

Turbulente Verbrennung

Friedrich Dinkelacker

Lehrstuhl für Thermodynamik und Verbrennung
Institut für Fluid- und Thermodynamik
Fachbereich Maschinenbau
Universität Siegen

DPG - Arbeitskreis Energie - Bad Honnef - 20. April 2007

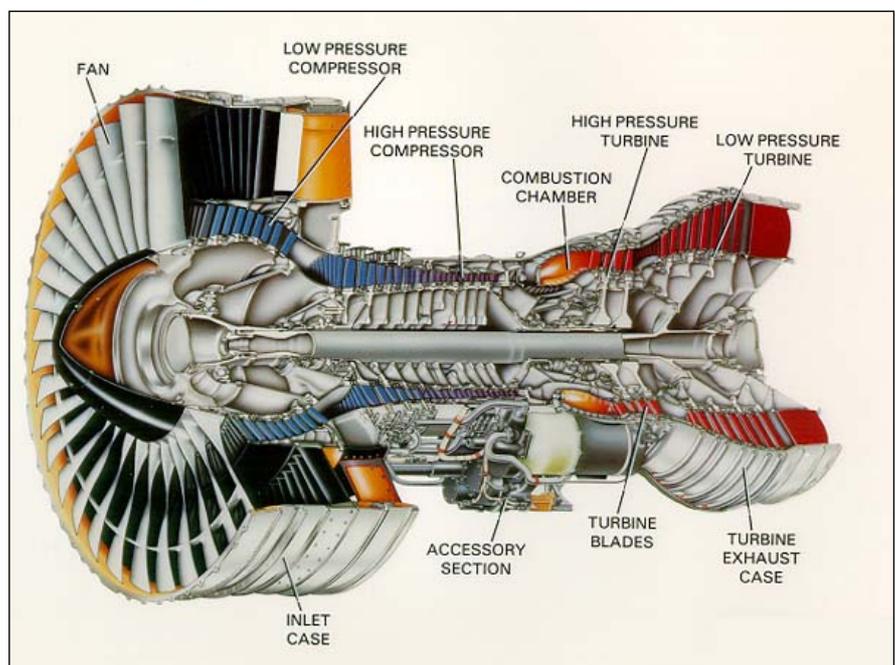
DPG (1)

Turbulente Verbrennung

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

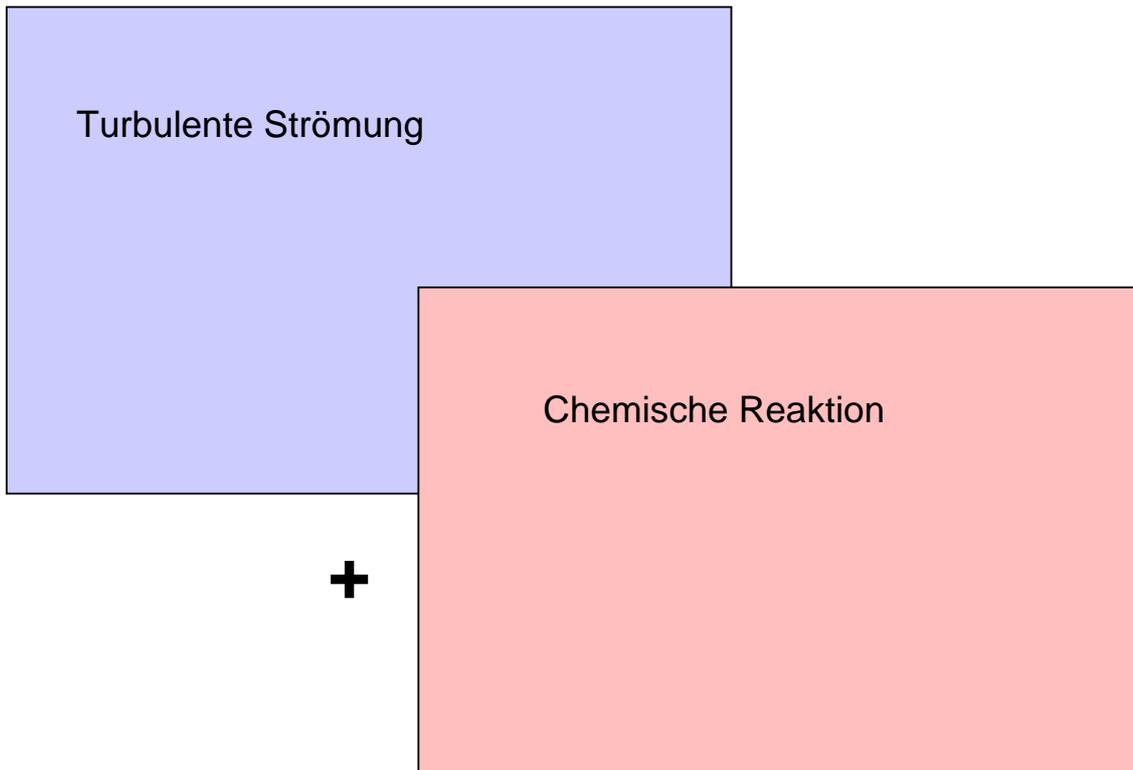
- **Stromerzeugung**
Kohlekraftwerke
Gas-Kraftwerke
- **Wärmenutzung**
Heizung
Feuerungen
- **Verkehr**

Pratt&Whitney
PW 4000

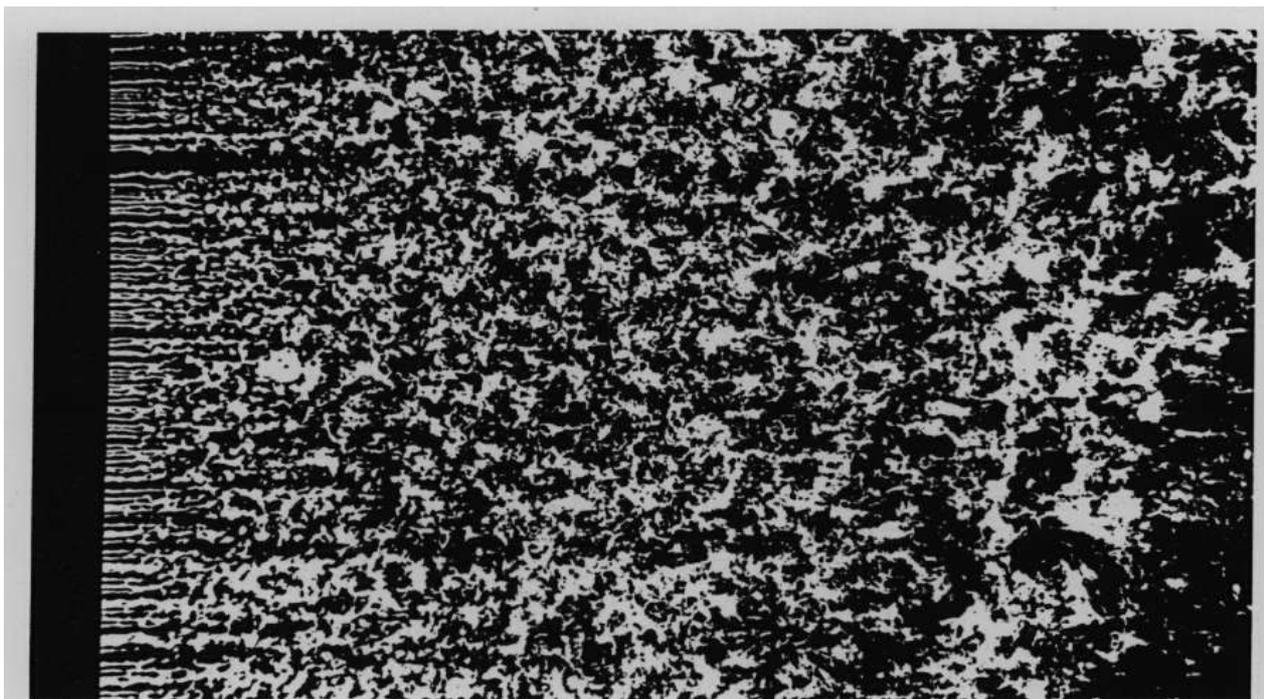


(*) Direkte nichttechnische Solarenergienutzung (Licht, Wärme, Photosynthese) ist allerdings vielfach höher (H. Scheer)

DPG (2)



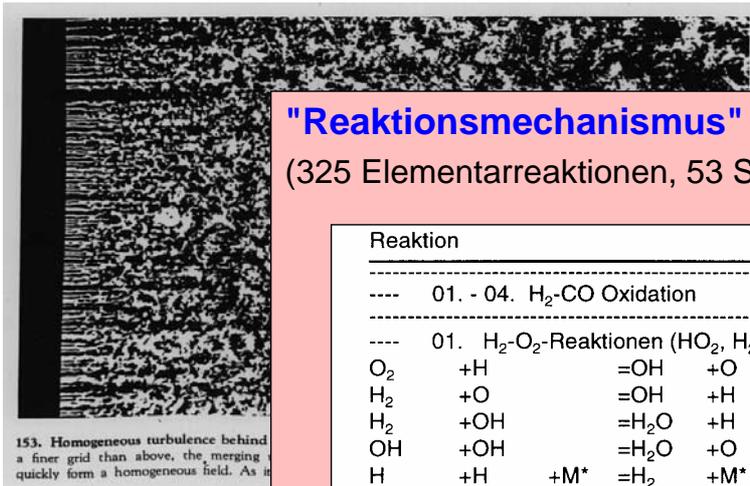
DPG (3)



153. Homogeneous turbulence behind a grid. Behind a finer grid than above, the merging unstable wakes quickly form a homogeneous field. As it decays down-

stream, it provides a useful approximation to the idealization of isotropic turbulence. Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib

DPG (4)



