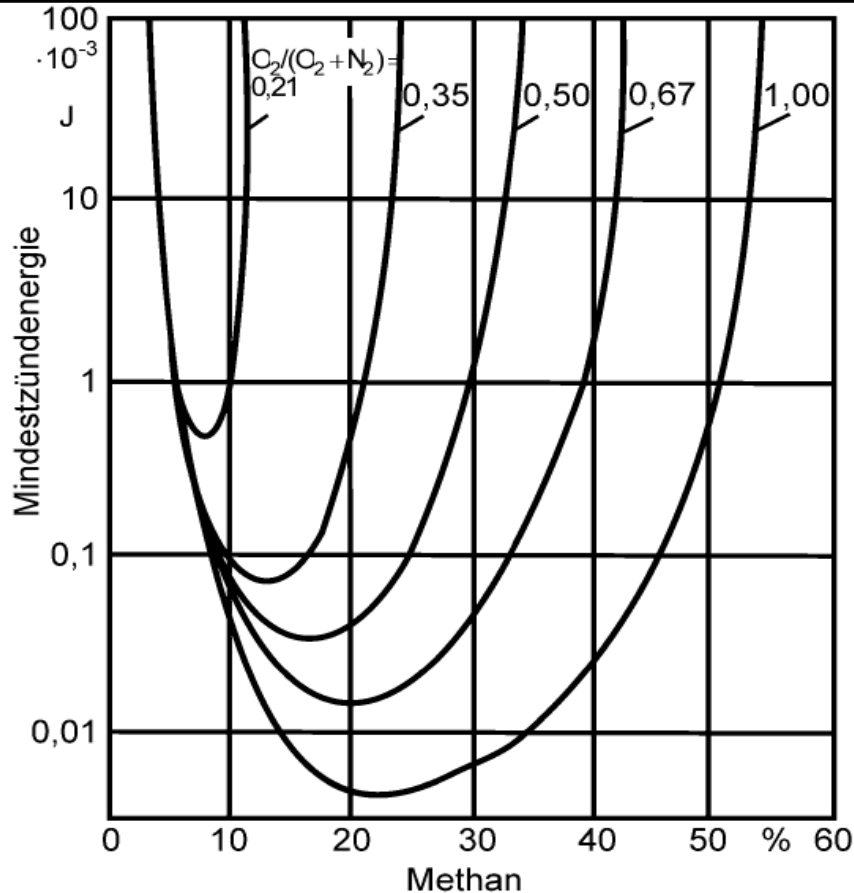


$$\dot{L} = \alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot (T - T_{Wand})$$

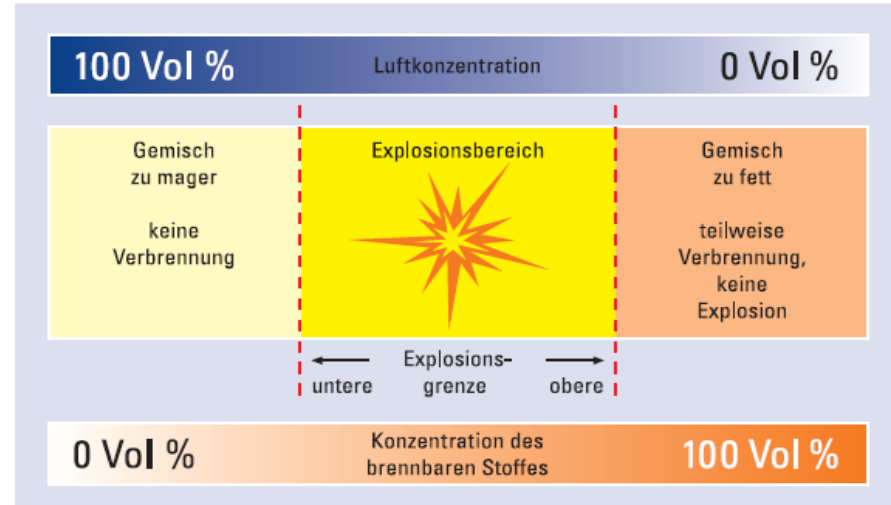
Durch Erhöhung des  $A/V$ -Verhältnisses, resultiert eine erhöhte Steigung der Verlustgeraden  
Die Initiierungstemperatur  $T_{Init,2}$  verschiebt sich zu höheren Temperaturen.  
Die Reaktionsendtemperatur  $T_{KF,2}$  liegt auf niedrigerem Niveau.

# Zündgrenzen und Mindestzündenergie

**Mindestzündenergie** ist die kleinstmögliche umgesetzte Energie, die das entsprechende zündwillige Gemisch gerade noch entzündet.

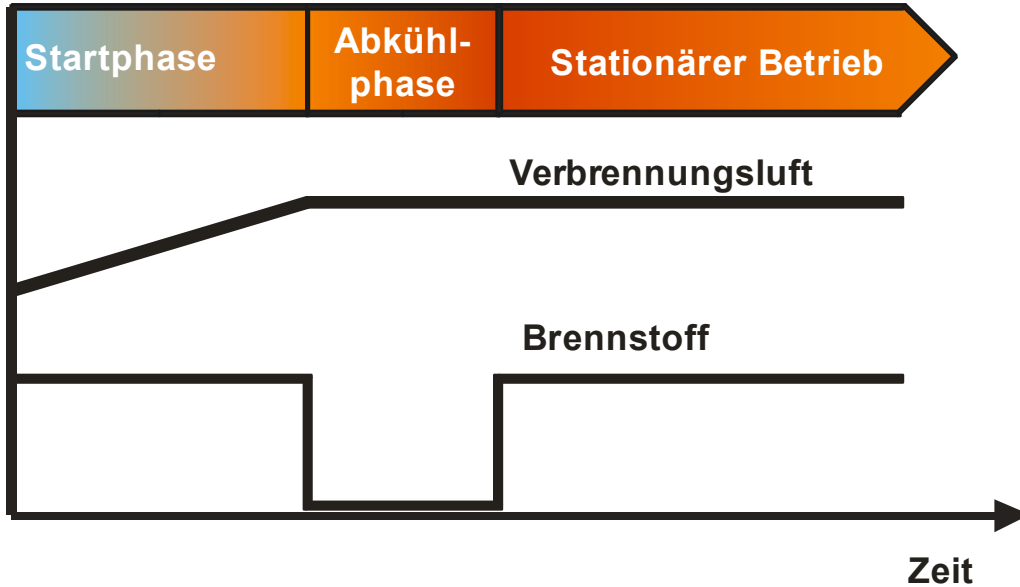


Mindestzündenergie von Methan und verschiedenen Gemischen aus  $O_2$  und  $N_2$  (Lewis u. von Elbe 1951)

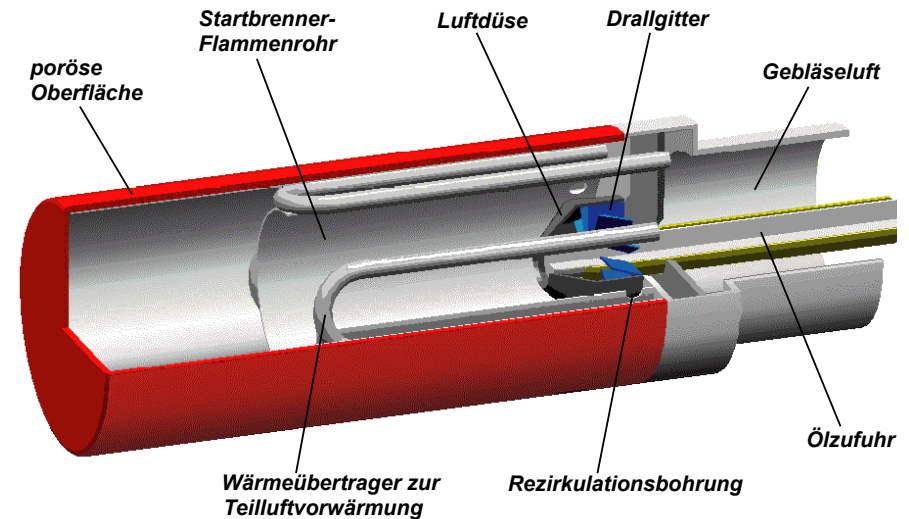


Stoffbezeichnung	untere Explosionsgrenze [Vol. %]	obere Explosionsgrenze [Vol. %]
Acetylen	2,3	100 (Selbsterfall!)
Ethylen	2,4	32,6
Benzin	~ 0,6	~ 8
Benzol	1,2	8
Heizöl/Diesel	~ 0,6	~ 6,5
Methan	4,4	17
Propan	1,7	10,8
Schwefelkohlenstoff	0,6	60,0
Wasserstoff	4,0	77,0

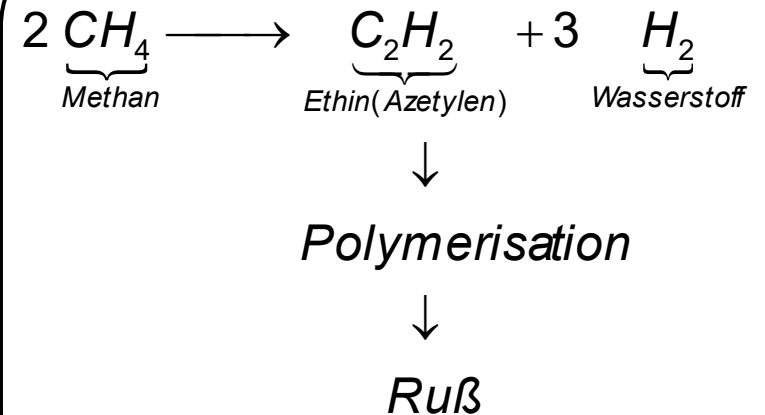
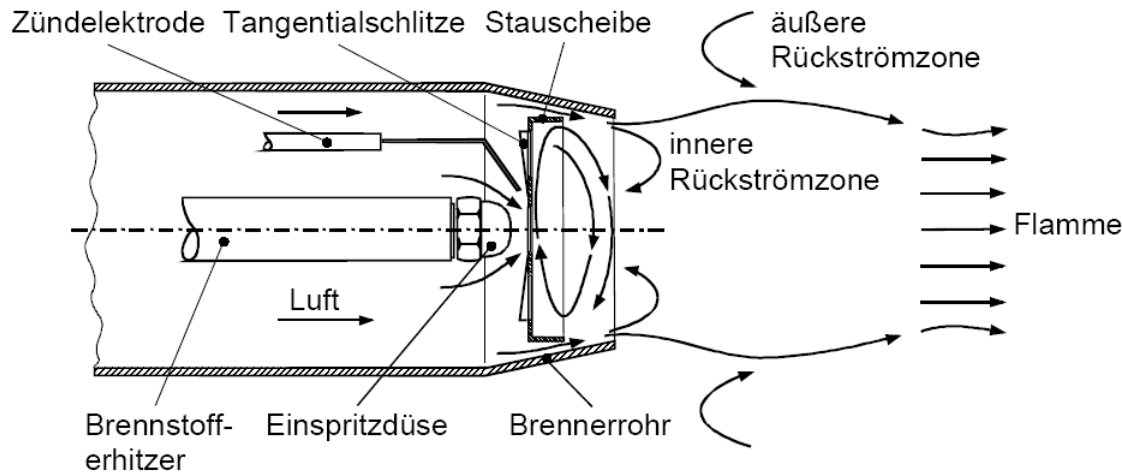
# Start des Strahlungsbrenners



In der **Startphase** fungiert der Verdampfer als Blaubrenner, welcher das System vorwärmt, um die Kalte Flamme Reaktionen initiieren zu können.

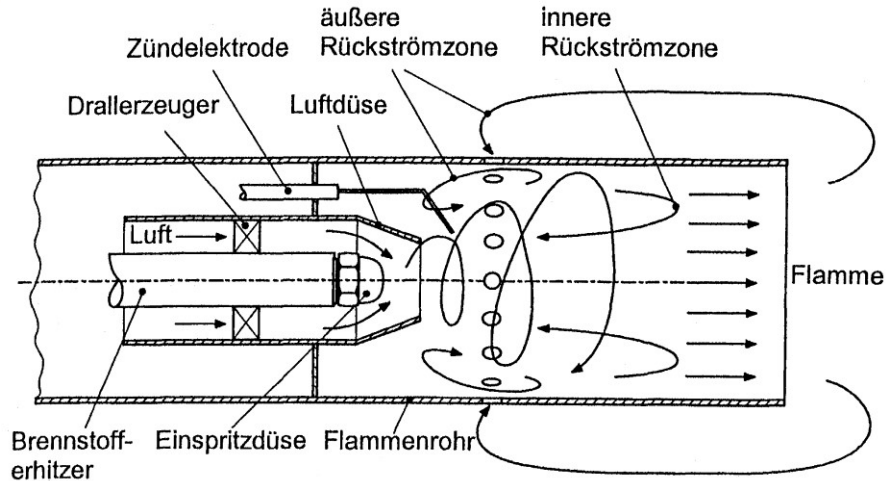


# Gelbbrenner



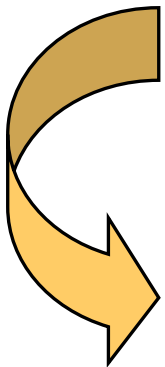
Die Vorgänge Zerstäubung, Tropfenverdampfung, Mischung und Verbrennung laufen ungeordnet nebeneinander ab. Aufgrund der hohen Temperatur in Tropfennähe kommt es zu **Crackreaktionen**, wodurch Ruß entsteht, welcher in der Flamme durch gelbes Leuchten sichtbar wird.

# Blaubrenner



## Räumliche Entkopplung der Teilprozesse:

Zerstäubung, Tropfenverdampfung, Mischung und Verbrennung



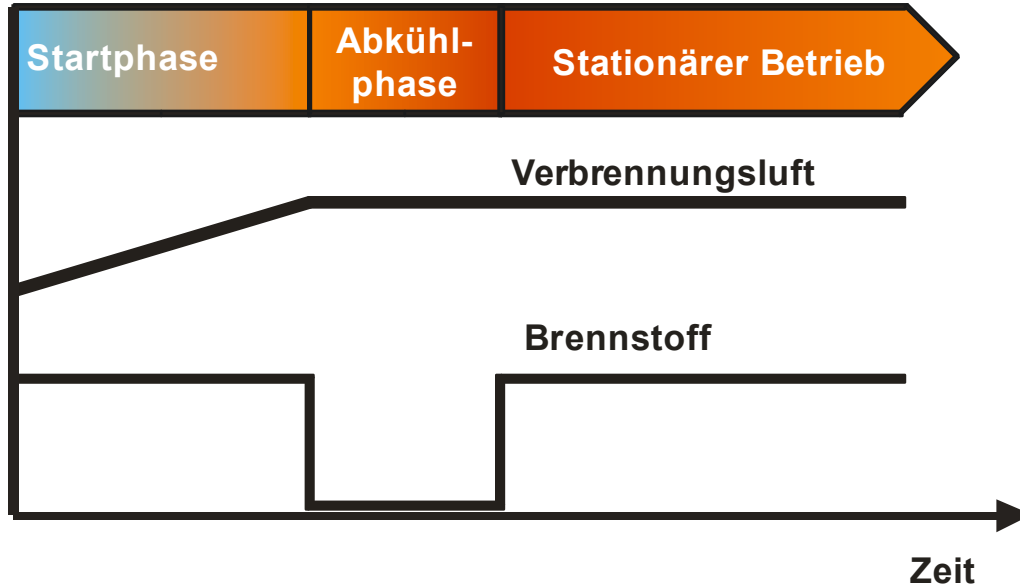
### Rußvermeidung:

Räumliche Entkopplung der Teilprozesse  
Wassergehalt der rückgeführten Rauchgase