153. Homogeneous turbulence behind a finer grid than above, the merging quickly form a homogeneous field. As it

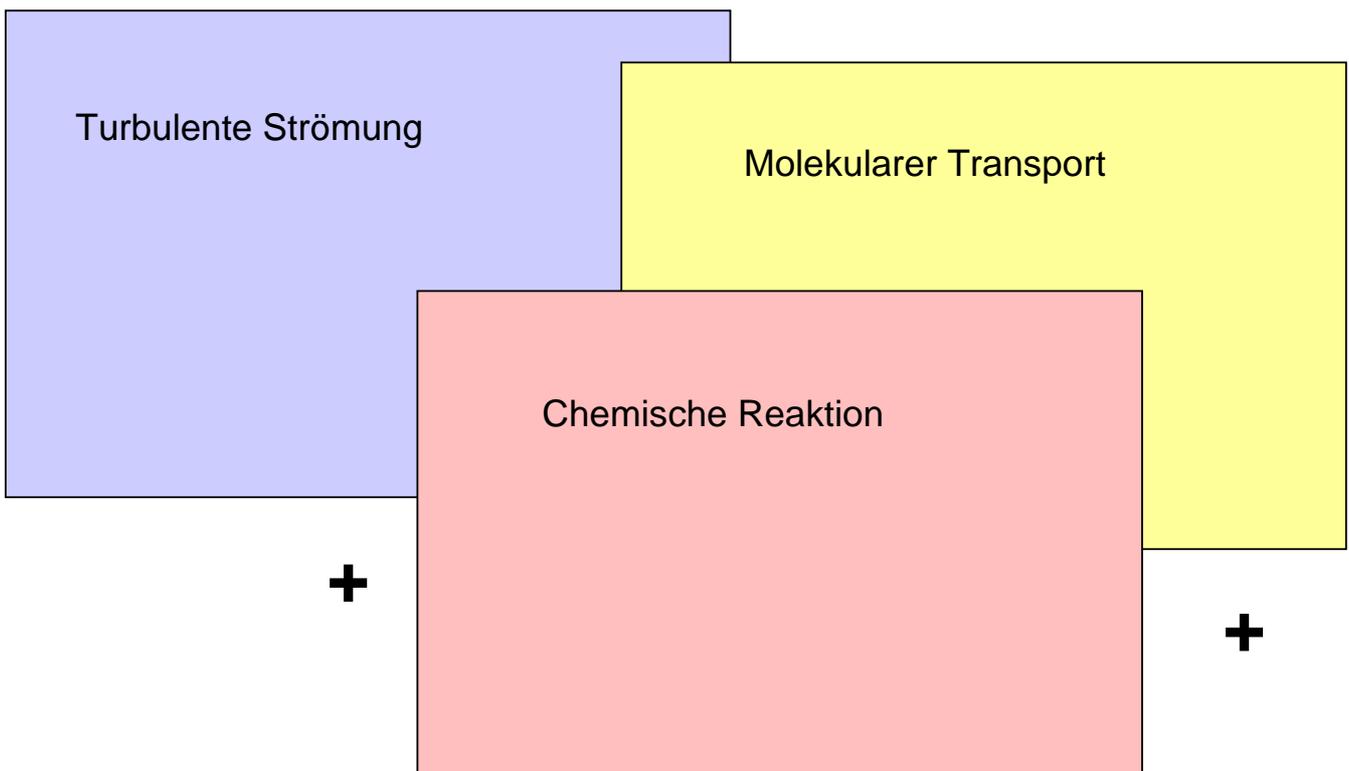
"Reaktionsmechanismus"

(325 Elementarreaktionen, 53 Spezies)

Reaktion	A[cm,mol,s]	b	E/kJ·mol ⁻¹
---- 01. - 04. H ₂ -CO Oxidation			
---- 01. H ₂ -O ₂ -Reaktionen (HO ₂ , H ₂ O ₂ ausgeschlossen)			
O ₂ +H =OH +O	2.00·10 ¹⁴	0.0	70.3
H ₂ +O =OH +H	5.06·10 ⁰⁴	2.67	26.3
H ₂ +OH =H ₂ O +H	1.00·10 ⁰⁸	1.6	13.8
OH +OH =H ₂ O +O	1.50·10 ⁰⁹	1.14	0.42
H +H +M* =H ₂ +M*	1.80·10 ¹⁸	-1.0	0.00
O +O +M* =O ₂ +M*	2.90·10 ¹⁷	-1.0	0.00
H +OH +M* =H ₂ O +M*	2.20·10 ²²	-2.0	0.00
---- 02. HO ₂ -Bildung/Verbrauch			
H +O ₂ +M* =HO ₂ +M*	2.30·10 ¹⁸	-0.8	0.00
HO ₂ +H =OH +OH	1.50·10 ¹⁴	0.0	4.20
HO ₂ +H =H ₂ +O ₂	2.50·10 ¹³	0.0	2.90
HO ₂ +H =H ₂ O +O	3.00·10 ¹³	0.0	7.20
HO ₂ +O =OH +O ₂	1.80·10 ¹³	0.0	-1.70
HO ₂ +OH =H ₂ O +O ₂	6.00·10 ¹³	0.0	0.00
---- 03. H ₂ O ₂ -Bildung/Verbrauch			
HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	2.50·10 ¹¹	0.0	-5.20
OH +OH +M* =H ₂ O ₂ +M*	3.25·10 ²²	-2.0	0.00
H ₂ O ₂ +H =H ₂ +HO ₂	1.70·10 ¹²	0.0	15.7
H ₂ O ₂ +H =H ₂ O +OH	1.00·10 ¹³	0.0	15.0

+

PG (5)

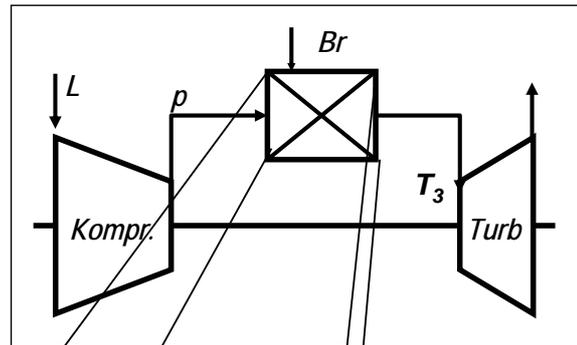


+

+

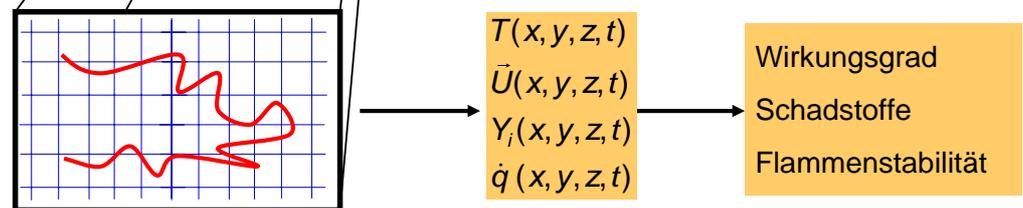
DPG (6)

Traditionell:
• 1 Bilanzraum



Bsp.: Wirkungsgrad bestimmt durch T_3 und p

Heute:
• Detailkenntnis
• 10^6 Kontrollvolumen



Bsp.: Flamme-Wirbel-Wechselwirkung

DPG (7)

Inhalt

1. Turbulente Verbrennung

- Flammentypen
- Laminare Flamme
- Turbulente Flammen

2. Turbulente Flammenstruktur

- Planare Lasermesstechnik
- Turbulenz-Flamme Wechselwirkung
- Exkurs: Vermischungsoptimierung an Gasturbinen-Brenner

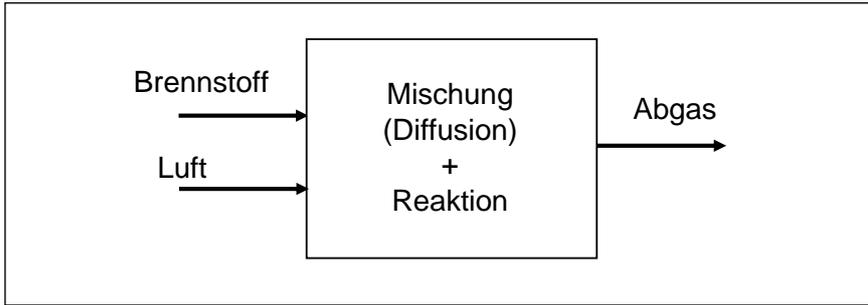
3. Numerische Berechnung

- Gleichungen sind bekannt - aber direkte Lösung kaum möglich
- Mittelungsproblematik
- Gibt es doch eine Lösung ?
- Turbulentes Flammenpropagationsmodell

DPG (8)

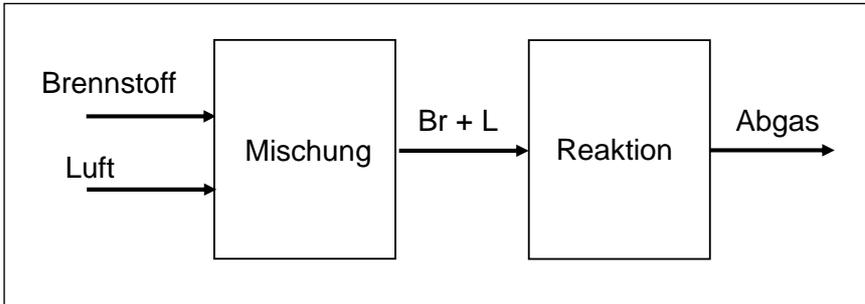
Flammentypen

Diffusionsflamme



Diffusionsflammen:
gelb
besser verstanden
(weil Mischung
ratenbestimmend)

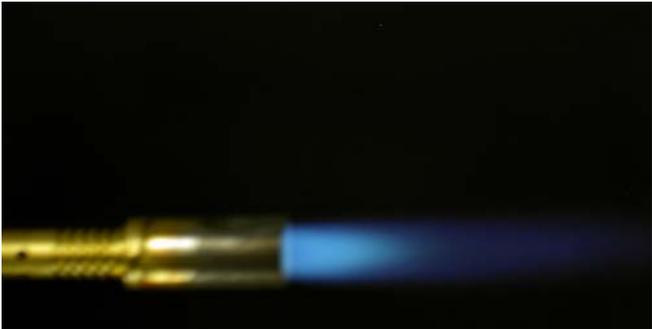
Vormischflamme



Vormischflammen:
blau
Reaktionsort hängt
empfindlich von
Wechselwirkung
Strömung - Reaktion
ab

DPG (9)

Flammentypen



Vormischflamme
(Premixed Flame)

Fotos von F. Dinkelacker, 2005



Diffusionsflamme
(Nonpremixed Flame)

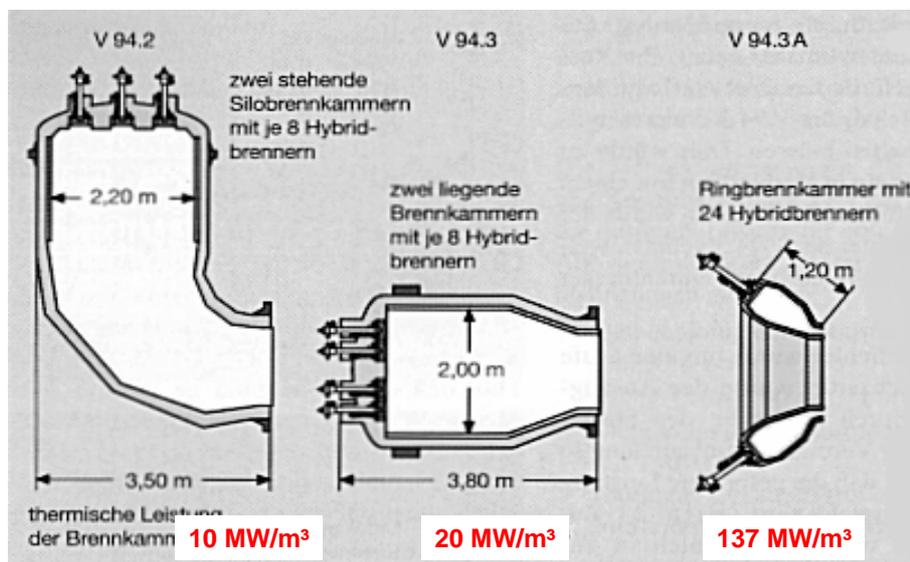
Butan/Luft
Auslassdurchmesser 18 mm
Brennstoffstrom ist konstant gehalten

DPG (10)

- Gasturbinen:**
- Diffusionsflamme -> Vormischflamme
 - Schadstoffarm 250 -> 25 ppm NOx

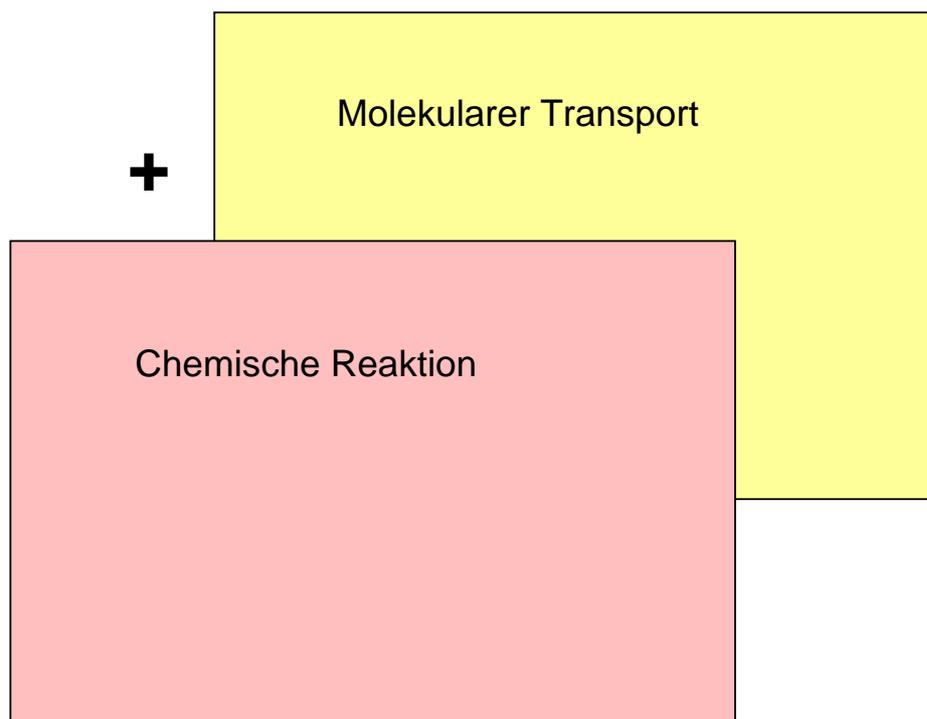
Hohe Turbulenzintensität

- erhöhte Leistungsdichte
- **Turbulenz-Flamme Wechselwirkung ?**
- **Flammenstabilität ?**



DPG (11)

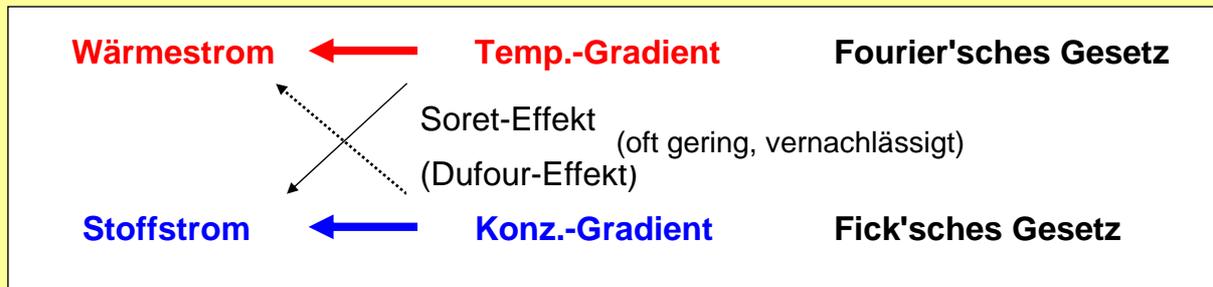
Laminare Verbrennung



DPG (12)

Molekularer Transport

Prozess: ungeordnete molekulare Bewegung



Thermal Diffusion $a = \lambda / \rho c_p$ [m²/s]

Diffusionskoeffizient D [m²/s]

Chemische Reaktion

Reaktion:



Reaktionsgeschwindigkeit:

$$\frac{d[A]}{dt} = -k \cdot [A]^a \cdot [B]^b \cdot \dots$$

Arrheniusgesetz:

$$k(T) = A \cdot T^b \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)$$

"Reaktionsmechanismus"

(325 Elementarreaktionen, 53 Spezies)

Reaktion	A[cm,mol,s]	b	E/kJ·mol ⁻¹
----- 01. - 04. H ₂ -CO Oxidation -----			
----- 01. H ₂ -O ₂ -Reaktionen (HO ₂ , H ₂ O ₂ ausgeschlossen) -----			
O ₂ +H =OH +O	2.00·10 ¹⁴	0.0	70.3
H ₂ +O =OH +H	5.06·10 ⁰⁴	2.67	26.3
H ₂ +OH =H ₂ O +H	1.00·10 ⁰⁸	1.6	13.8
OH +OH =H ₂ O +O	1.50·10 ⁰⁹	1.14	0.42
H +H +M* =H ₂ +M*	1.80·10 ¹⁸	-1.0	0.00
O +O +M* =O ₂ +M*	2.90·10 ¹⁷	-1.0	0.00
H +OH +M* =H ₂ O +M*	2.20·10 ²²	-2.0	0.00
----- 02. HO ₂ -Bildung/Verbrauch -----			
H +O ₂ +M* =HO ₂ +M*	2.30·10 ¹⁸	-0.8	0.00
HO ₂ +H =OH +OH	1.50·10 ¹⁴	0.0	4.20
HO ₂ +H =H ₂ +O ₂	2.50·10 ¹³	0.0	2.90
HO ₂ +H =H ₂ O +O	3.00·10 ¹³	0.0	7.20
HO ₂ +O =OH +O ₂	1.80·10 ¹³	0.0	-1.70
HO ₂ +OH =H ₂ O +O ₂	6.00·10 ¹³	0.0	0.00
----- 03. H ₂ O ₂ -Bildung/Verbrauch -----			
HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	2.50·10 ¹¹	0.0	-5.20
OH +OH +M* =H ₂ O ₂ +M*	3.25·10 ²²	-2.0	0.00

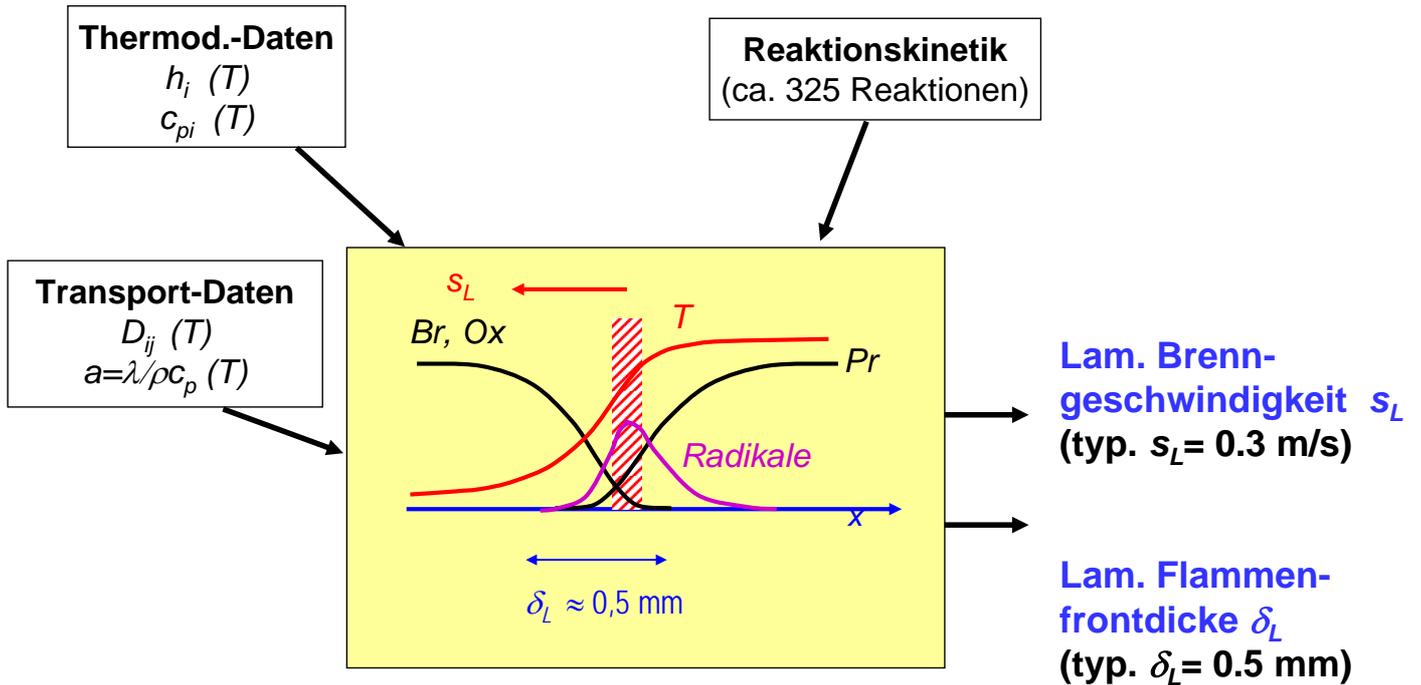
DPG (15)

Laminare Verbrennung

Zusammenfassung der Grundprozesse

<p>Diffusion (Spezies, Wärmeleitung)</p> $\frac{\partial Y_A}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} Y_A$ <p>(2. Ortsableitung)</p>	<p>Konvektion</p> $\frac{\partial Y_A}{\partial t} = -u \cdot \frac{\partial}{\partial x} Y_A$ <p>(1. Ortsableitung)</p>	<p>Reaktion</p> $\frac{\partial Y_A}{\partial t} \sim w_A \sim k \cdot Y_A \cdot Y_B \pm \dots$ <p>(0. Ortsableitung)</p>

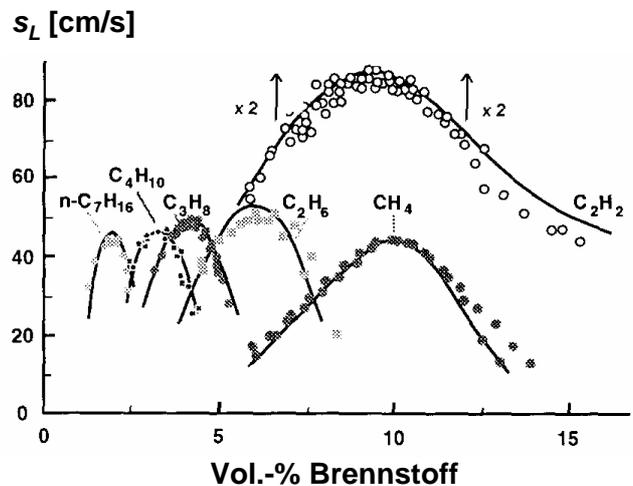
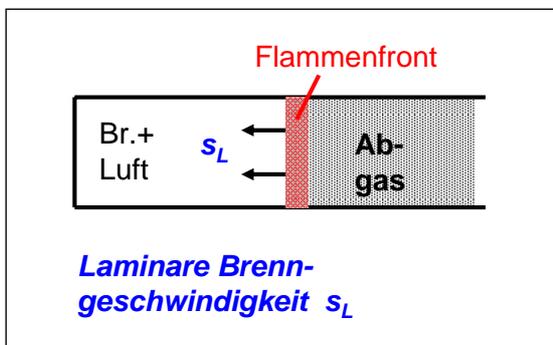
Detaillierte Berechnung jetzt möglich (CHEMKIN)