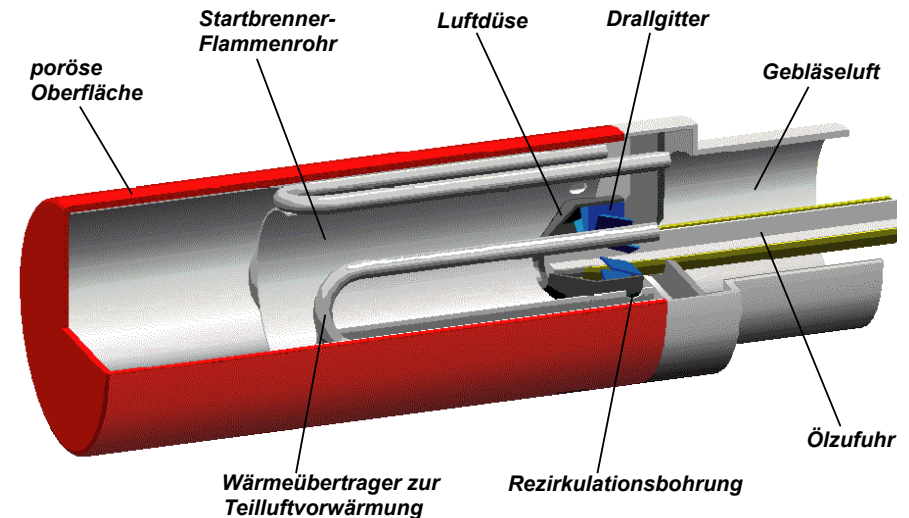
### NOx-Reduzierung:

Flammenkühlung  
Senkung des Sauerstoffpartialdruckes  
Senkung der adiabaten Flammentemperatur

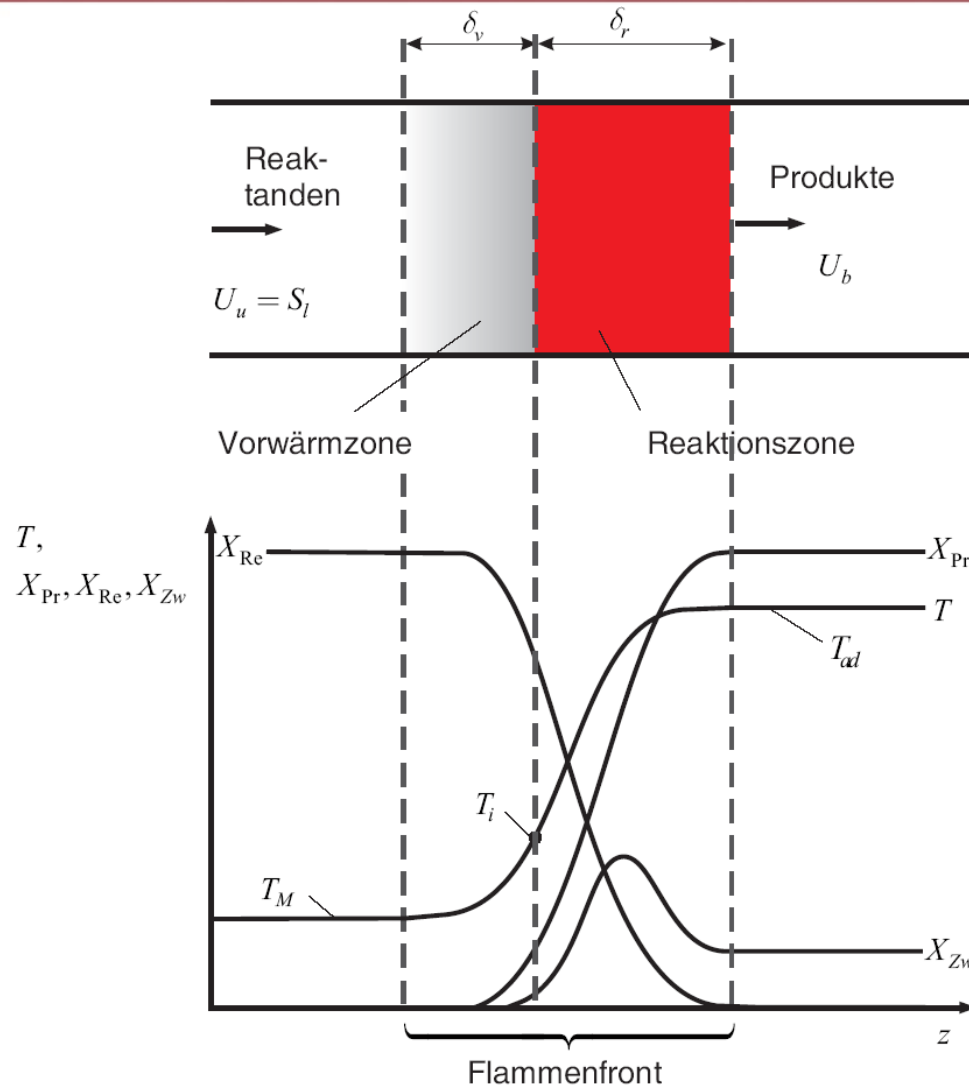
# Stationärer Betrieb



Im **stationären Betrieb** erfolgt die Verdampfung des Brennstoffes mittels Kalter Flamme. Die Verbrennung des Öldampf/Luft Gemisches findet an der Oberfläche eines Metallgewebes statt.



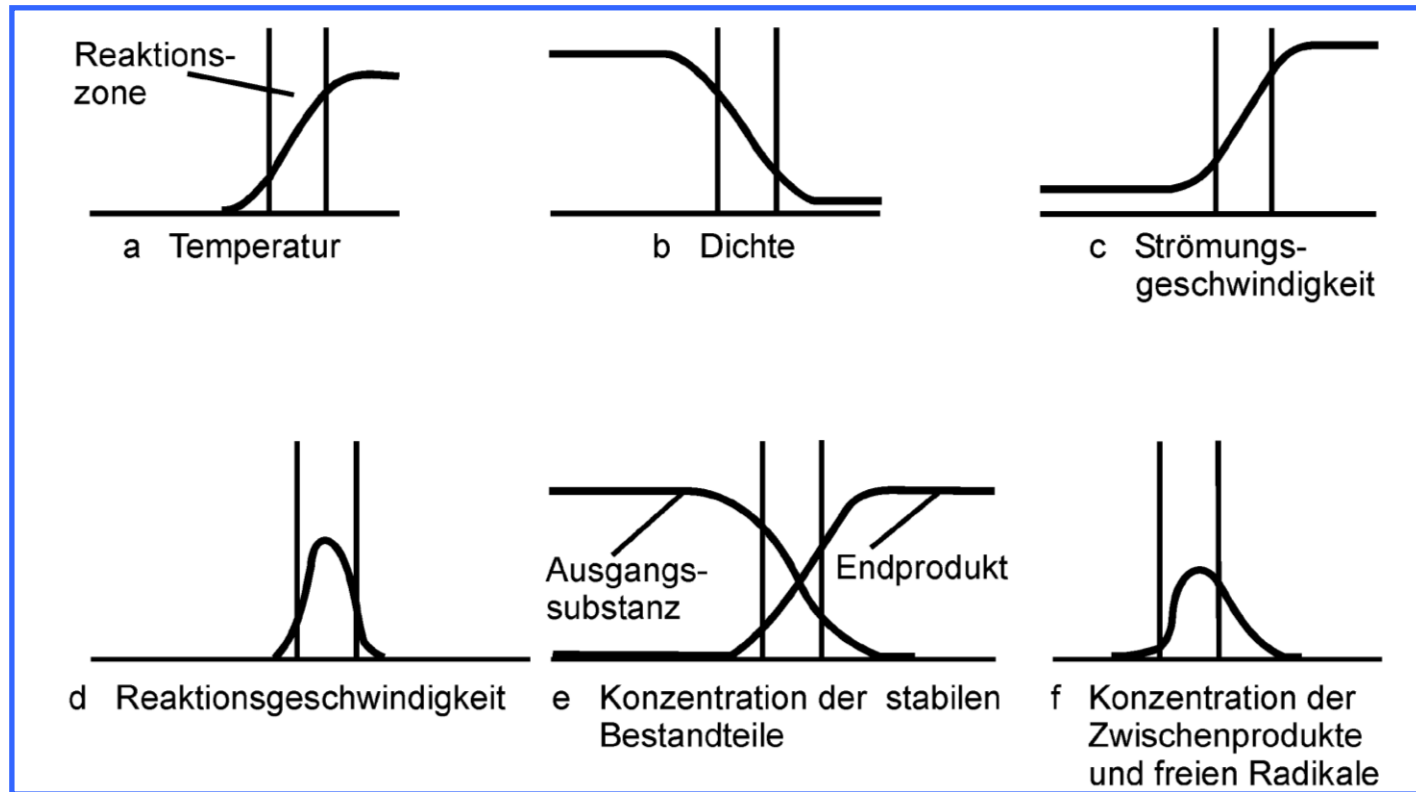
# Laminare Flammenfront



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.

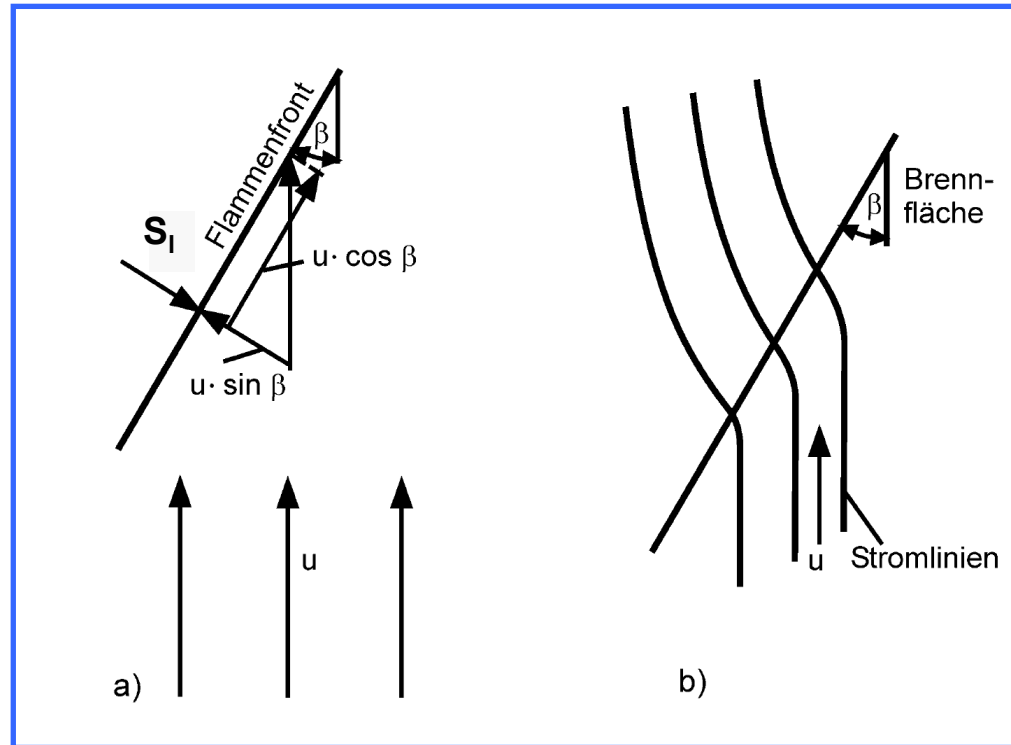


Verlauf der Eigenschaften und der Zusammensetzung des Gemisches auf dem Weg durch die Flammenfront

# Laminare Vormischflamme

Der Winkel, der sich dabei zwischen Strömungsrichtung und Flammenfront einstellt, hängt von der Anströmgeschwindigkeit des Gemischs und der Brenngeschwindigkeit ab.

$$s_l = -u \cdot \sin \beta$$



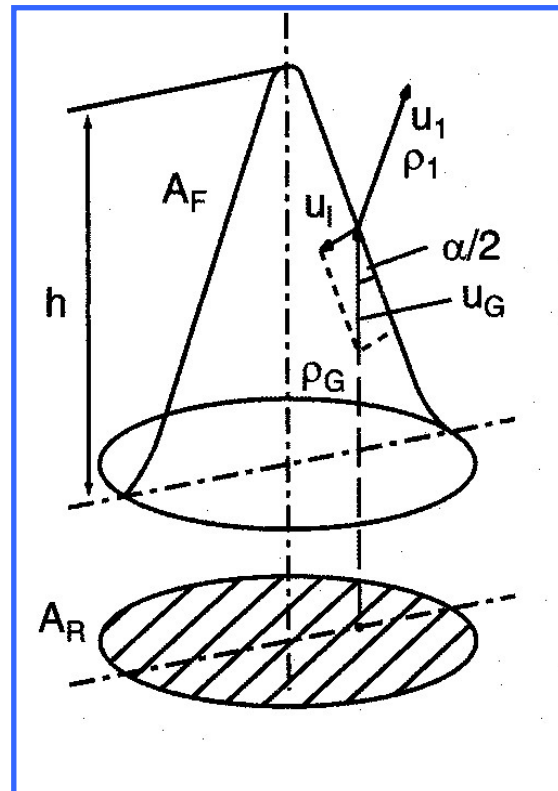
- Zusammenwirken von Strömungs- und Brenngeschwindigkeit.
- a) Zerlegung der Strömungsgeschwindigkeit in Komponenten
  - b) Brennfläche und Stromlinien (Günther 1984)