DPG (17)

Laminare Vormischflammen

Bsp.: Flammenausbreitung in ruhendem Gemisch



Theoretische Approximation:

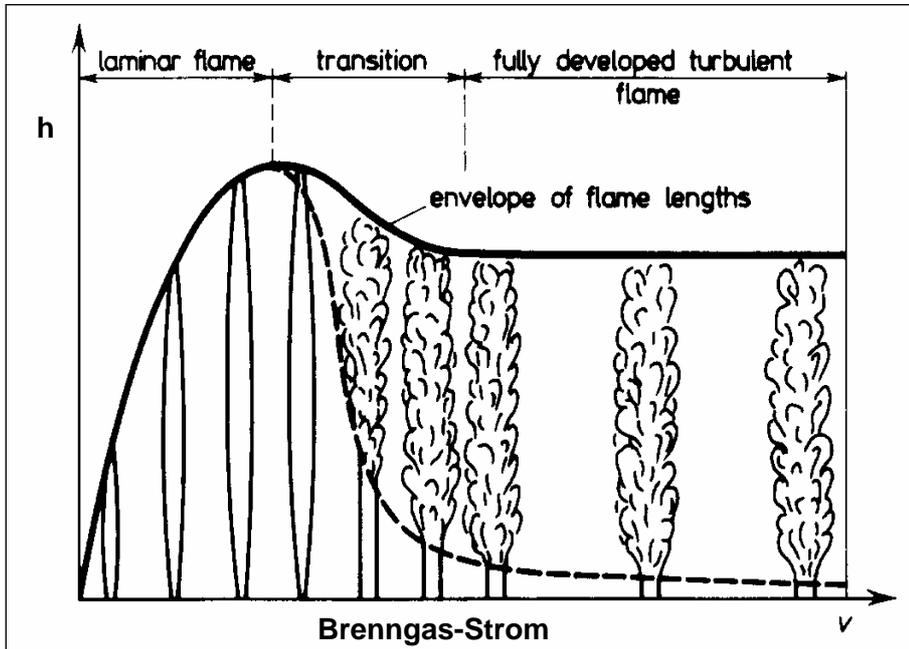
$$s_L \approx \sqrt{\frac{a}{\tau_{chen}}}$$

Quelle*: Warnatz, Maas, Dibble

DPG (18)

Warum turbulente Verbrennung ?

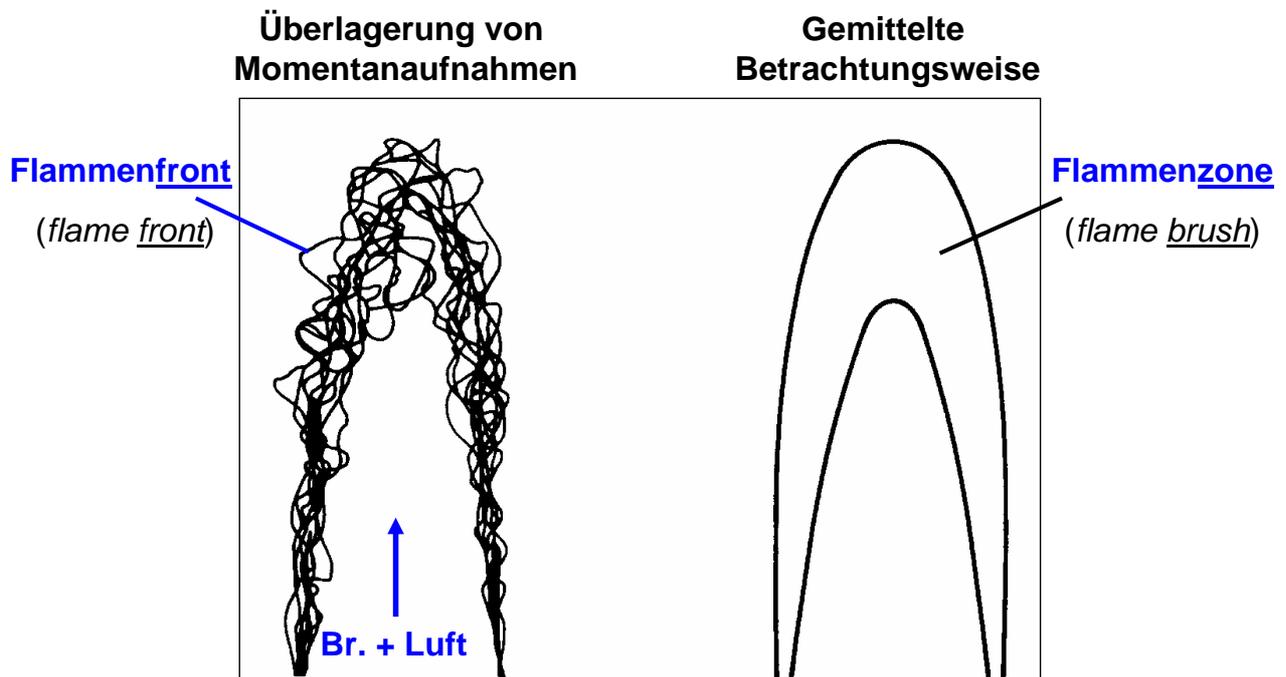
Vermischung wird unterstützt → Wärmefreisetzung/Volumen steigt
 → kleinere Brennräume möglich (Motor, Flugtriebwerk)



n. Hottel u. Hawthorne,
 3. Comb. Symp. (1949)

DPG (19)

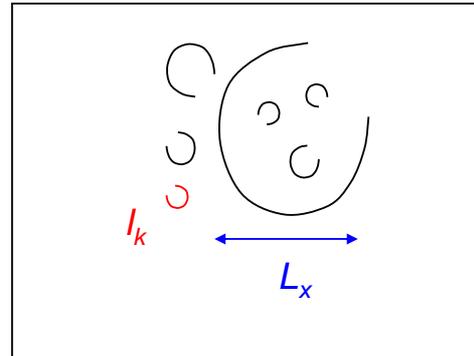
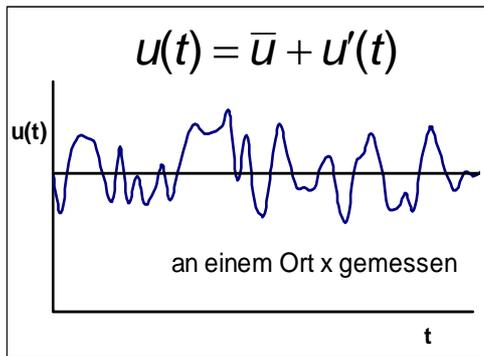
Struktur turbulenter Vormischflammen



DPG (20)

Turbulente Strömung:

- zeitabhängige fluktuierende Geschwindigkeiten
- dreidimensional
- Wirbelstrukturen (z.B. *Karman'sche Wirbelstraße*)
- chaotisch, nichtlinear



→ Schwankungsgeschwindigkeit
 $u' = u_{rms}$

→ Makrolänge L_x
 → Mikrolänge l_k

DPG (21)

Wechselwirkung Turbulenz - Chemie

Borghi-Peters-Diagramm

Turbulente Reynoldszahl

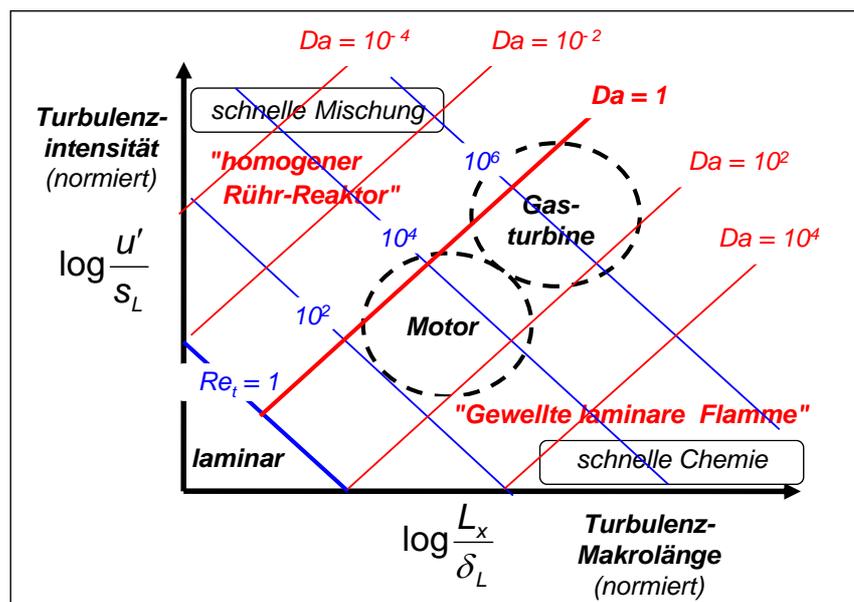
$$Re_t = \frac{u' \cdot L_x}{\nu}$$

Damköhlerzahl

$$Da = \frac{\tau_{turb}}{\tau_{reak}} = \frac{L_x / u'}{\delta_L / s_L}$$

(Umdrehung großer Wirbel)

(Durchquerung durch lam. Flamme)

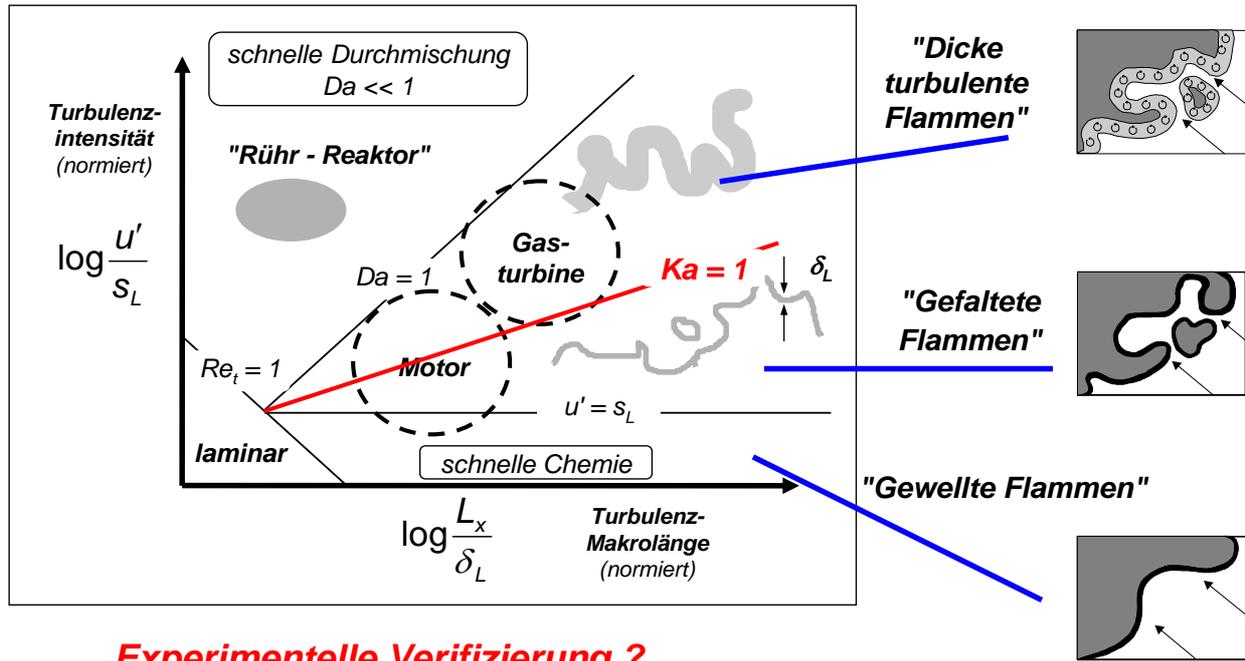


2 Extremfälle bekannt:
 $Da \ll 1$ schnelle Mischung
 $Da \gg 1$ schnelle Chemie

Anwendungen sind dazwischen !