## Experimentelle Methode zur Messung der Brenngeschwindigkeit

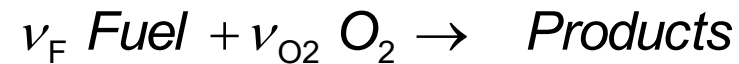
$$s_l = s_M \sin \alpha/2$$

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

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



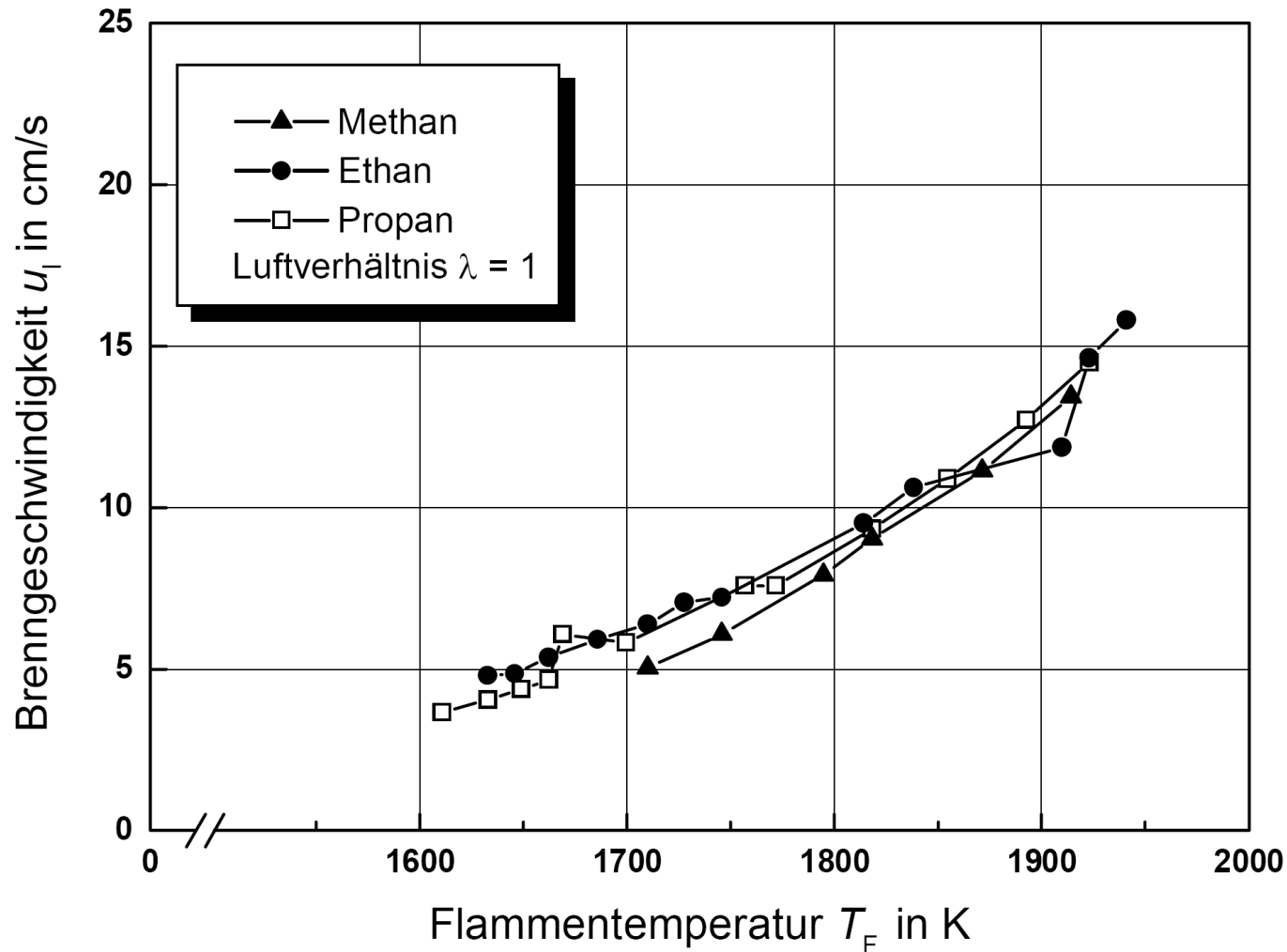
## Brutto Reaktionsgleichung



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

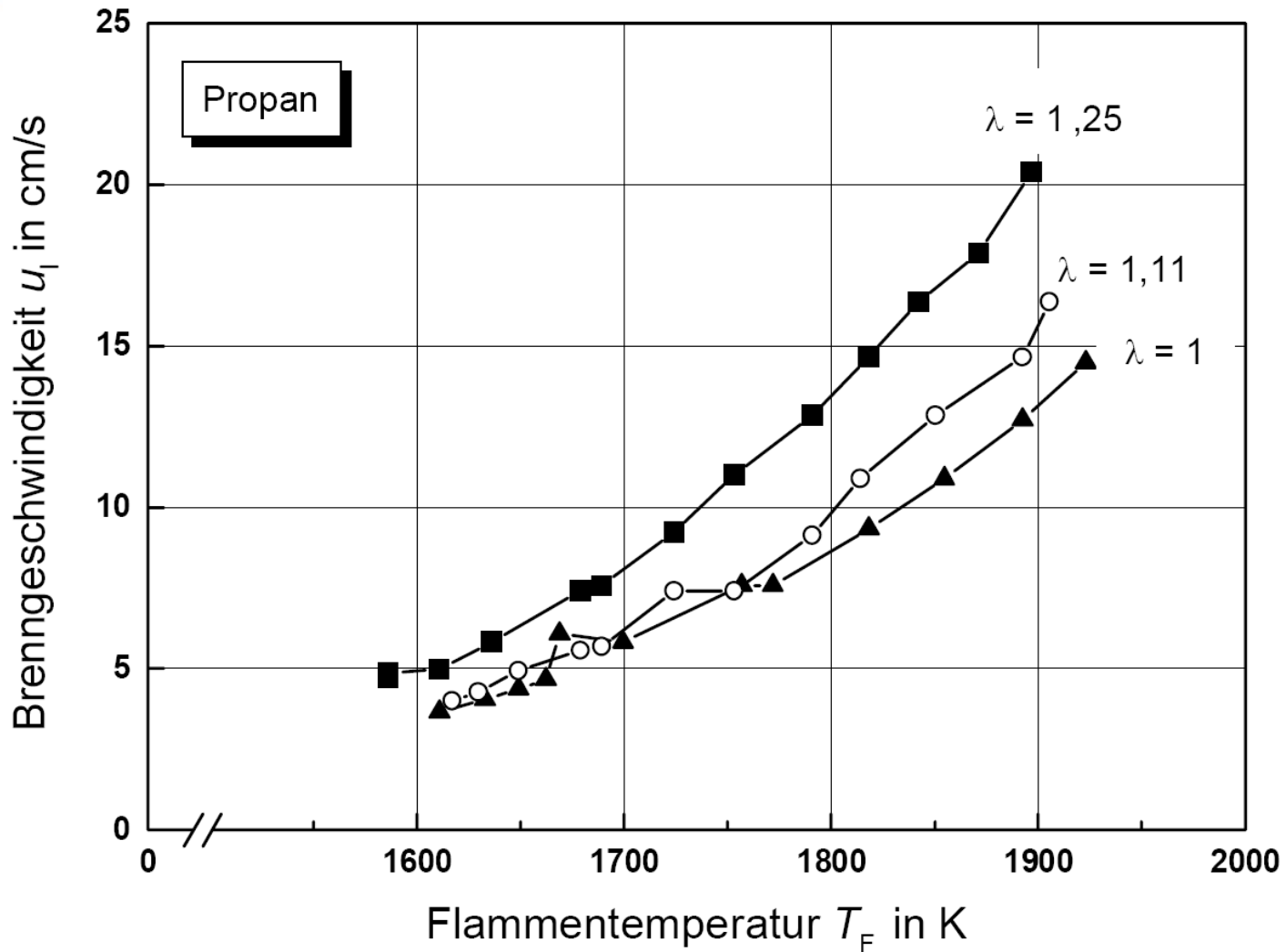
$$\Rightarrow s = -f(T_F, \lambda)$$

# Laminare Vormischflamme



Vergleich gemessener Brenngeschwindigkeiten verschiedener Brennstoffe

# Brenngeschwindigkeit



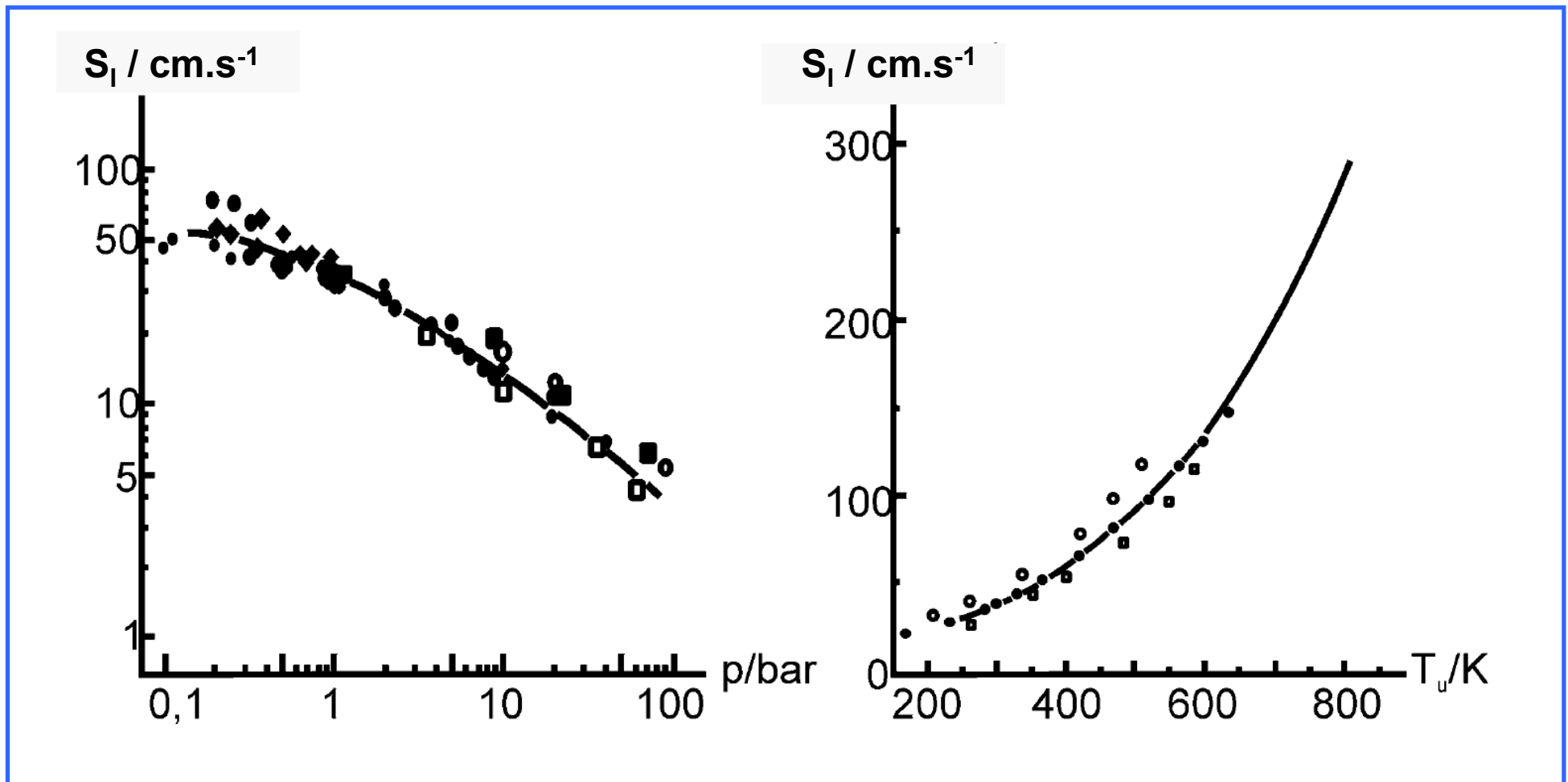
Gemessene Brenngeschwindigkeiten von Propan-Luft-Gemischen

# 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

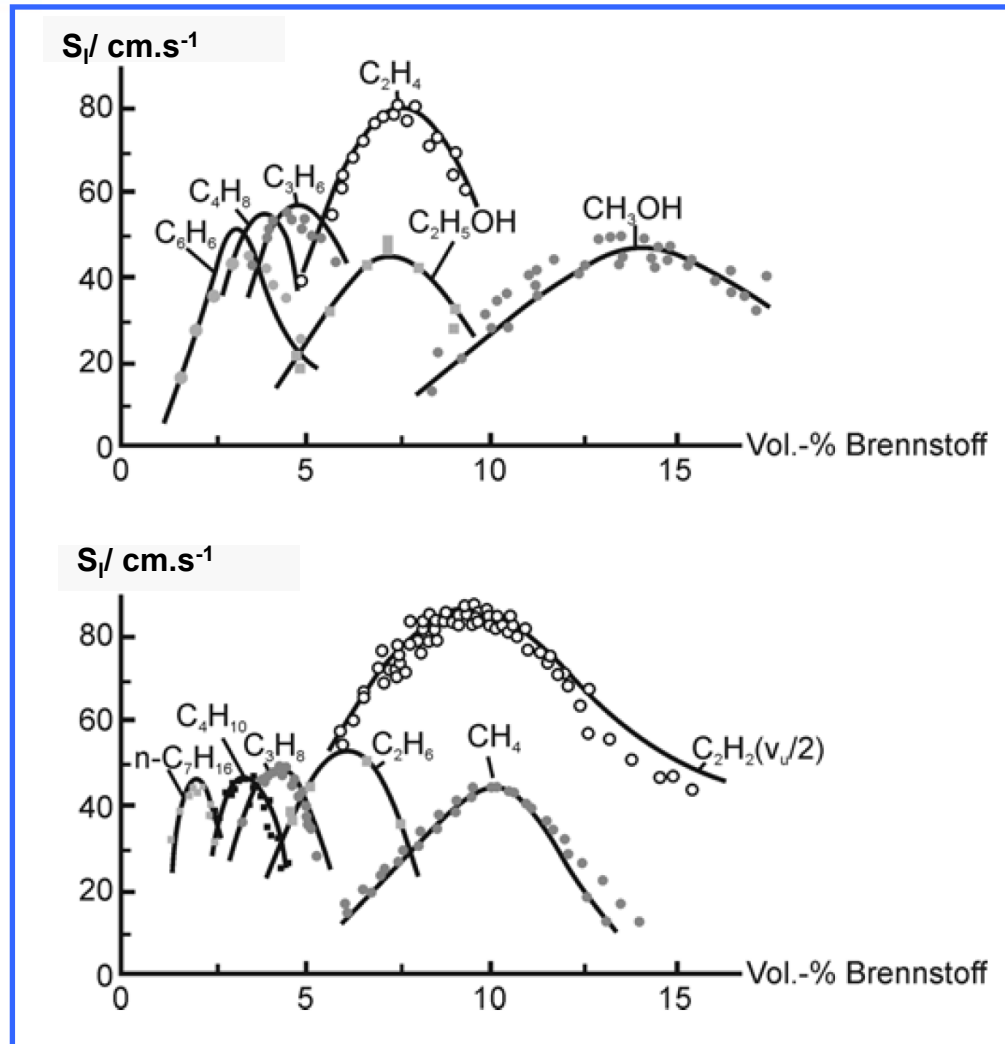
# Brenngeschwindigkeit



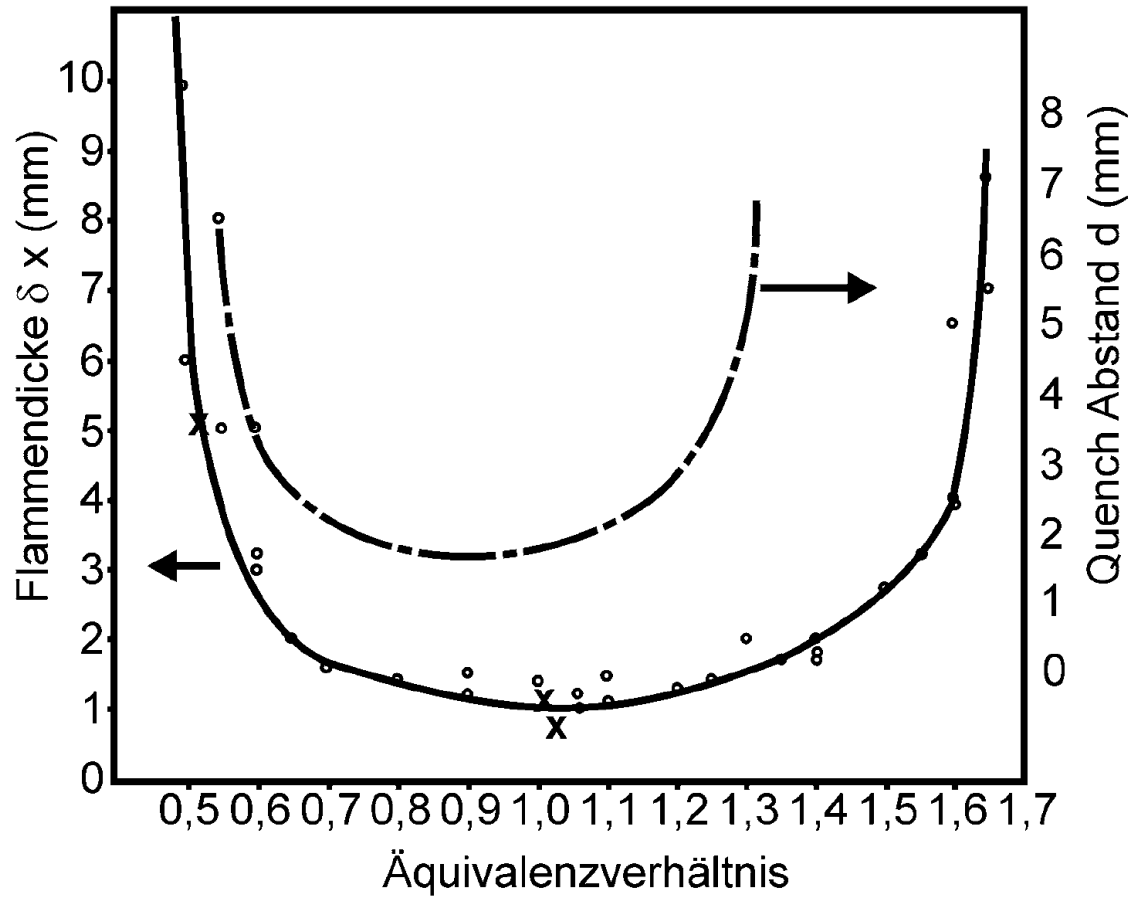
**Druckabhängigkeit** von der Brenngeschwindigkeit  $S_L$  für  $T_u = 298 \text{ K}$  (links)

**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)

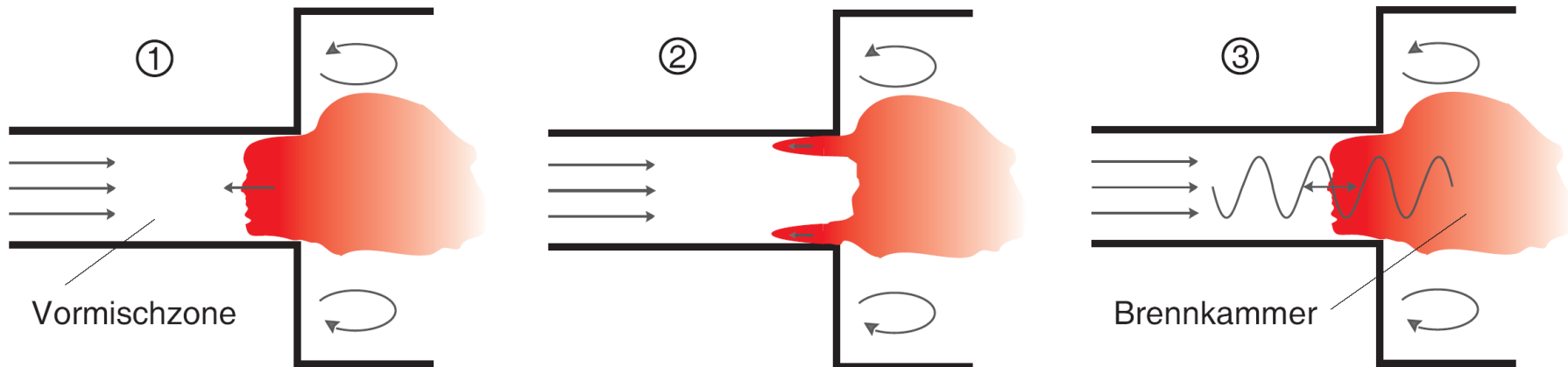


Gemessene Brenndicke und Quench-Distanz einer Methan-Luftflamme unter atmosphärischen Bedingungen (nach Turns 2000)

# Flammenrückschlagsursachen

## Flammenrückschlag:

wenn innerhalb der Vormischzone lokal die Brenngeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit überschreitet.