DPG (22)

Borghi-Peters-Diagramm (Borghi 1985, Peters 1986)

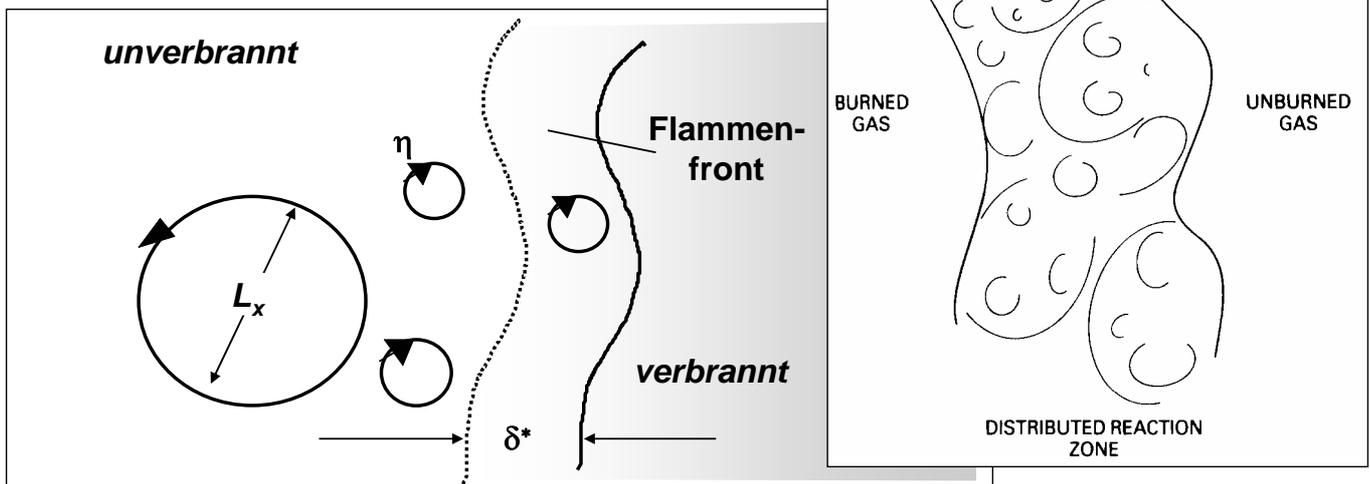


Experimentelle Verifizierung ?

Erwartung Verdickte Flammen

Flammenfront verdickt zu δ^* , wenn kleinste Wirbel η (Kolmogorov Länge) $<$ lam. Flammenfrontdicke δ_L

Karlovitzzahl $Ka = (\delta_L/\eta)^2 > 1$ (Klimov-Williams Kriterium)



1. Turbulente Verbrennung

- Flammentypen
- Laminare Flamme
- Turbulente Flammen

2. Turbulente Flammenstruktur

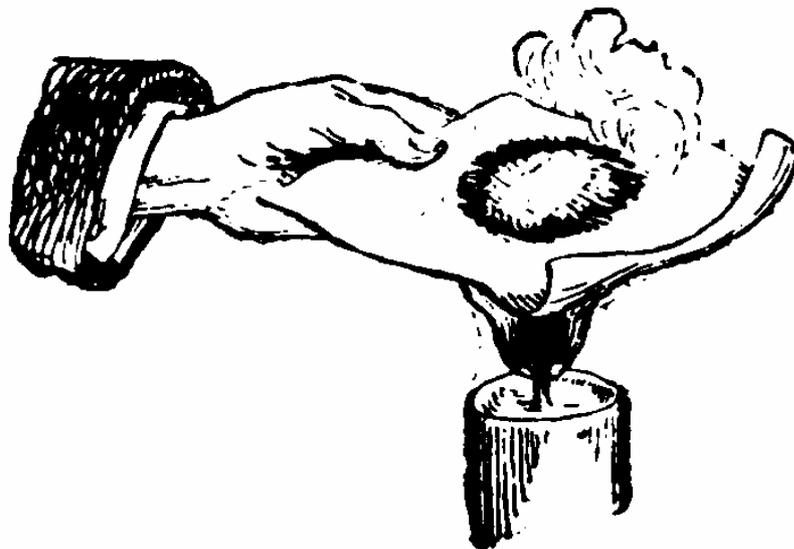
- Planare Lasermesstechnik
- Turbulenz-Flamme Wechselwirkung
- Exkurs: Vermischungsoptimierung an Gasturbinen-Brenner

3. Numerische Berechnung

- Gleichungen sind bekannt - aber direkte Lösung kaum möglich
- Mittelungsproblematik
- Gibt es doch eine Lösung ?
- Turbulentes Flammenpropagationsmodell

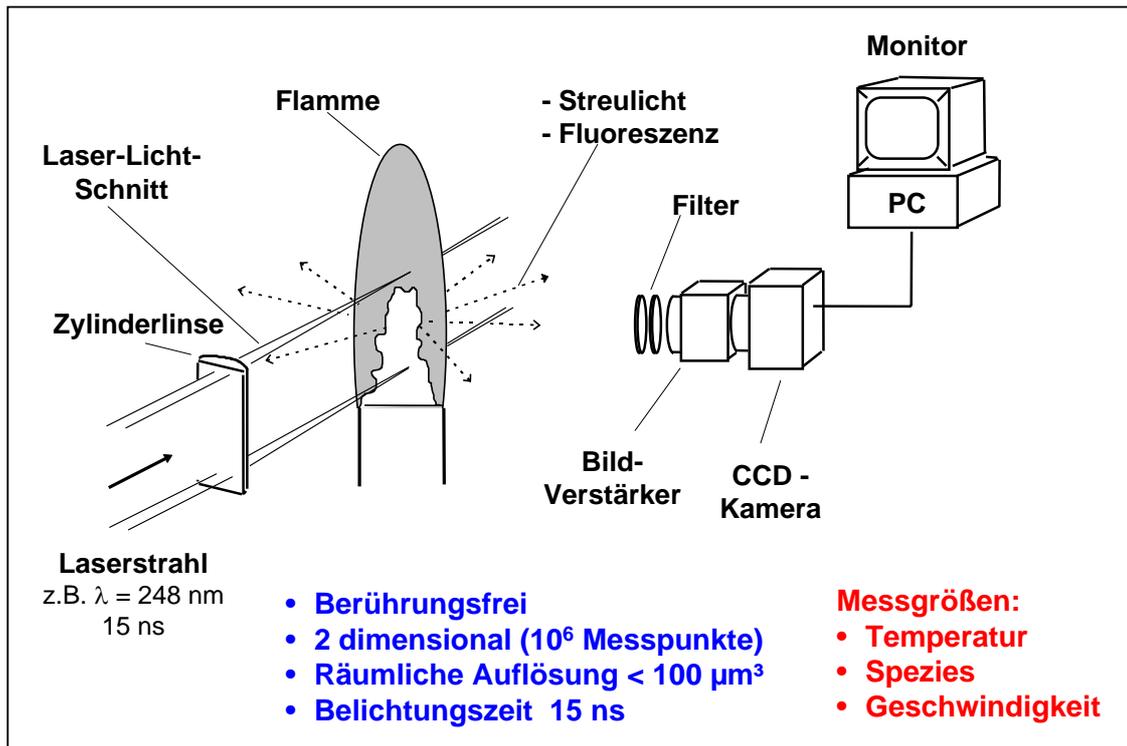
DPG (25)

Erste 2D-Messung in Flamme

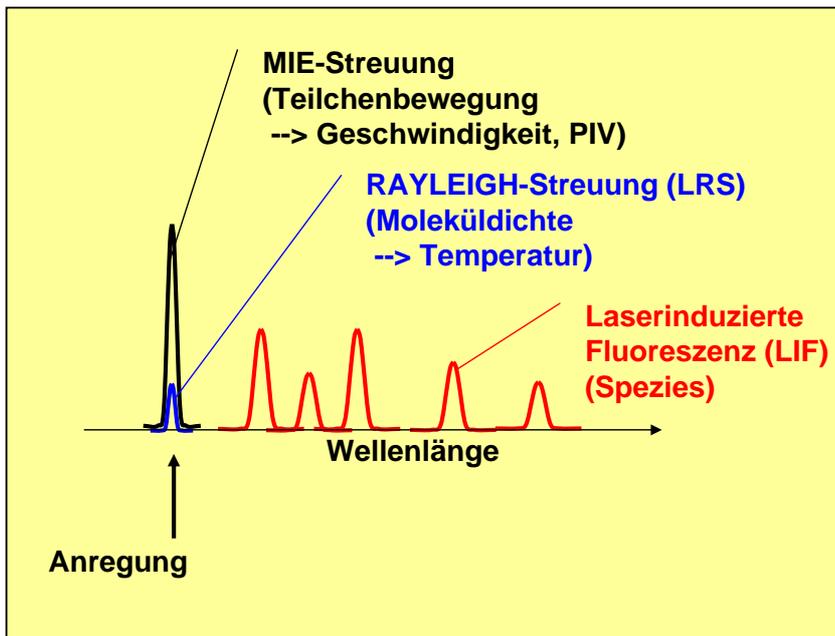


Michael Faraday 1860
"Lectures on the chemical history of a candle"

DPG (26)



DPG (27)