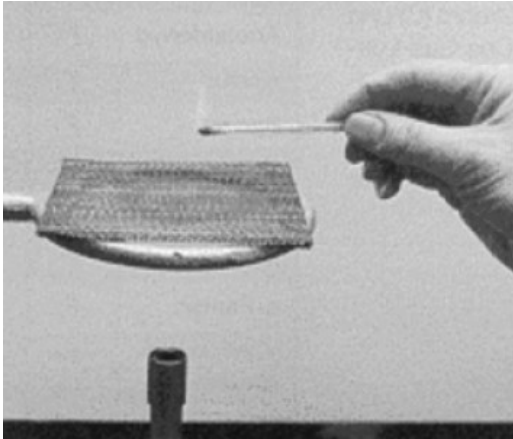


*Illustration der Flammenrückschlagsursachen in drallfreien Vormischbrennern.*

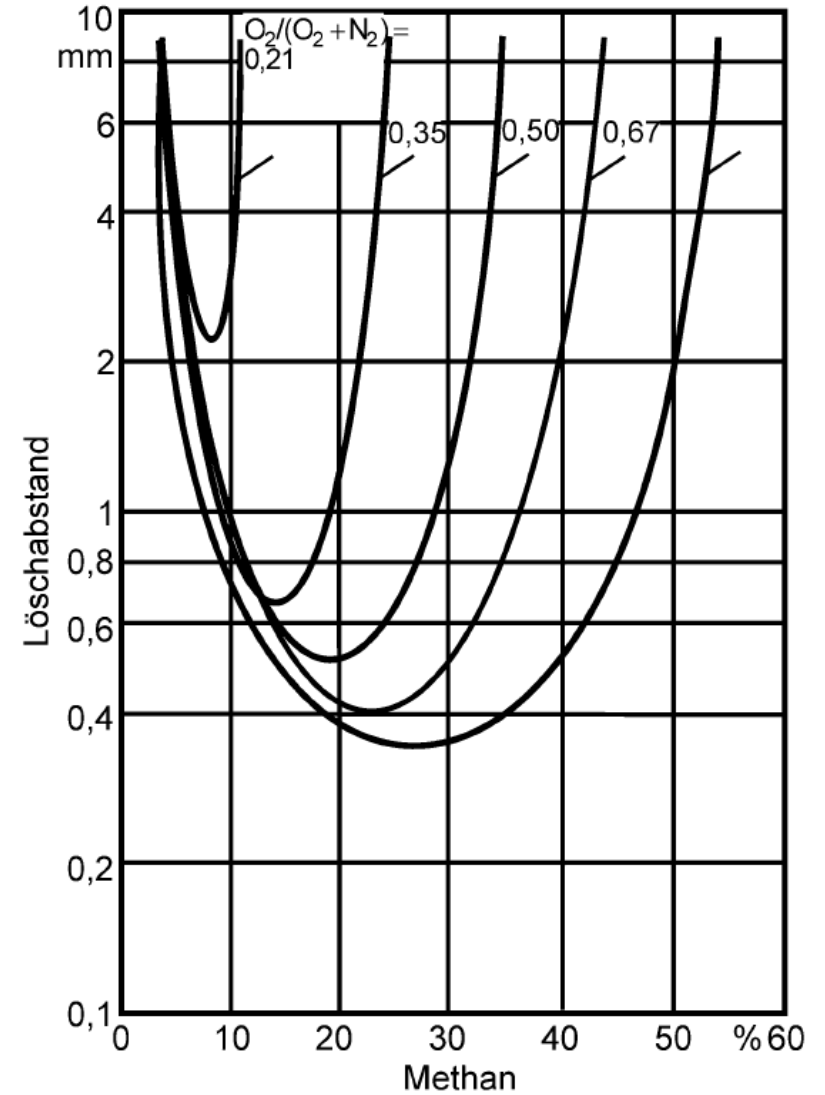
## Flammenrückschlagsursachen

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

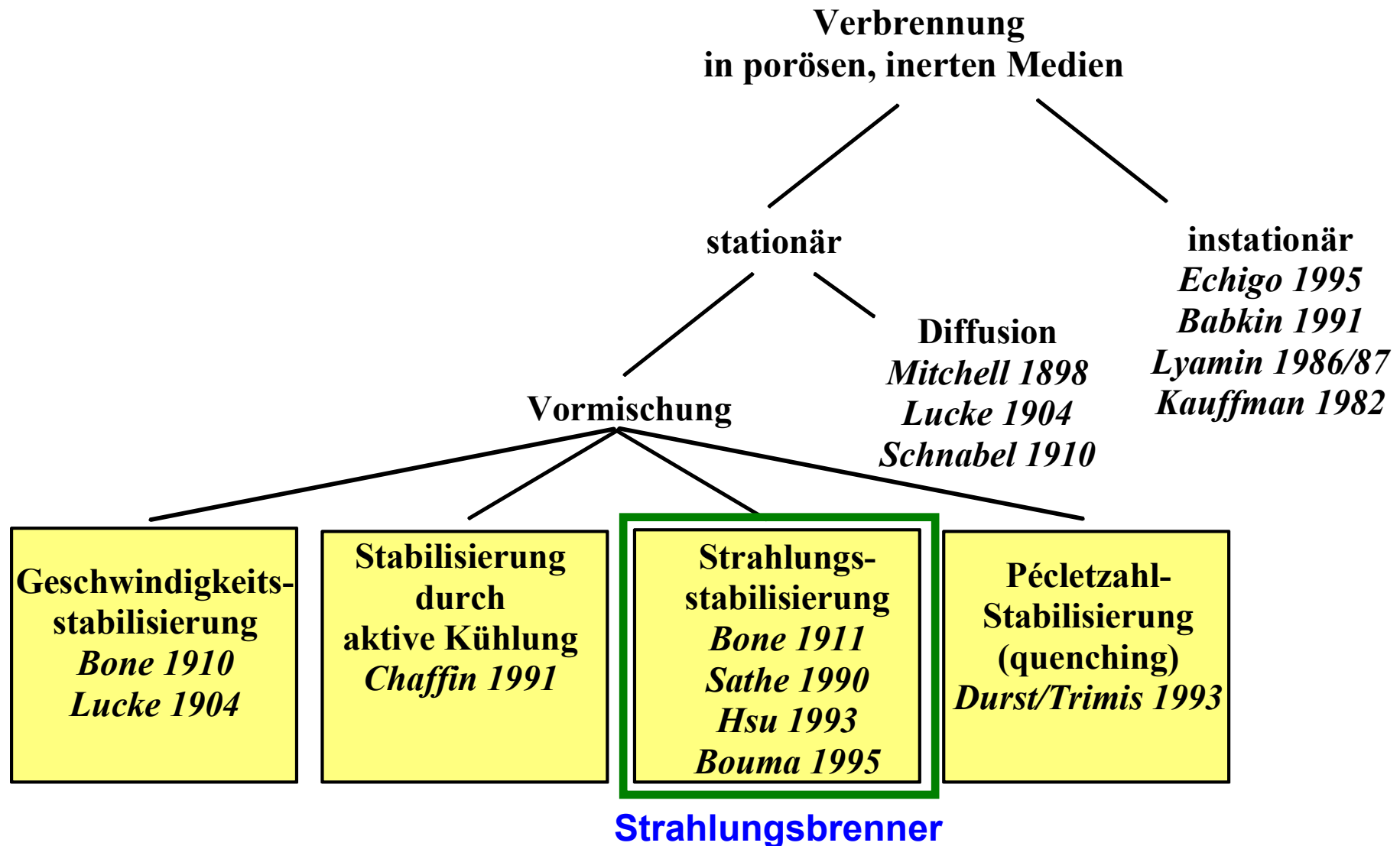
# Flammenrückschlagsicherung



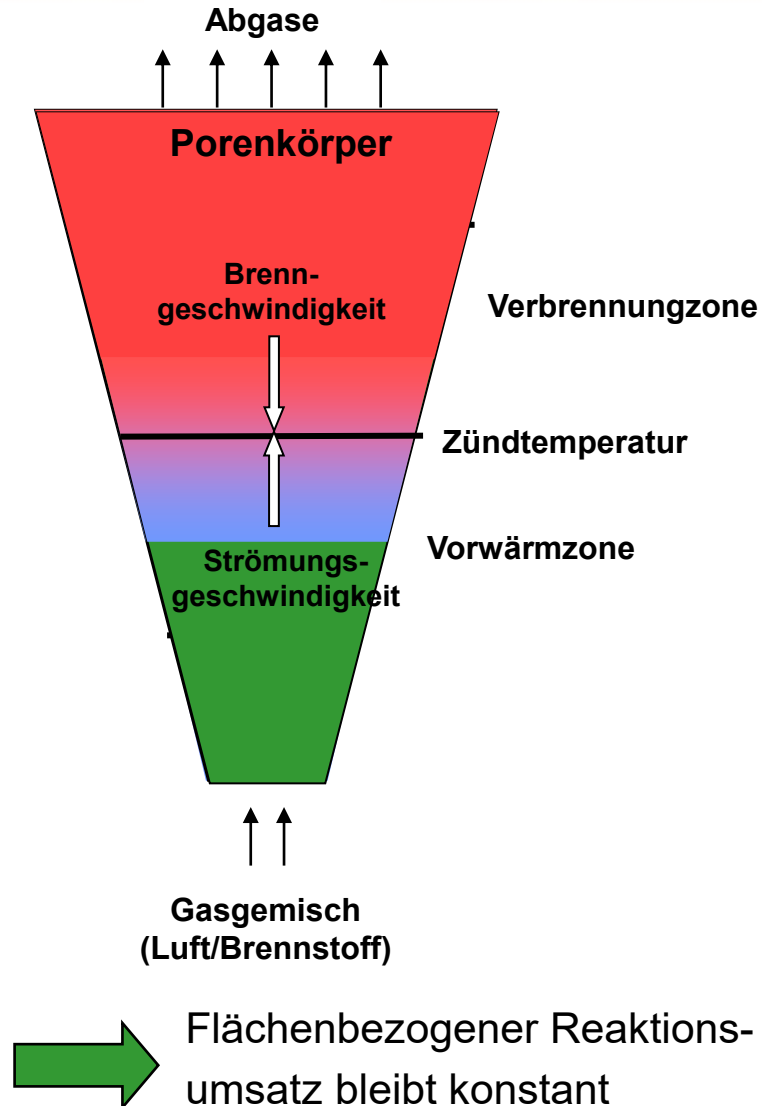
Flammenrückschlagsicherungen (Fa. Flammer GmbH)



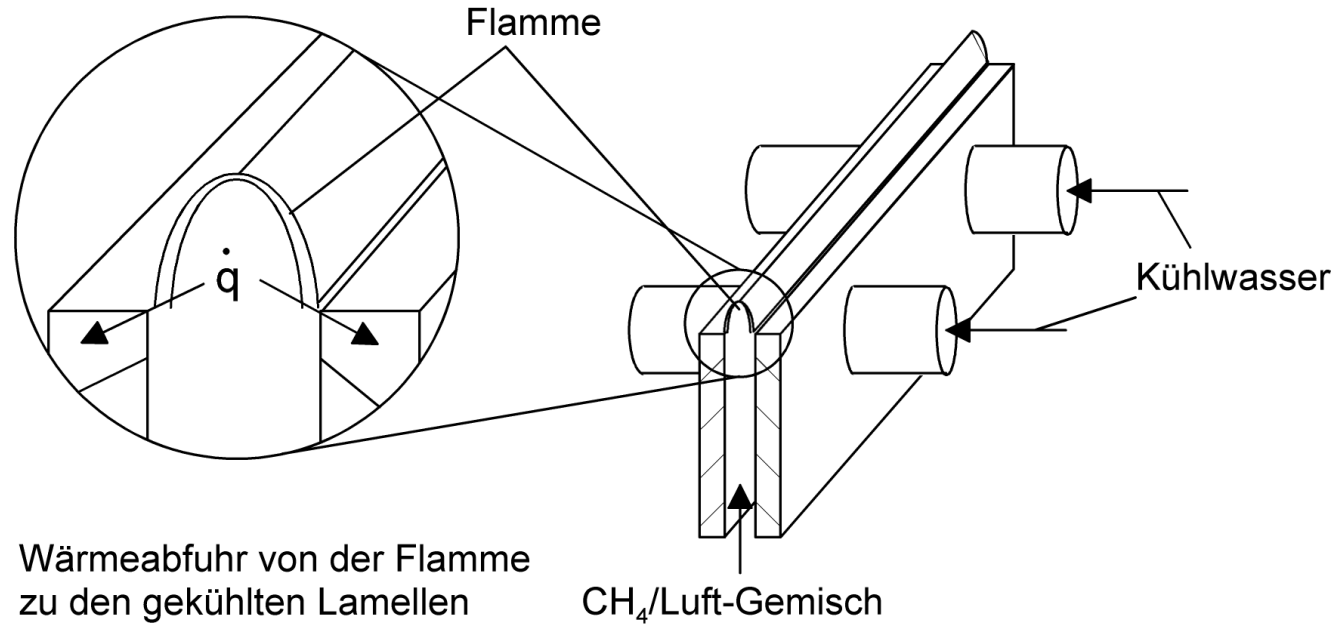
# Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien



# Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien



# Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien



**Stabilisierung durch thermisches Quenching**

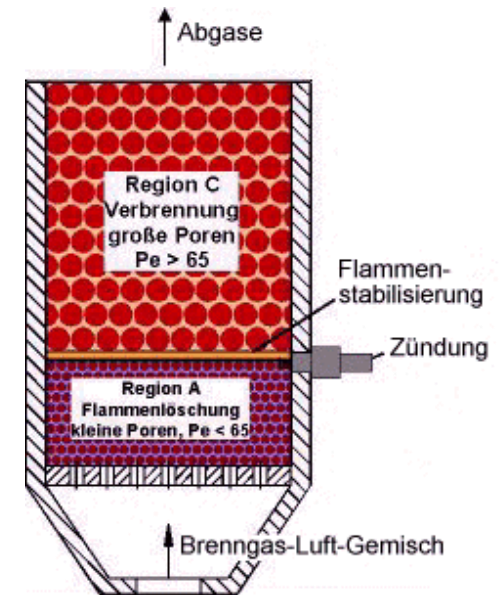
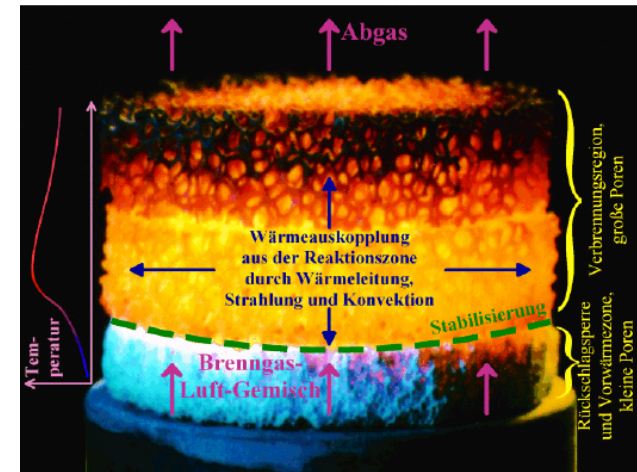
# Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien

Flammenausbreitung bei einer modifizierten Péclet-Zahl:

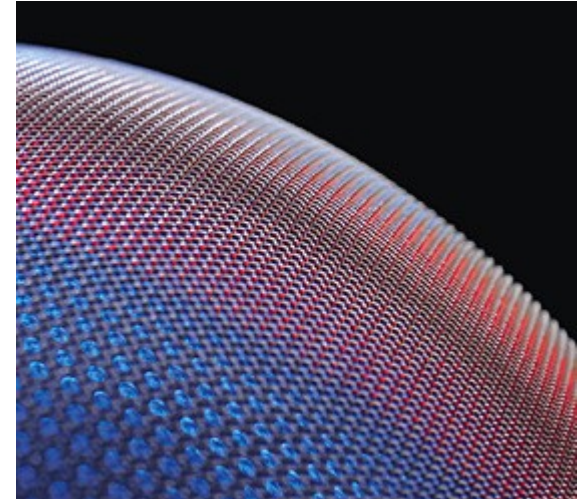
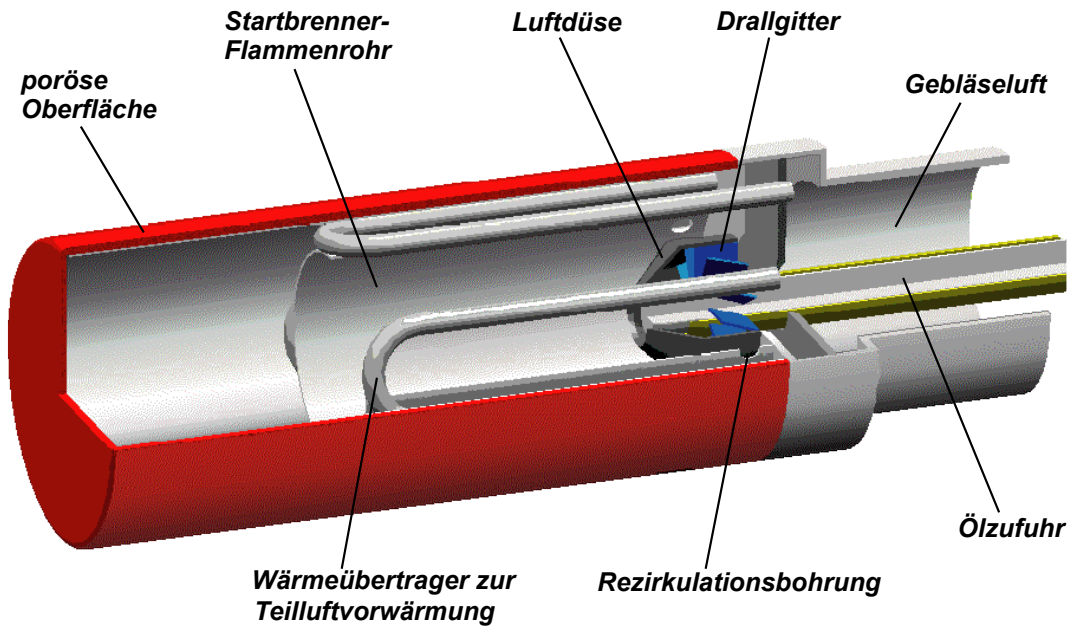
$$Pe \geq 65 \quad \text{Babkin et al (1991)}$$

$$Pe = \frac{s_L d_{p,eff} \rho_f c_{p,f}}{\lambda_f} = \frac{s_L d_{p,eff}}{a_f} = \frac{\text{Wärmeproduktion}}{\text{Wärmeabfuhr}}$$

- $s_L$  : laminare Brenngeschwindigkeit
- $d_{p,eff}$  : äquivalenter Porendurchmesser
- $c_{p,f}$  : Wärmekapazität des Gasgemisches
- $\rho_f$  : Dichte des Gasgemisches
- $\lambda_f$  : Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches

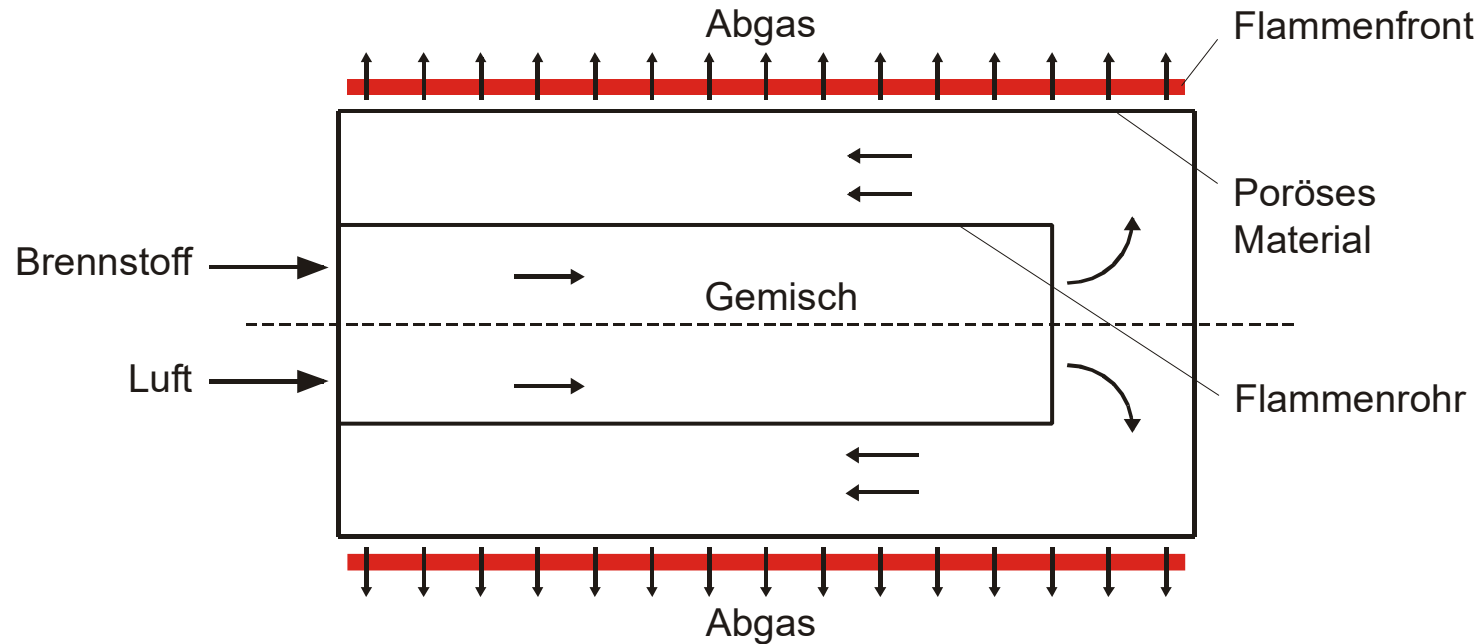


# Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien



## Strahlungsstabilisierung

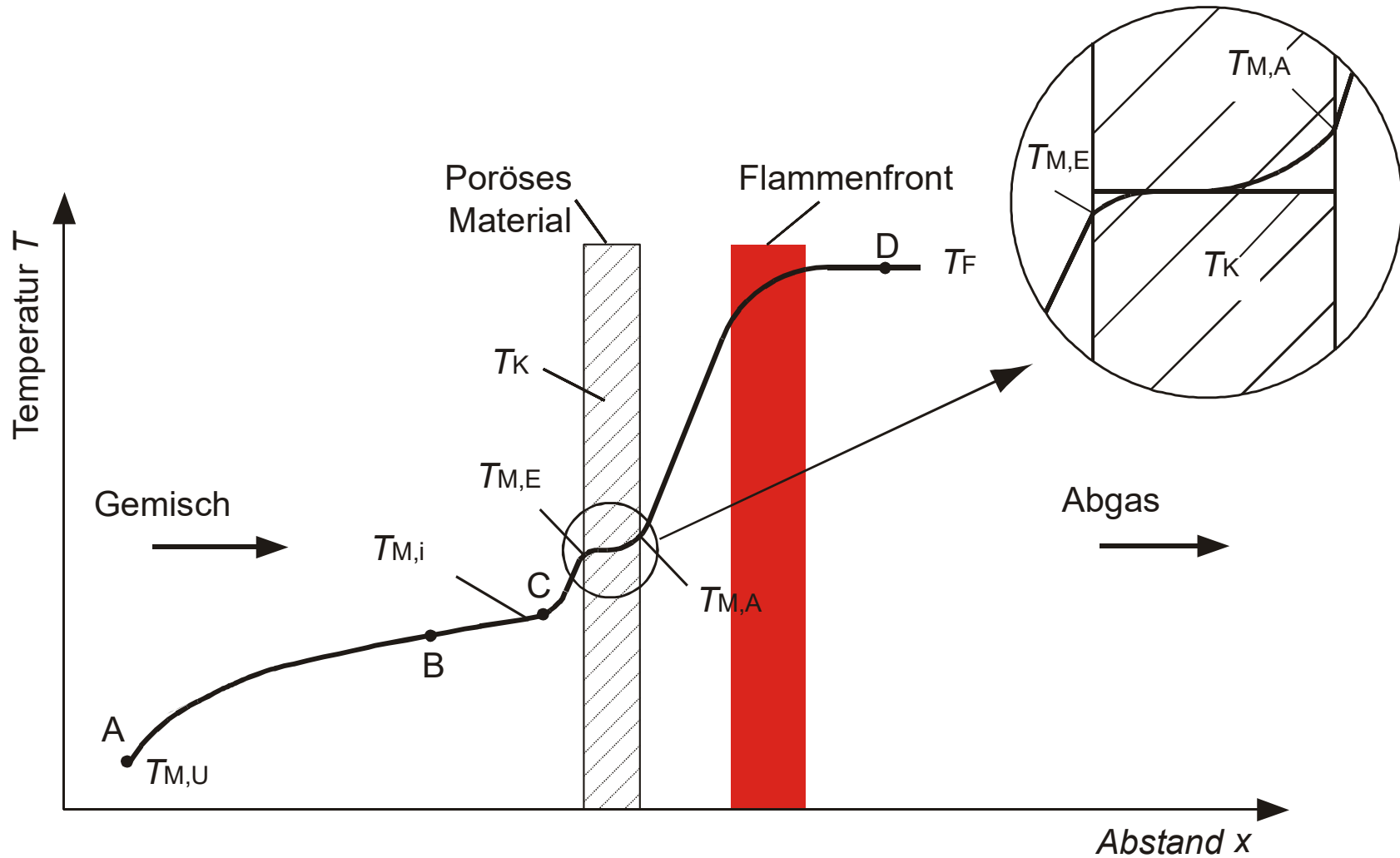
# Thermodynamisches Modell des Strahlungsbrenners



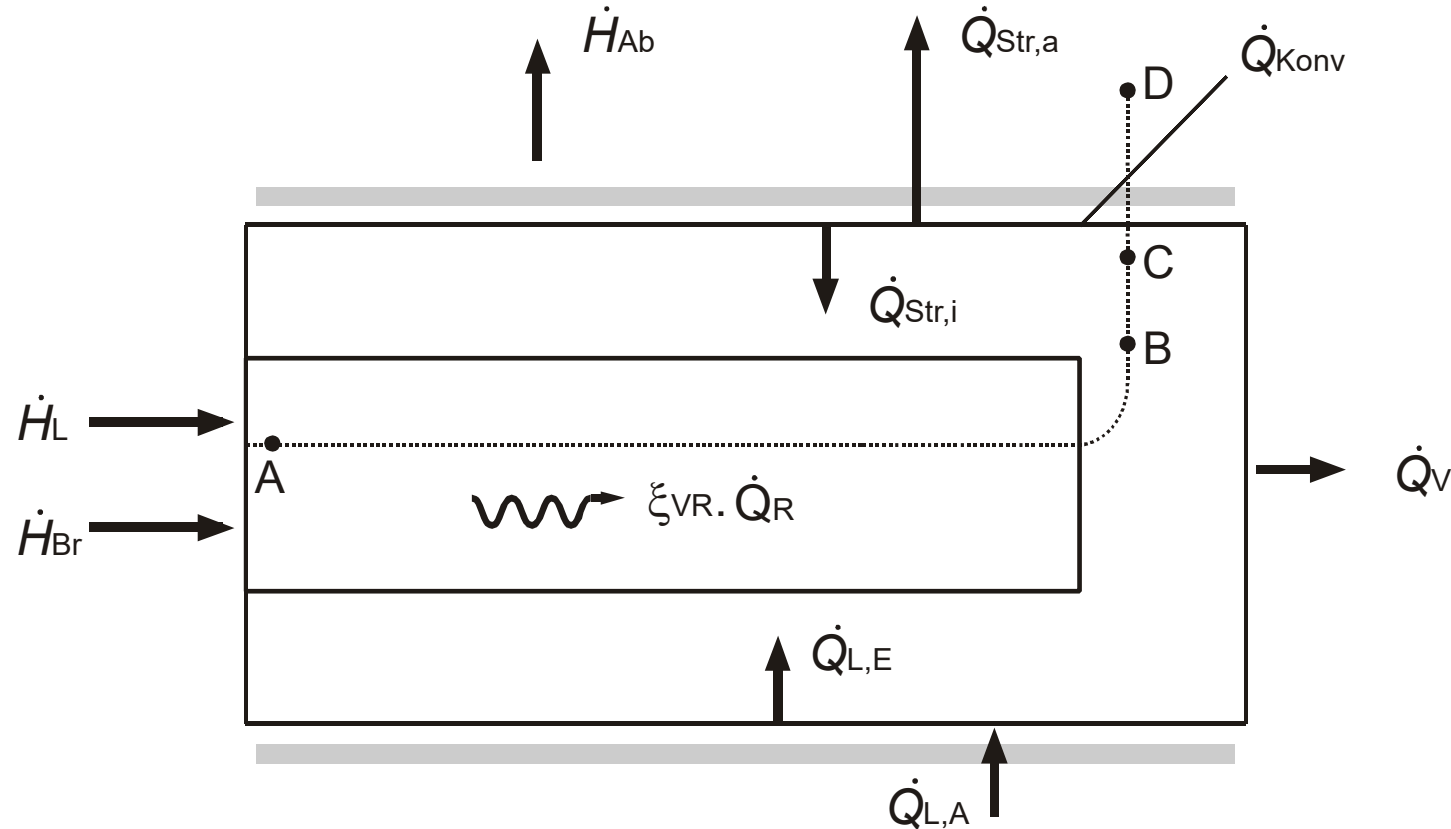
## Annahmen:

- Dünne Reaktionszone
- Keine Reaktion im porösen Material
- Gasabsorption wird vernachlässigt
- Kein Temperaturgradient innerhalb des Metallgewebes

# Thermodynamisches Modell



# Thermodynamisches Modell



Brennstoff:

$$\dot{H}_{Br}$$

Luft:

$$\dot{H}_L$$

Abgas:

$$\dot{H}_{Ab}$$

Strahlung, außen:

$$\dot{Q}_{Str,a}$$

Strahlung, innen:

$$\dot{Q}_{Str,i}$$

Konvektion:

$$\dot{Q}_{Konv}$$

Verluste:

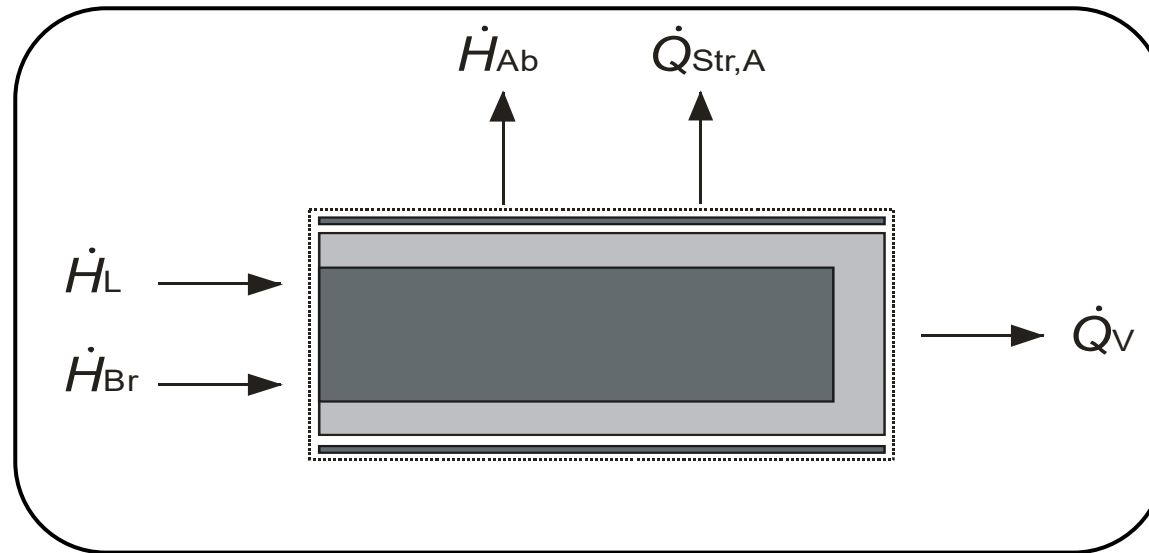
$$\dot{Q}_V$$

Wärmeleitung, Austritt:  $\dot{Q}_{L,A}$

Wärmeleitung, Eintritt:  $\dot{Q}_{L,E}$

Reaktionswärme:  $\dot{Q}_R$

Teilumsatz:  $\xi_{VR} \cdot \dot{Q}_R$



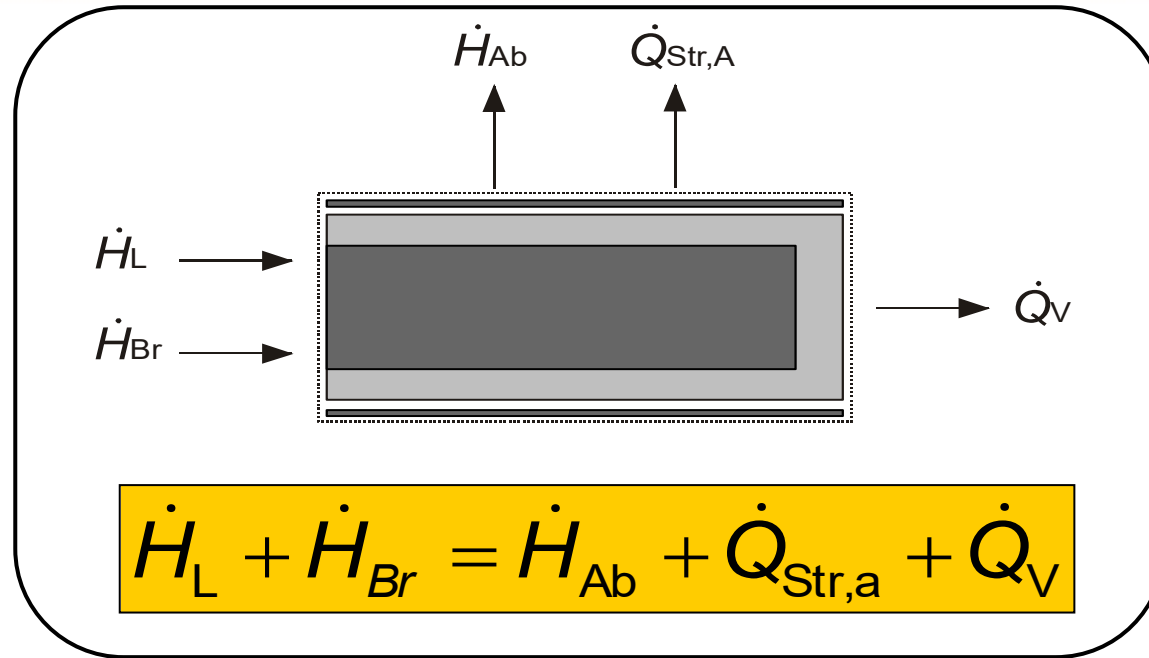
$$\dot{m}_G = \dot{m}_{Br} + \dot{m}_L$$

$$\dot{m}_{Br} = \frac{P}{H_u}$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{Br} L_{min} \lambda$$

$$\rho_G \cdot u_l = f(T_F, \lambda)$$

$$\rho_G \cdot u_l = \frac{\dot{m}_G}{A_K} = \frac{P}{H_u A_K} (1 + \lambda L_{min})$$

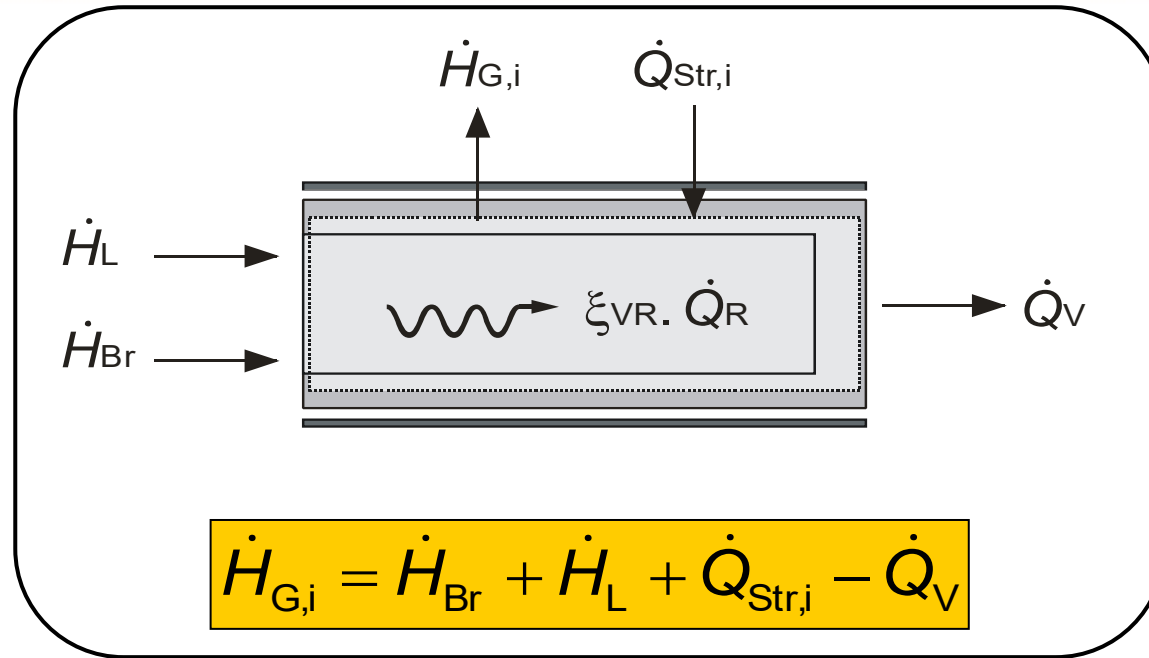


$$\dot{Q}_R = \dot{m}_L h_{L,U} + \dot{m}_{Br} h_{Br,U} - \dot{m}_{Ab} h_{Ab,U} = \dot{m}_{Br} H_u$$

$$\dot{m}_L c_{p,L} (T_L - T_U) + \dot{m}_{Br} c_{p,Br} (T_{Br} - T_U) + \dot{Q}_R = \dot{m}_{Ab} c_{p,Ab} (T_F - T_U) + \dot{Q}_{Str,a} + \dot{Q}_V$$

$$\dot{Q}_{Str,a} \approx \sigma \bar{\varepsilon}_K A_K (T_K^4 - T_W^4)$$

# Gemischtemperatur



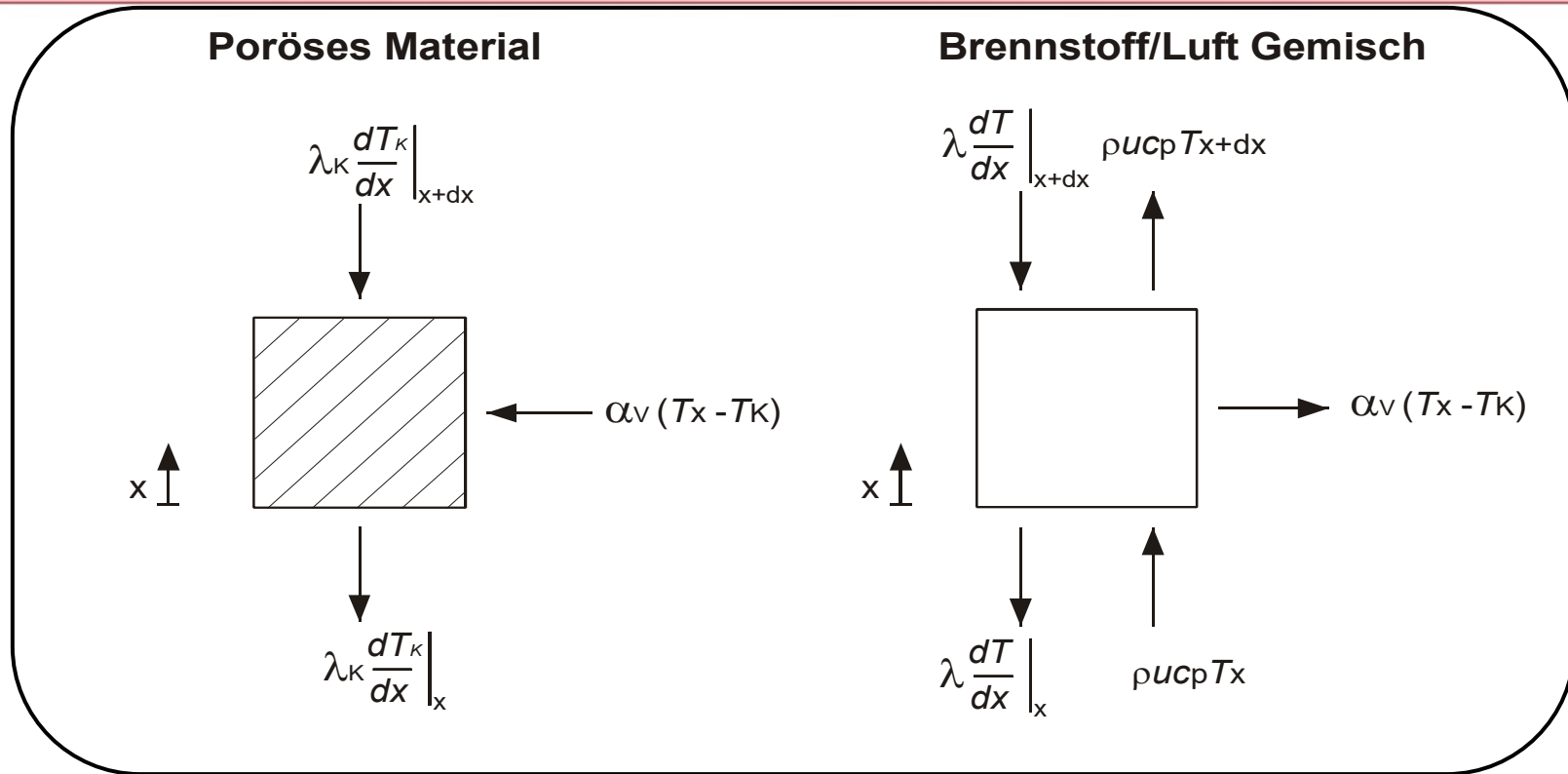
$$\dot{Q}_{Str,i} = \sigma \bar{\epsilon}_K \epsilon_i \Phi_{K,i} A_K (T_K^4 - T_{G,i}^4)$$

$$\xi_{SVR} = f(T_{G,i})$$

$$\dot{m}_G c_{p,G} (T_{G,i} - T_U) = \dot{m}_L c_{p,L} (T_L - T_U) + \dot{m}_{Br} c_{p,Br} (T_{Br} - T_U) + \xi_{SVR} \dot{Q}_R + \dot{Q}_{Str,i} - \dot{Q}_V$$

$$T_{G,i} = f(T_K)$$

# Gastemperatur innerhalb des porösen Materials



**Gasphase:**

$$\lambda_G \left( \frac{d^2 T}{dx^2} \right) - \rho u c_p \frac{dT}{dx} - \alpha_v (T - T_K) = 0$$

**Festphase:**

$$\lambda_K \left( \frac{d^2 T_K}{dx^2} \right) + \alpha_v (T - T_K) = 0$$

# Gastemperatur innerhalb des porösen Materials

Péclet-Zahl:  $Pe = \frac{\rho u c_p s}{\lambda_G}$       Biot-Zahl:  $Bi = \frac{\alpha_v s^2}{\lambda_s}$

Dimensionslose  
Temperatur und Abstand

$$\phi = \frac{T - T_U}{T_K - T_U} \quad x^* = \frac{x}{s}$$

$$\left( \frac{d^2 \phi}{dx^{*2}} \right) - Pe \frac{d\phi}{dx^*} - Bi(\phi - 1) = 0$$

Randbedingung:

$$x^* = 1 \quad \phi = \phi_{G,A} = \frac{T_{G,A} - T_U}{T_K - T_U} \quad \zeta_{G,A} = \left. \frac{d\phi}{dx^*} \right|_A = \left. \frac{dT}{dx} \right|_A \frac{s}{(T_K - T_U)}$$

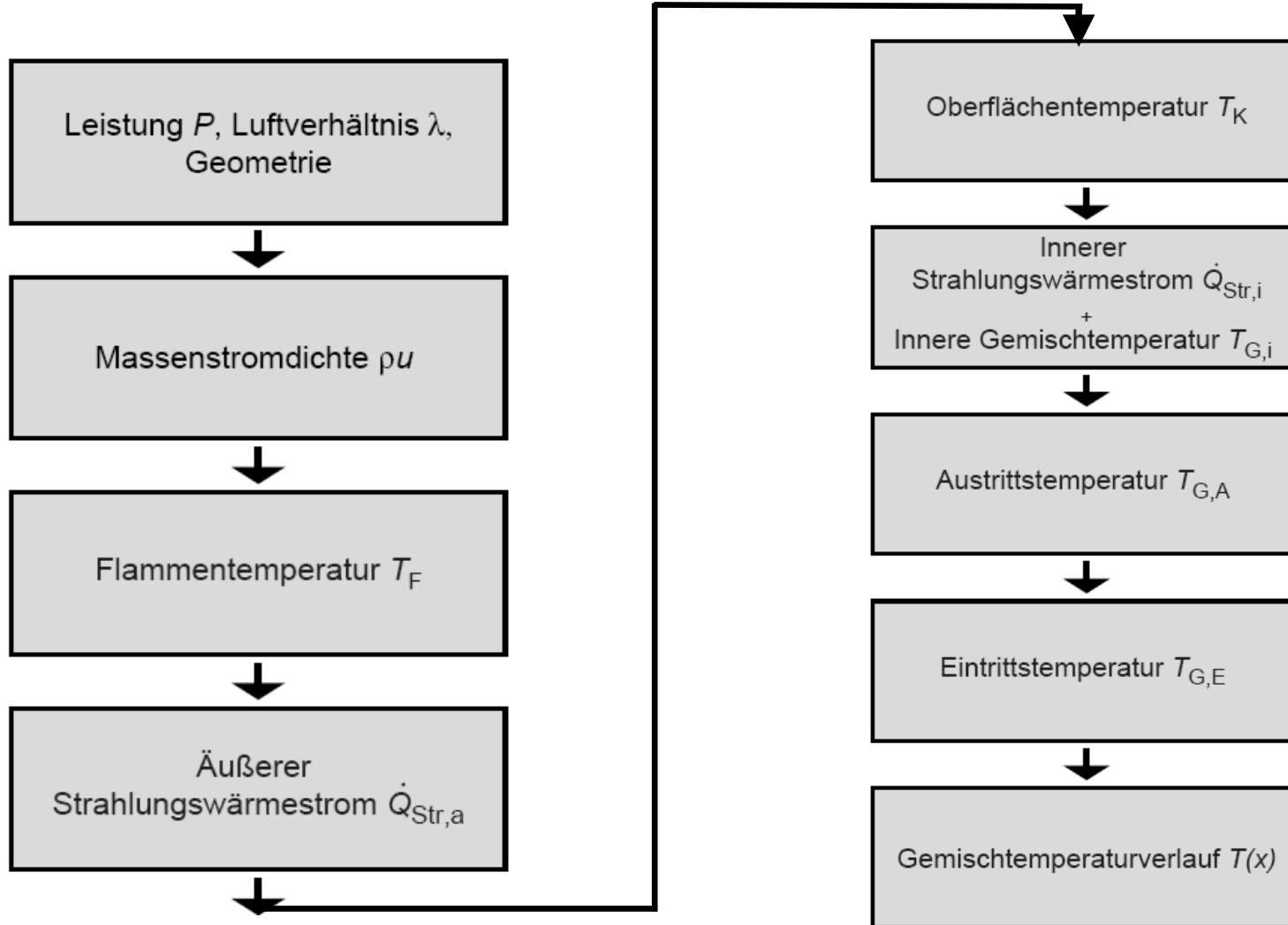
Lösung:

$$T(x) = 1 + \frac{1}{2C} [(C - Pe)(\phi_{G,A} - 1) + 2\zeta_{G,A}] e^{\left( \frac{(Pe+C)(x^*-1)}{2} \right)} + \frac{1}{2C} [(C + Pe)(\phi_{G,A} - 1) - 2\zeta_{G,A}] e^{\left( \frac{(Pe-C)(x^*-1)}{2} \right)}$$