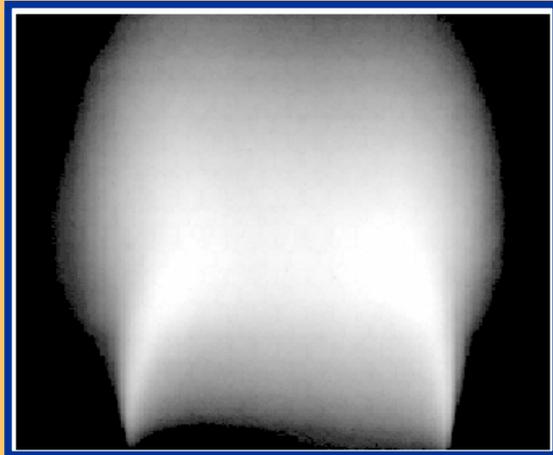
Signaltrennung durch

- Spektralfilter
- Messung fast gleichzeitig sehr kurz hintereinander (Abstand 100 ns)

DPG (28)

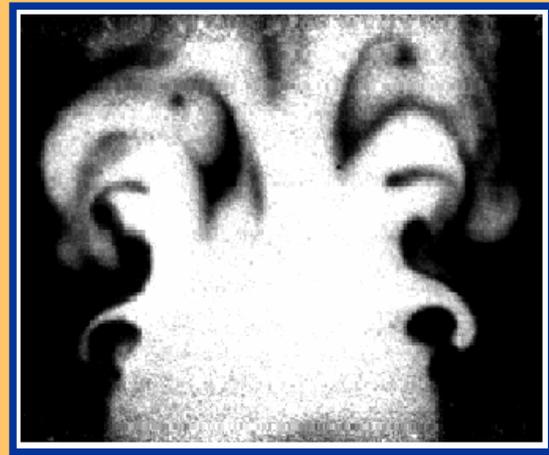
Flammeneigenleuchten

1/30 s Belichtungszeit
70 x 90 mm
Staukörperstabilisierte-Flamme



Momentanstruktur im Laserlichtschnitt

15 ns Belichtungszeit
2D-Rayleigh-Thermometrie

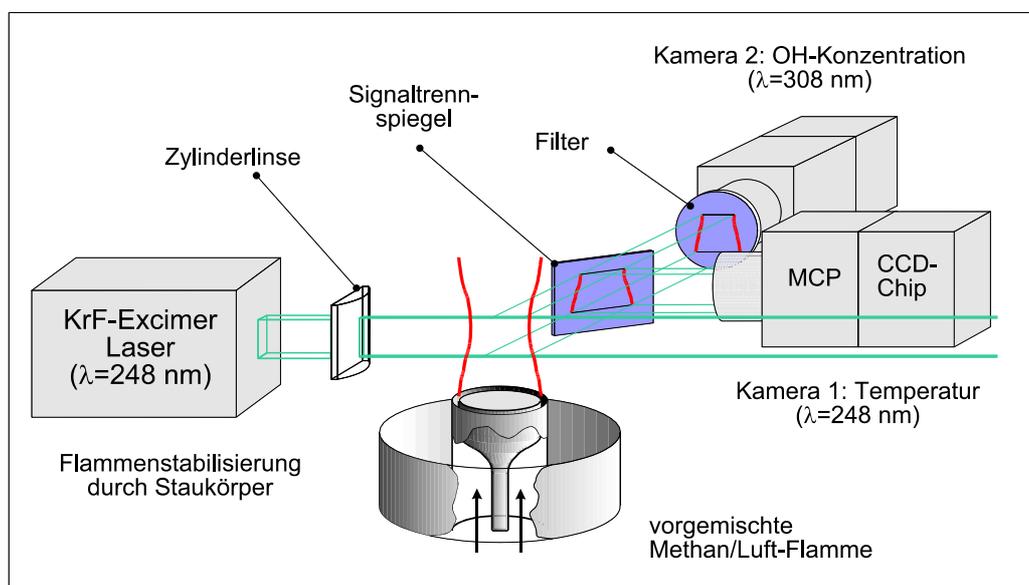


F. Dinkelacker, A. Soika, D. Hofmann, D. Most, A. Leipertz,
Proc.11th Int. Heat Transfer Conf., Kyongju, Korea, 7, 373 (1998).

DPG (29)

Beispiel: Aufbau Simultanmessung

Simultanmessung LRS / LIF



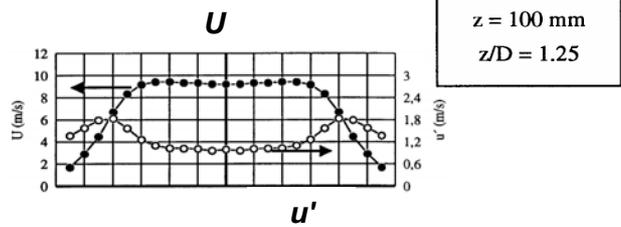
Frequenzverschiebung des LIF-Signals \rightarrow Signaltrennung LRS/LIF möglich

DPG (30)

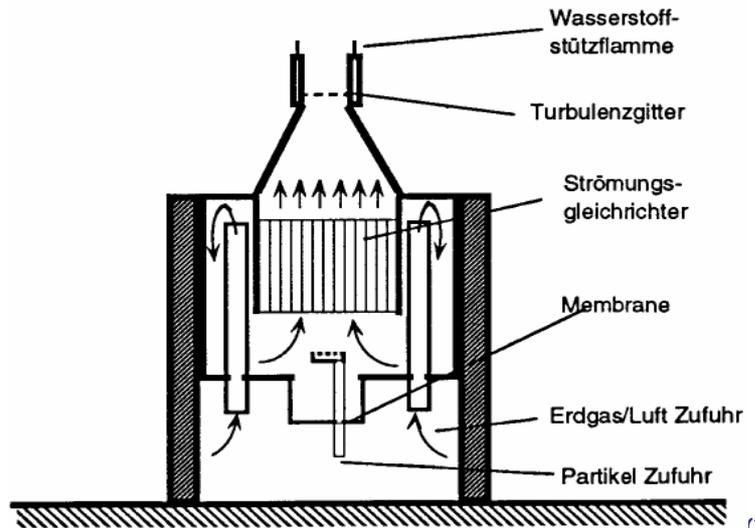
Beispiel TECFLAM Vormisch-Bunsenflamme

PCI

Exp.:
Dinkelacker, Schäfer, Buschmann, Wolfrum;
Heidelberg 1993



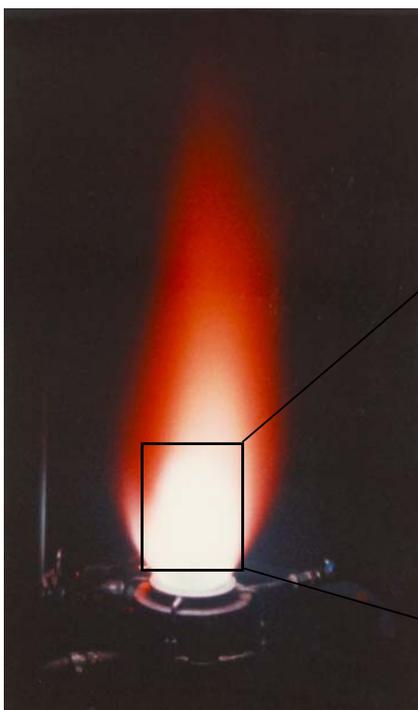
$D = 80 \text{ mm}$
 $Q = 50 - 130 \text{ kW}$
 $U = 4.7 - 16,5 \text{ m/s}$
 $Re = 20.000 - 85.000$
 $Re_{\text{turb}} = 60 - 2400$
Erdgas / Luft



(31)

Beispiel TECFLAM Vormisch-Bunsenflamme

PCI

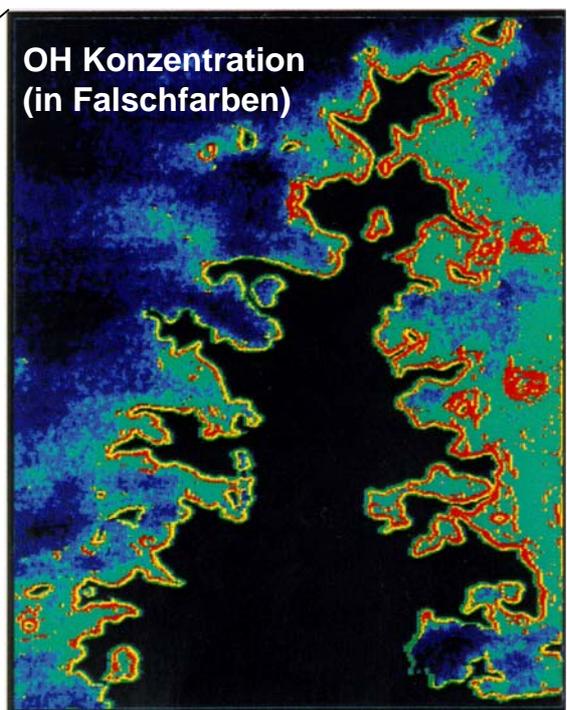


$D = 80 \text{ mm}$
 $Q = 100 \text{ kW}$
 $Re = 35.000$
 $Re_t = 340$
 $Ka = 0,5$

Flammeneigenleuchten

Laserlicht-schnitt
(OH LIF)
(15x10 cm)

OH Konzentration
(in Falschfarben)

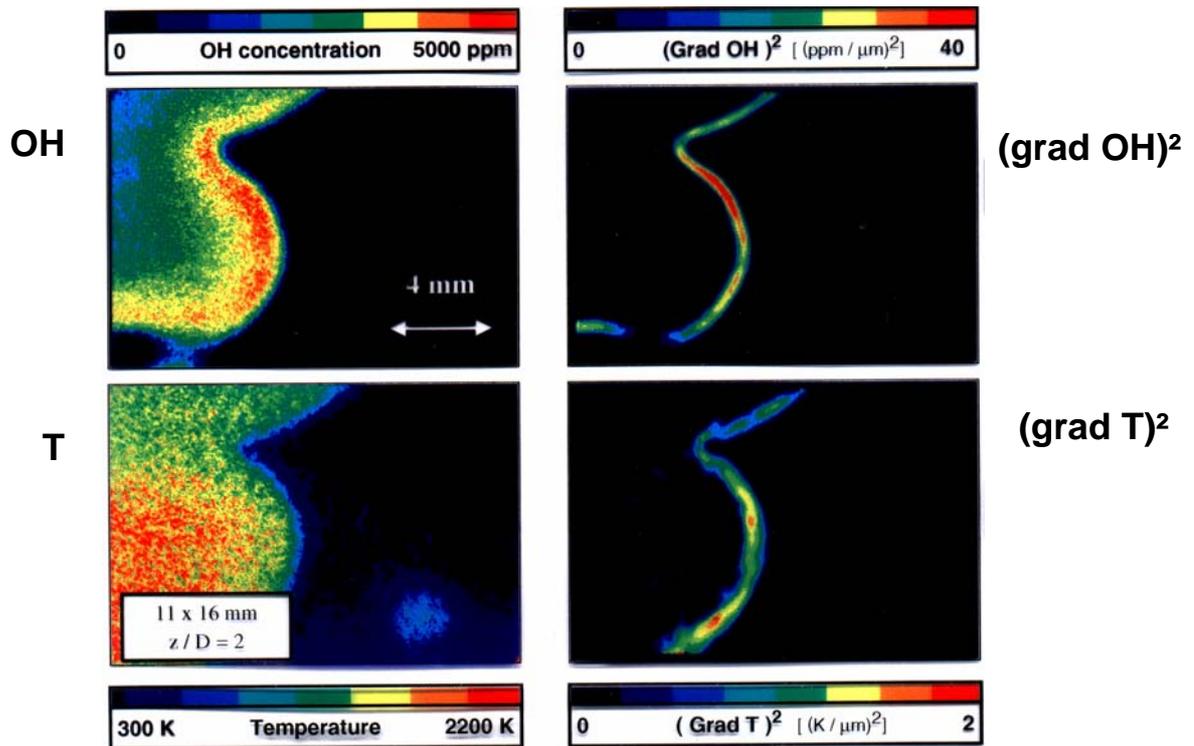


Lokale Flammenstruktur

Leicht gefaltete Flamme

$Re_t = 340$

$Ka = 0,09$



F. Dinkelacker 1993

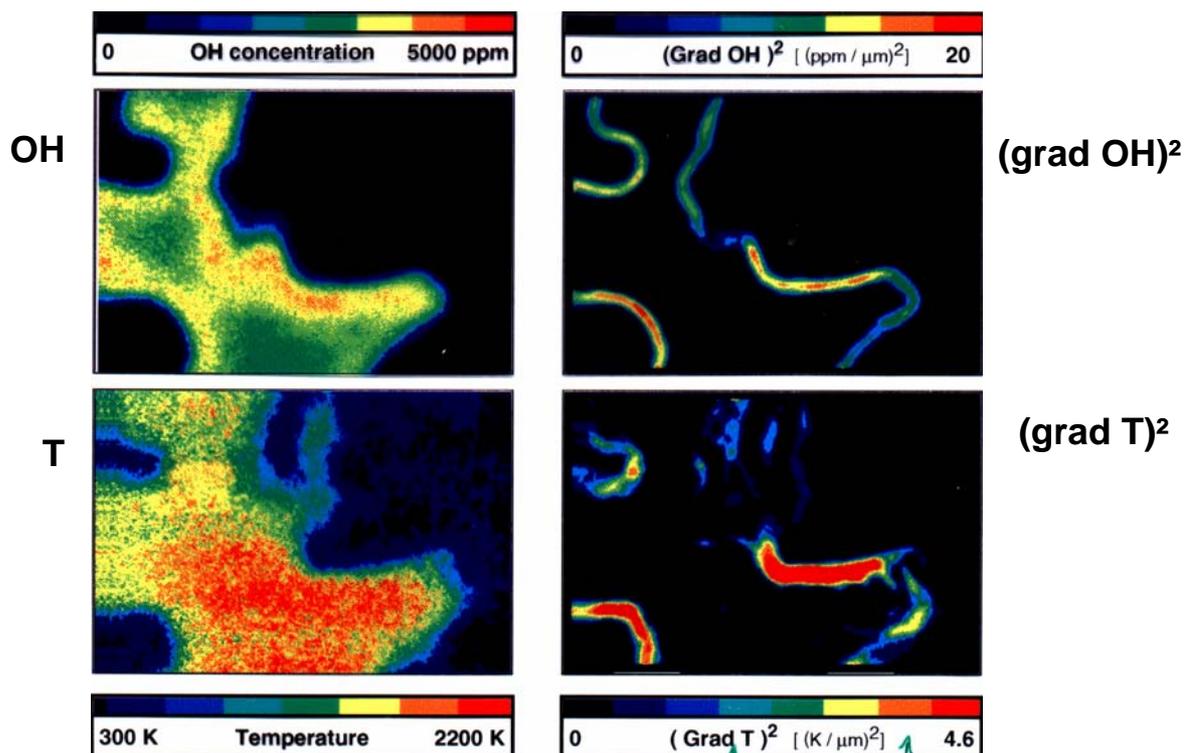
DPG (33)

Lokale Flammenstruktur

Ende Flamelet-Bereich

$Re_t = 16500$

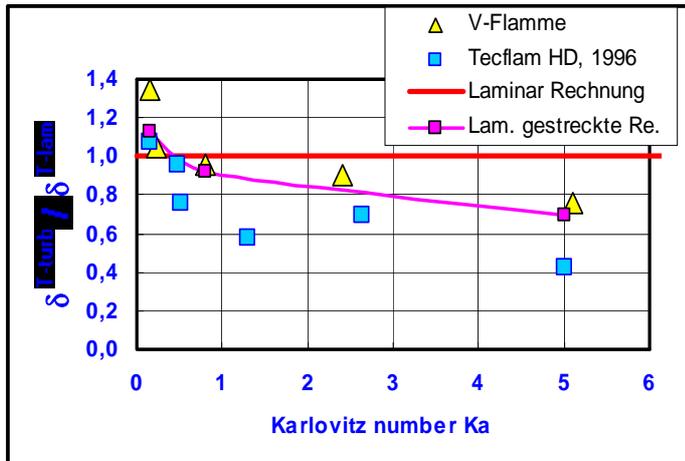
$Ka = 5,0$



F. Dinkelacker 1993

DPG (34)

Ist Flammenfront verdickt für $Ka > 1$?



Flammenfrontdicke (Temperatur)

Mittelwerte (je 18000 Messungen)

im Vergleich mit laminarer Rechnung (CHEMKIN)

Soika, A., Dinkelacker, F., Leipertz, A.,
Proc. Combust. Inst. **27**, 785 (1998).

Ergebnis

- **Verdünnung** des Temperaturanstieges statt erwarteter Verdickung für $Ka > 1$
- **Trend entspricht laminar "gestreckter" Rechnung**

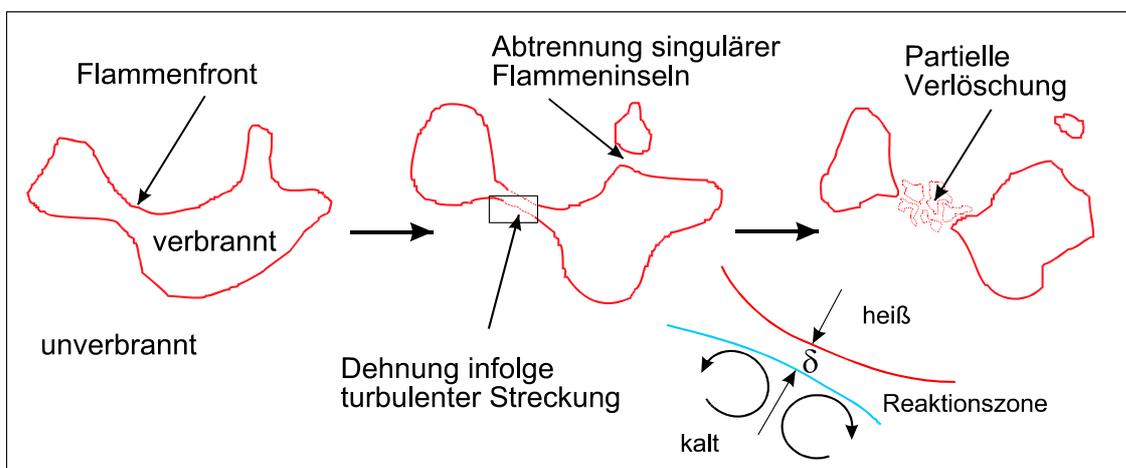
Folgerung

- "Streckungseinfluss" dominiert gegenüber "eindringenden" kleinen Wirbeln

DPG (35)

Turbulenz-Flamme-Wechselwirkung

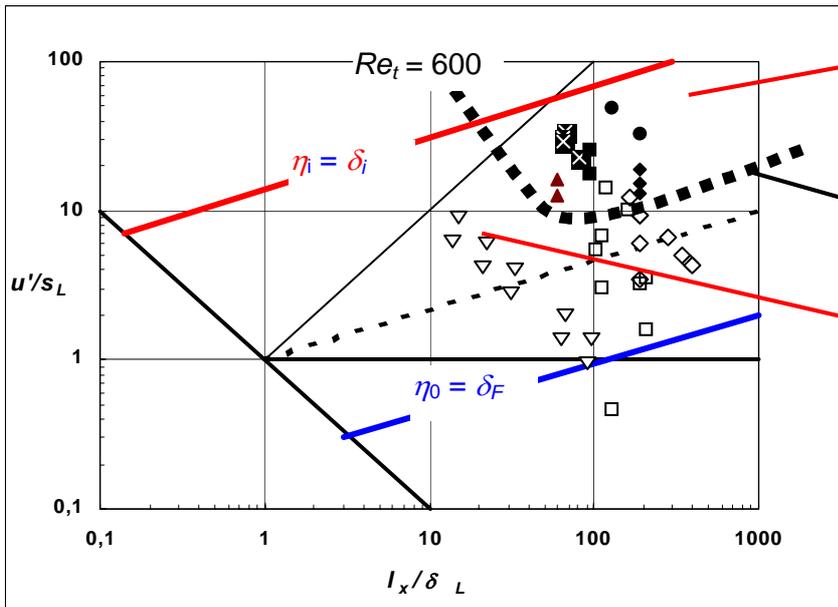
Im Borghi-Diagramm **nicht** berücksichtigte Erscheinungen sind auch von Bedeutung !



"Streckung"

DPG (36)

Bereich der gefalteten Flammen (Flamelet) deutlich ausgedehnter als erwartet



Dünne Reaktionszone,
Lokal veränderte
Vorheizzone

$$\delta_V = 8 \eta_{\text{kalt}}$$

Keine
deutliche Verdickung
(teilweise sogar
Verdünnung)

Einfluß der
Kolmogorov-Wirbel
überschätzt

Dinkelacker, 20. Deutscher Flammentag, VDI-Berichte Nr. 1629, S. 473 (2001)
Dinkelacker, Habilitations-Schrift, Erlangen (2001)

DPG (37)

Inhalt

1. Turbulente Verbrennung

- Flammentypen
- Laminare Flamme
- Turbulente Flammen

2. Turbulente Flammenstruktur

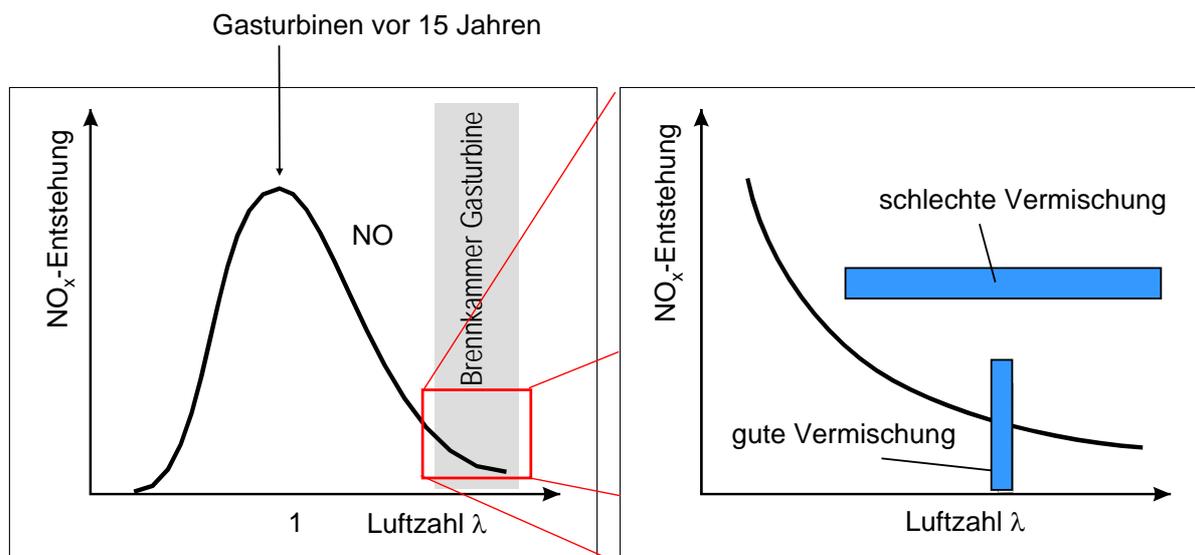
- Planare Lasermesstechnik
- Turbulenz-Flamme Wechselwirkung
- **Exkurs: Vermischungsoptimierung an Gasturbinen-Brenner**