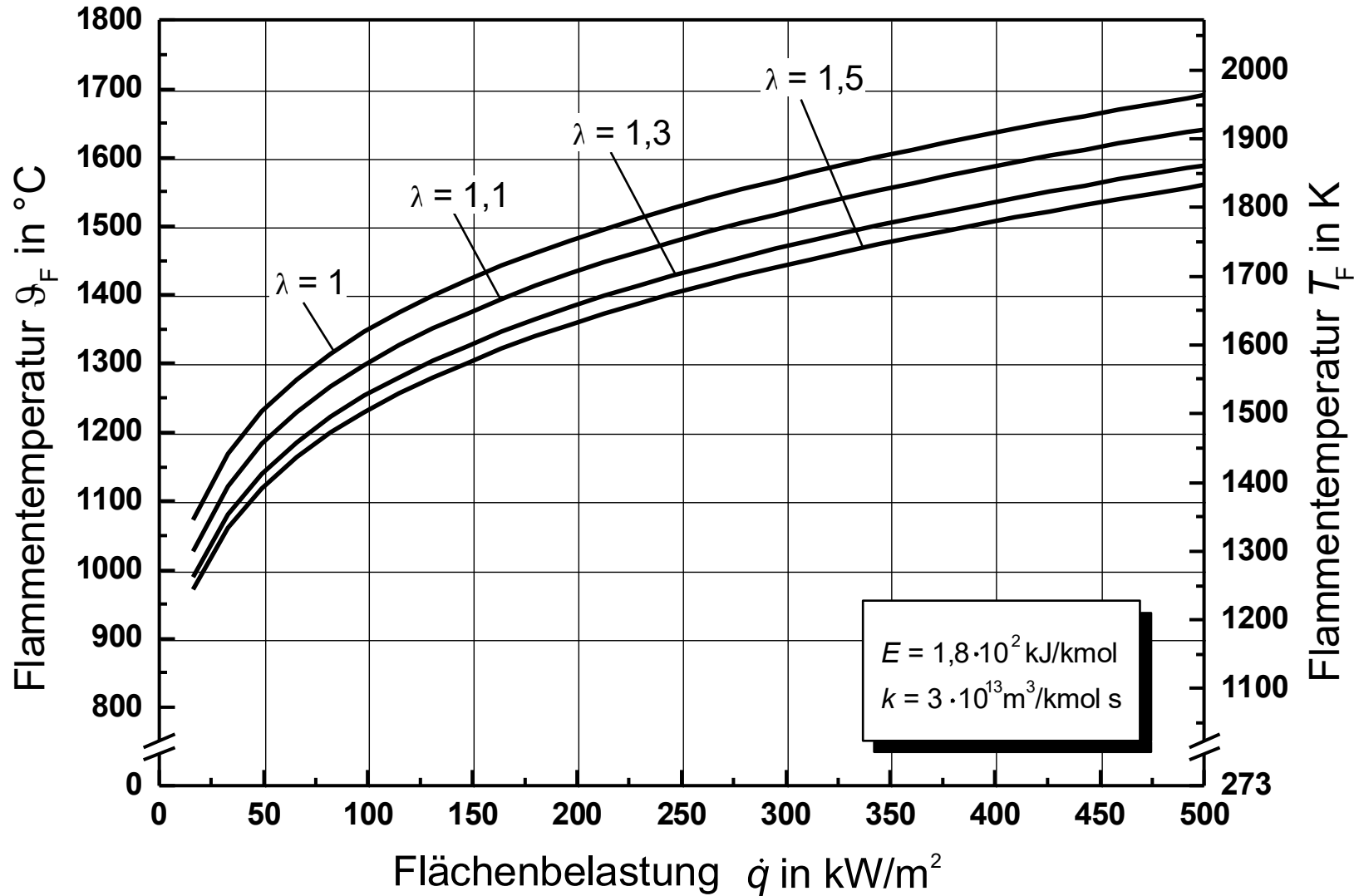
$$C = \sqrt{Pe^2 + 4Bi}$$

- **hier fehlen die Randbedingungen!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!**

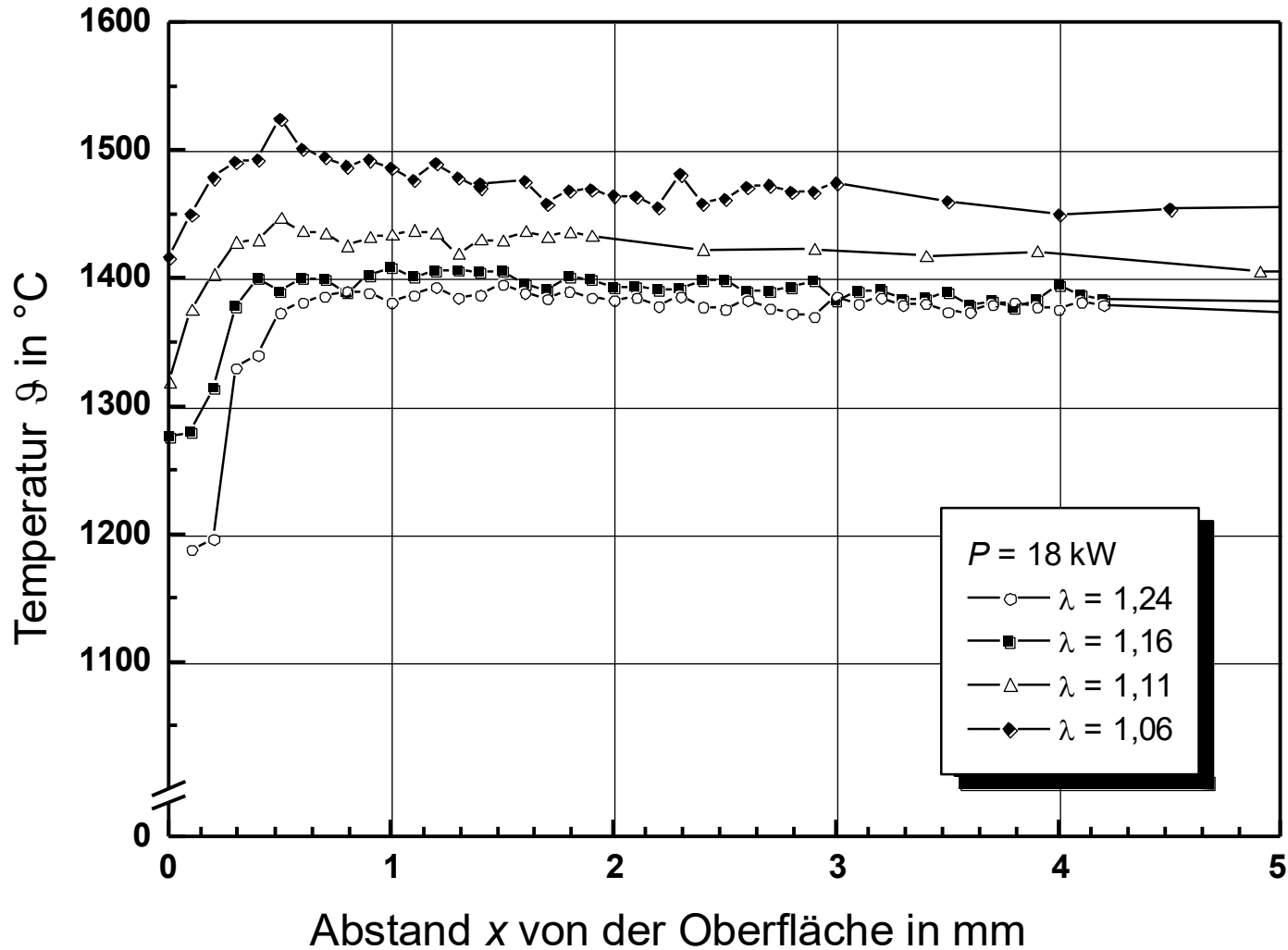
# Berechnungsschema des physikalischen Modells



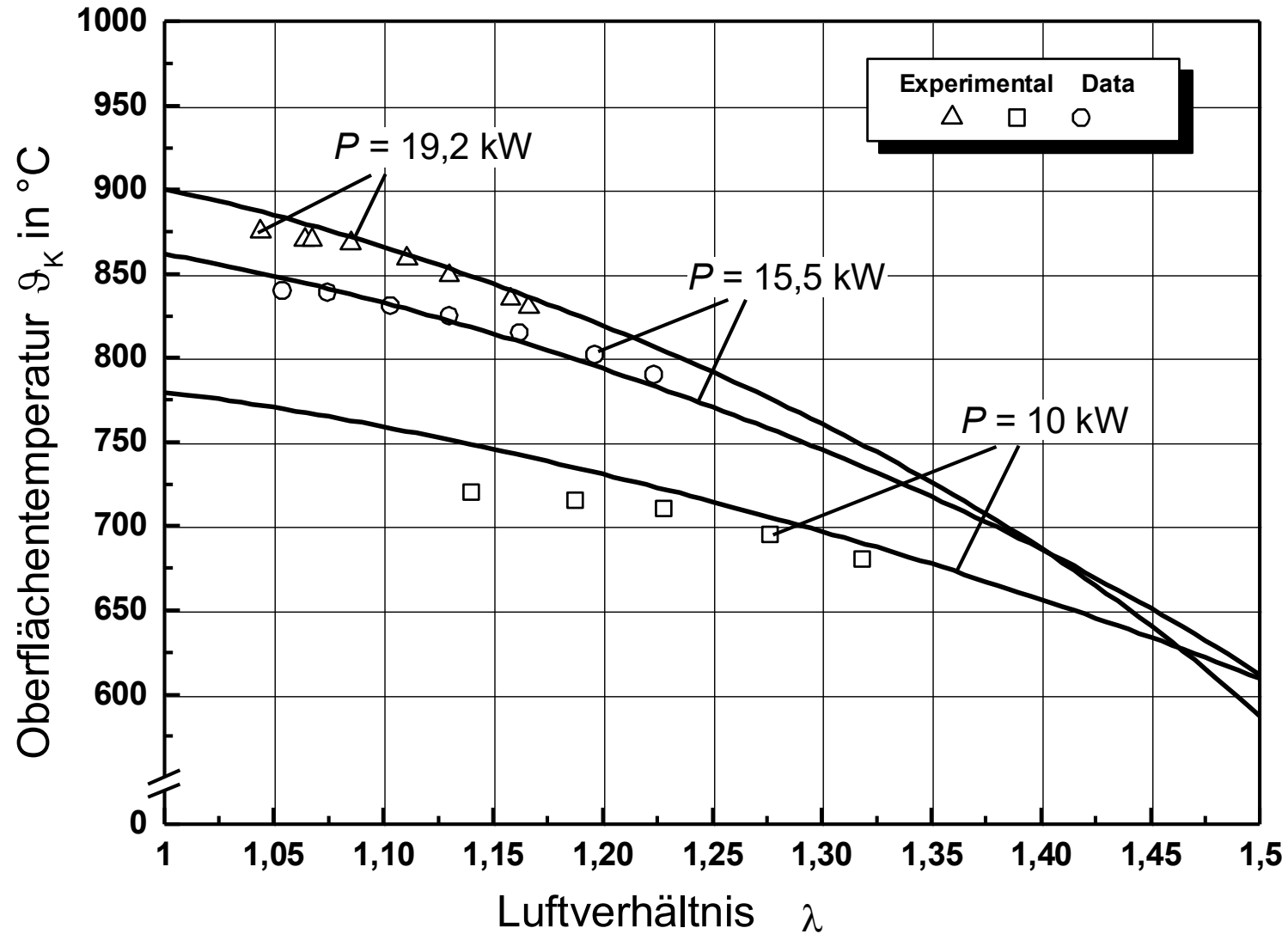
# Flammentemperatur



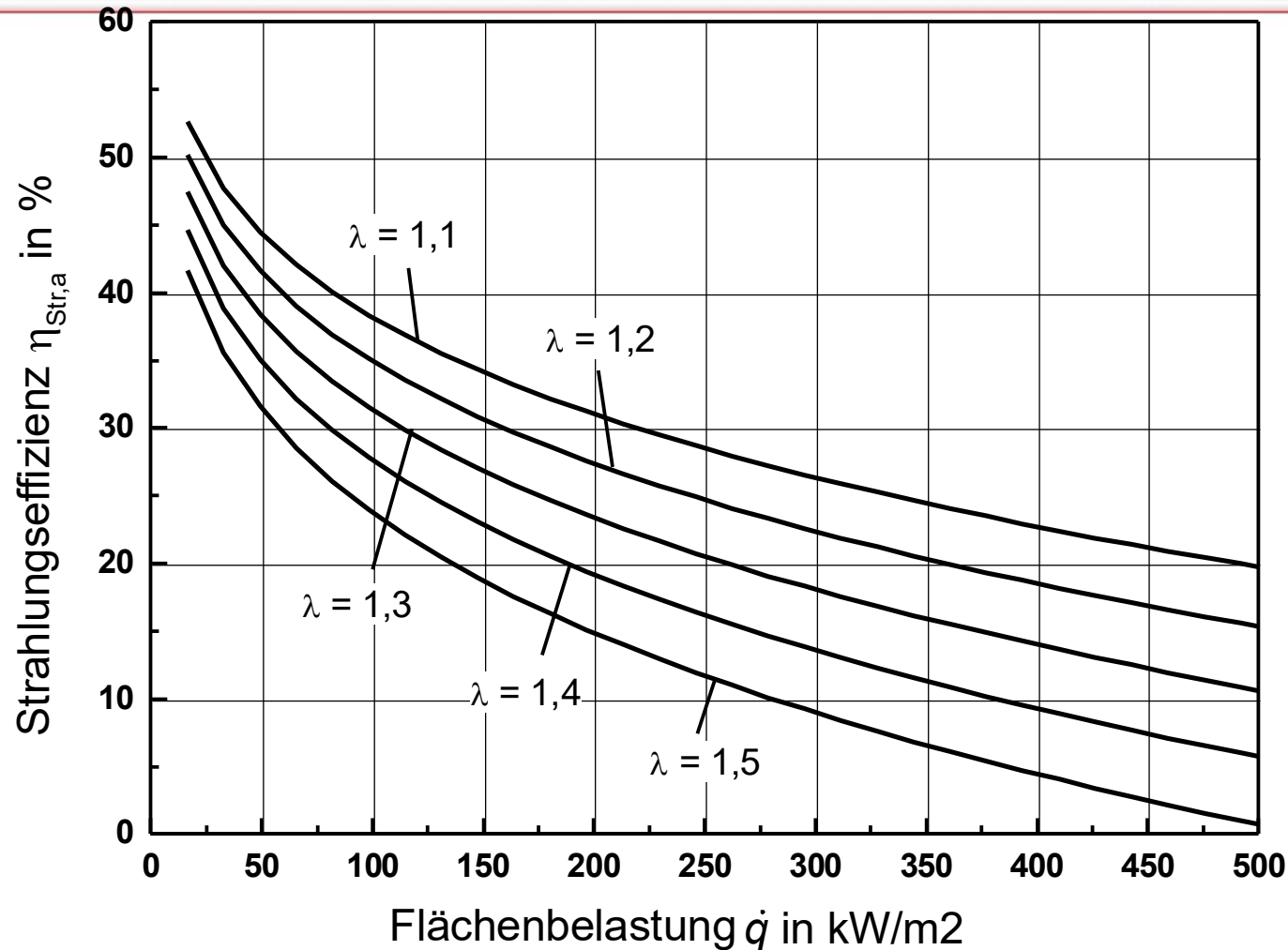
# Flammentemperatur



# Oberflächentemperatur

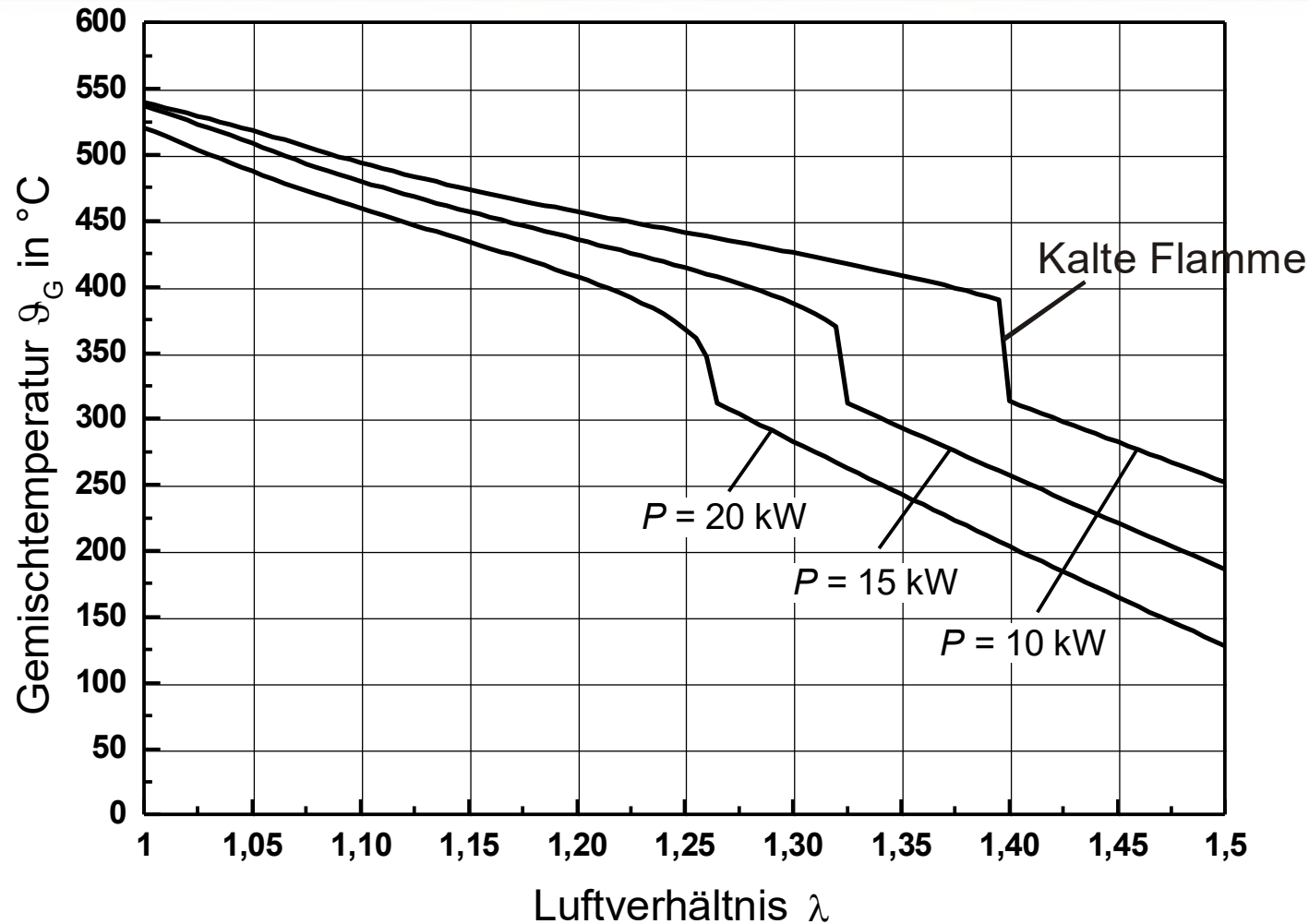


# Strahlungseffizienz



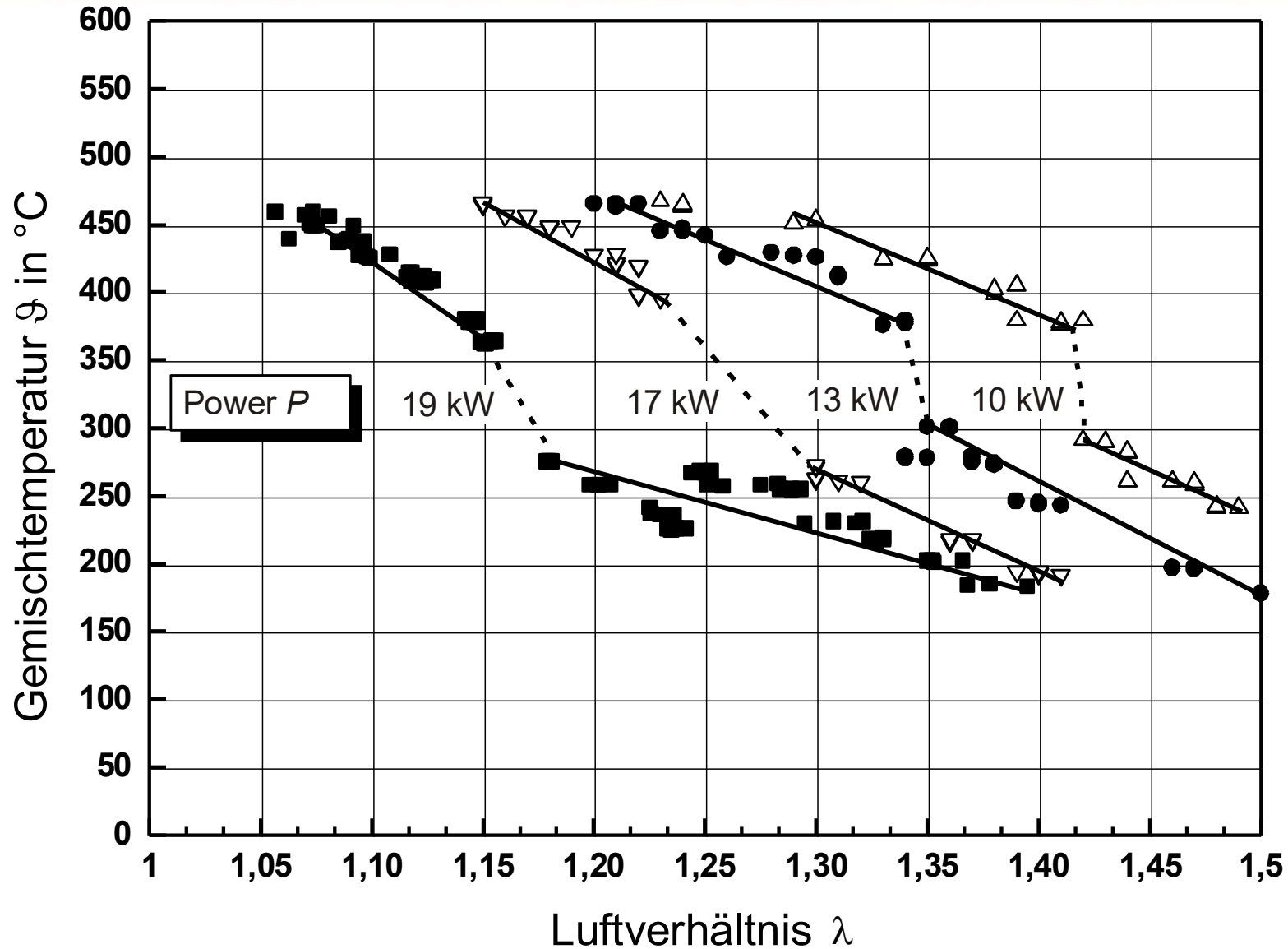
Strahlungseffizienz nimmt mit steigender Flächenbelastung und Luftverhältnis ab.  
Die maximale Strahlungseffizienz des Brenners beträgt ca. 30 %

# Berechnete Gemischtemperatur

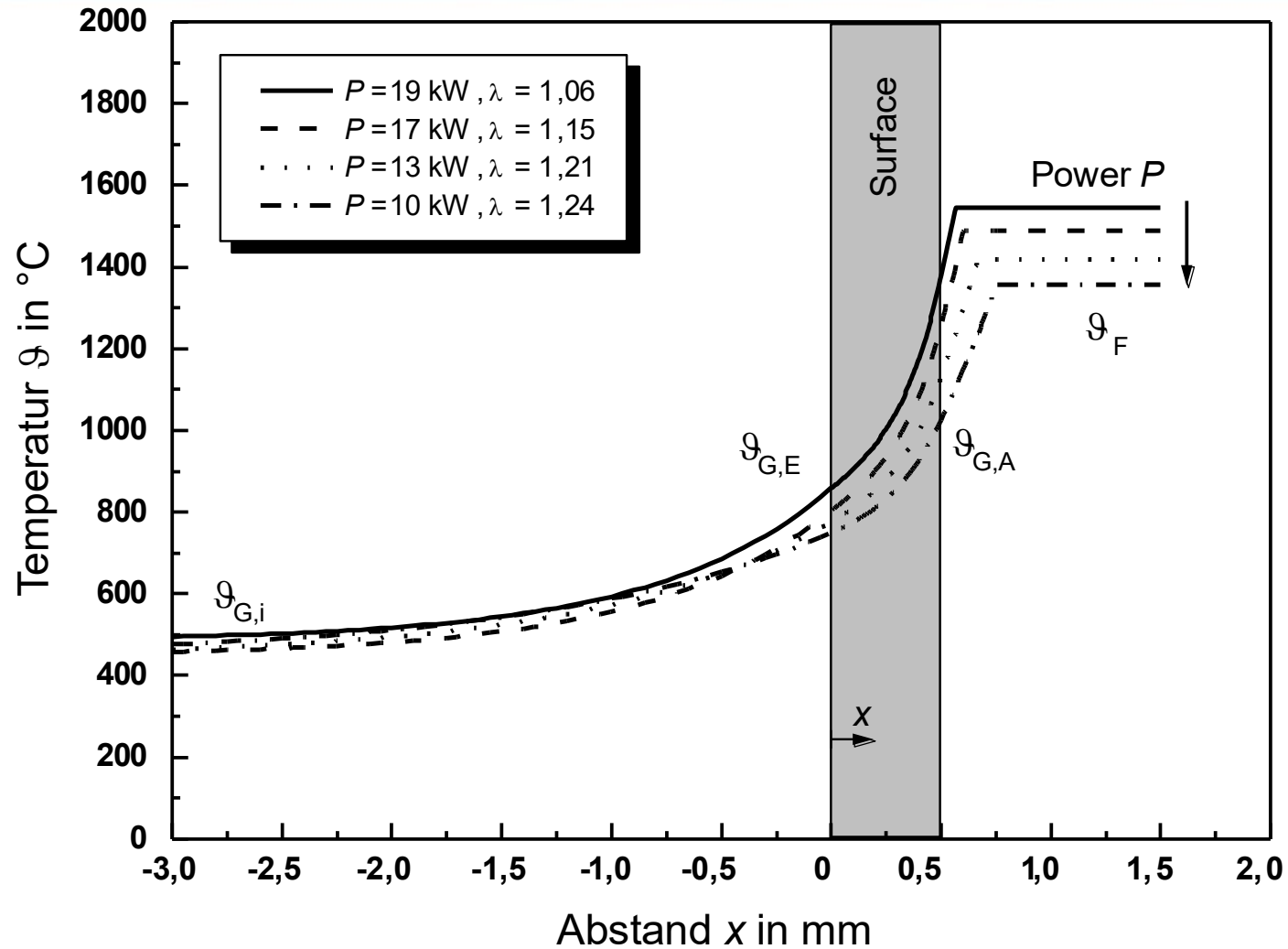


Gemischtemperatur nimmt mit steigender Leistung und Luftverhältnis ab.  
Oberflächentemperatur zeigt das umgekehrte Verhalten

# Gemischtemperatur (experimentelle Daten)

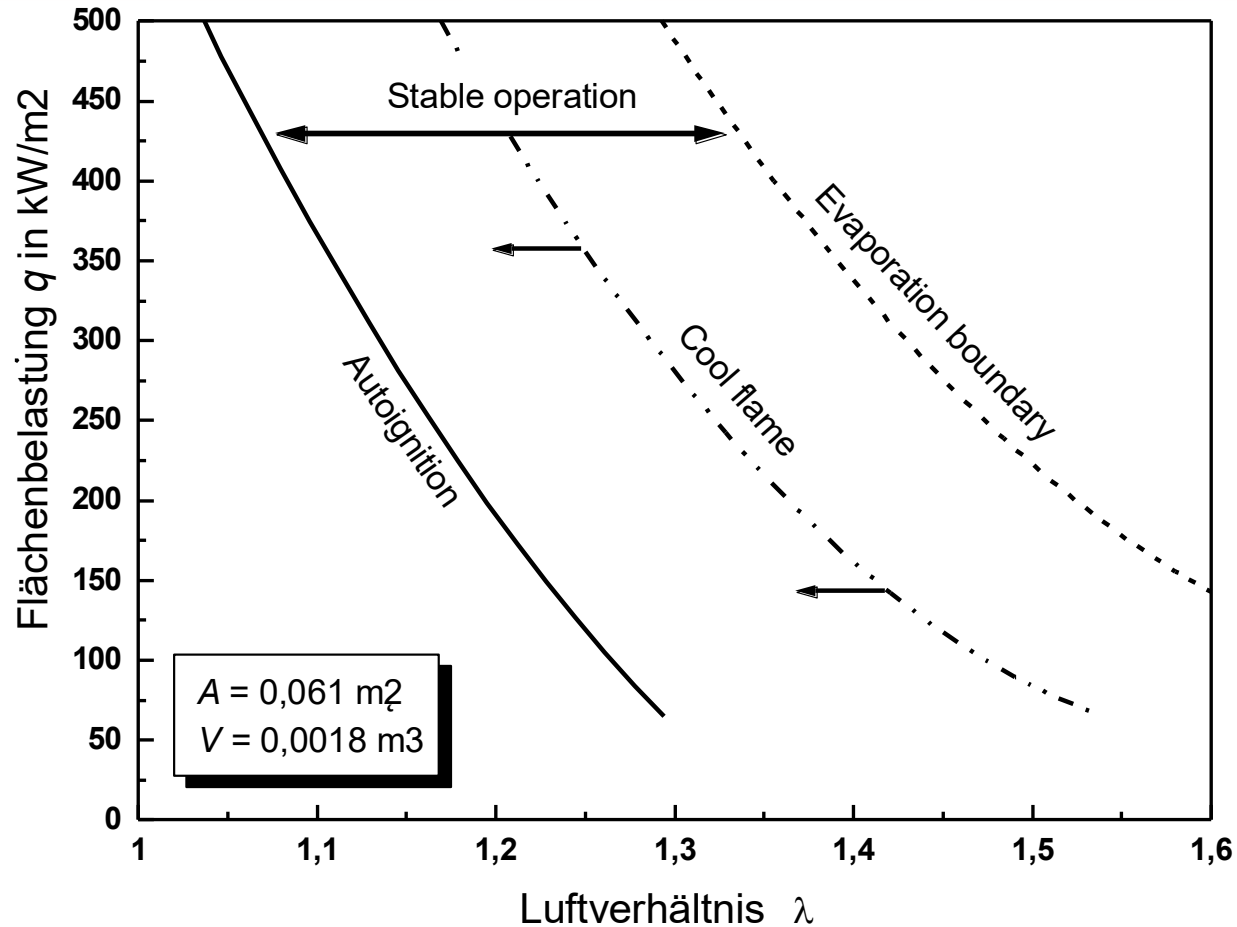


# Temperature development of the gas mixture



Flammenabstand nimmt mit steigender Leistung ab  
Gleiche Gemischtemperaturen im Mischvolumen

# Brennerbetriebsgrenzen



Der Brennerbetrieb ist durch die Verdampfung und die Selbstzündung begrenzt  
 Die Kalte Flamme entsteht aber sie ist nicht notwendig für die Verdampfung  
 Geometrieänderung verschiebt nur den Betriebsbereich

# Gemischtemperatur