3. Numerische Berechnung

- Gleichungen sind bekannt - aber direkte Lösung kaum möglich
- Mittelungsproblematik
- Gibt es doch eine Lösung ?
- Turbulentes Flammenpropagationsmodell

DPG (38)

Einfluss auf NO_x-Bildung



Kooperation mit Siemens-KWU

- H. Krämer, F. Dinkelacker, A. Leipertz, G. Poeschl, M. Huth, M. Lenze, ASME Paper No. 99-GT-135 (1999).
- F. Dinkelacker, H. Krämer, A. Leipertz, G. Poeschl, M. Huth, M. Lenze, 19. Deutscher Flammentag, VDI-Berichte 1492, 475 (1999).

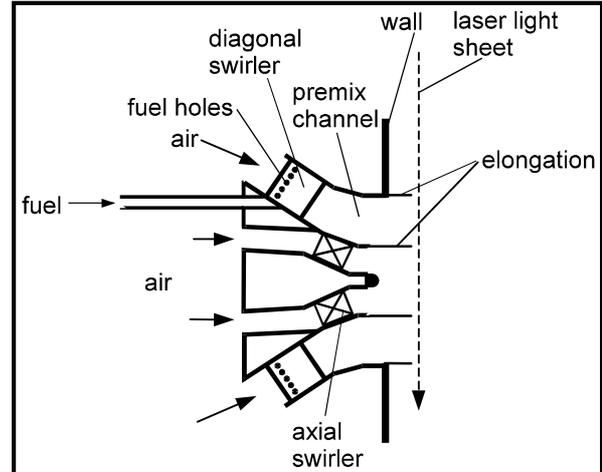
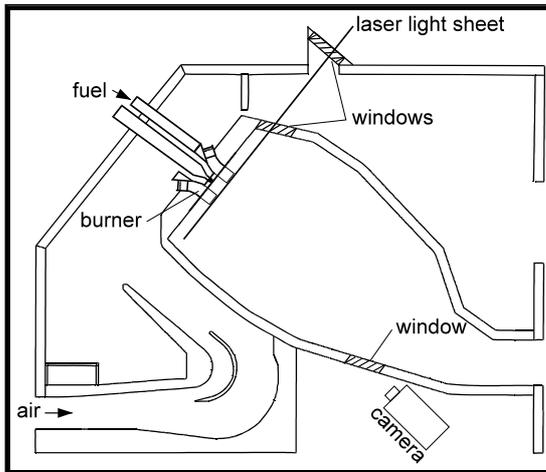
DPG (39)



Ringbrennkammer
einer Gasturbine
(Siemens/KWU, V84.3A)

DPG (40)

Ringbrennkammer-Segment



Siemens V64.3A Ringbrennkammer-Segment mit 5 Brennern, Originalgröße, Mischung am mittleren Brenner wird untersucht, 1 bar, ohne Flamme

Acetondampf als Tracer zum Brennstoffstrom gemischt, LIF-Anregung 248 nm, LIF-Detektion 350 - 600 nm

DPG (41)

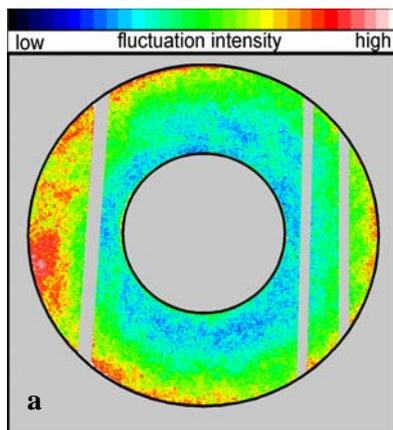
Vermischungsoptimierung

Einlass Vormischkanal:
Turbulenzzeuger

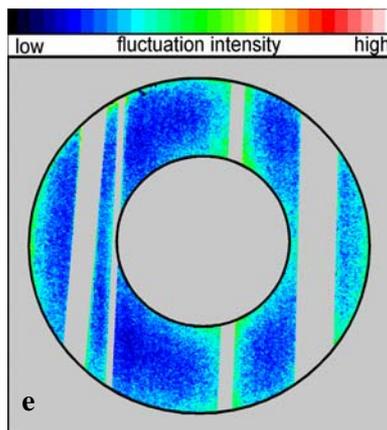


Relative Gemisch-
fluktuation

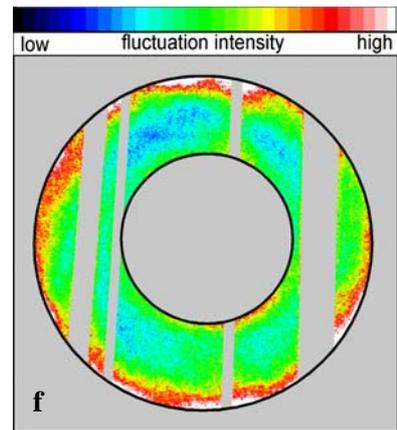
$$R \equiv \frac{c'_{rms}}{\bar{c}}$$



Ohne Mischer



Mit Mischer



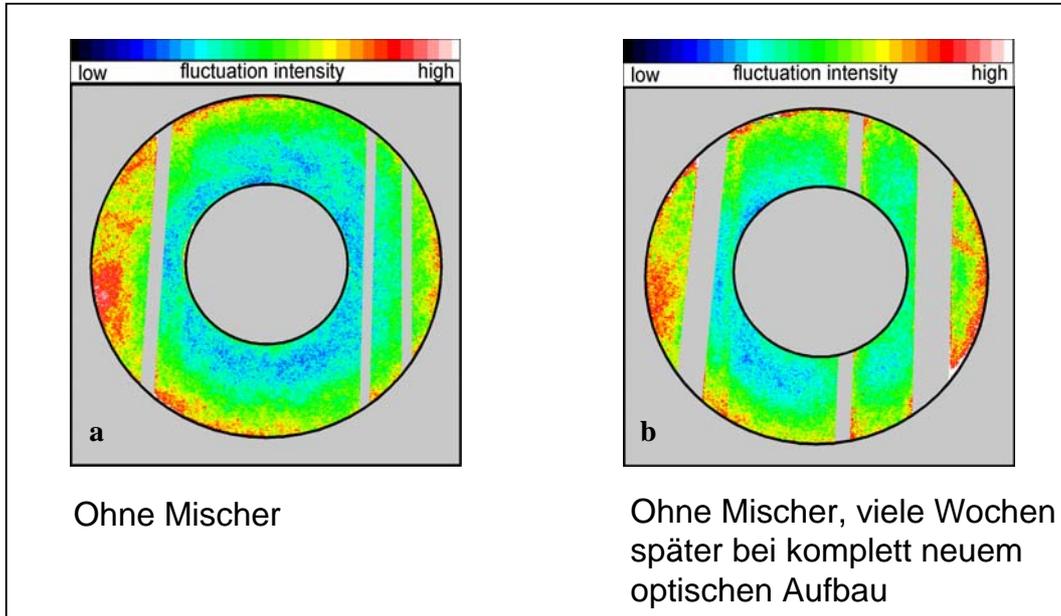
Lochplatte

DPG (42)

Normierte relative Gemischfluktuation

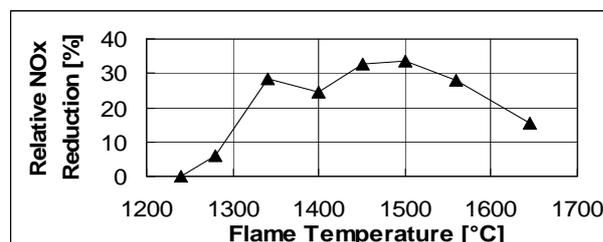
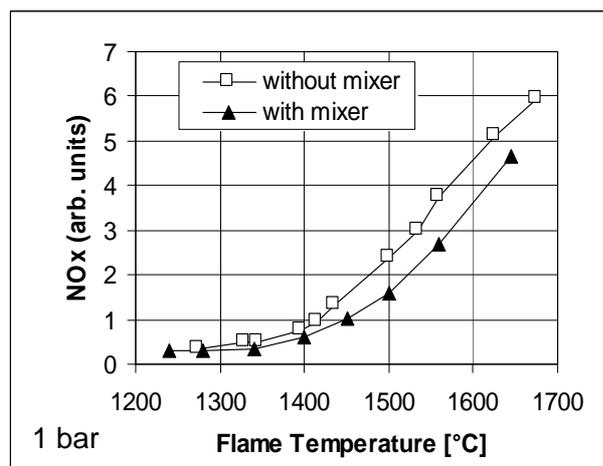
Test der Wiederholbarkeit

$$R \equiv \frac{c'_{rms}}{\bar{c}}$$



DPG (43)

NOx-Emission - Gefuehrter Brennerprüfstand



Durchgeführt von Siemens-KWU

DPG (44)

1. Turbulente Verbrennung

- Flammentypen
- Laminare Flamme
- Turbulente Flammen

2. Turbulente Flammenstruktur

- Planare Lasermesstechnik
- Turbulenz-Flamme Wechselwirkung
- Exkurs: Vermischungsoptimierung an Gasturbinen-Brenner

3. Numerische Berechnung

- Gleichungen sind bekannt - aber direkte Lösung kaum möglich
- Mittelungsproblematik
- Gibt es doch eine Lösung ?
- Turbulentes Flammenpropagationsmodell

DPG (45)

Methodik: Numerische Berechnung

Bilanzgleichungen für turbulente reaktive Strömungen (zeitabhängig)

Gesamtmasse (Kontinuitätsgleichung)	$\frac{\partial \rho}{\partial t}$	+	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)$	=	0
Impuls (3 Gl.) (Navier-Stokes)	$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t}$	+	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)$	=	$-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_j$
Energie	$\rho \frac{\partial h}{\partial t}$	+	$\rho u_i \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i}$	=	$-\frac{\partial}{\partial x_i} j_{iq} + q_R$
Spezies (N Gl.)	$\rho \frac{\partial Y_\alpha}{\partial t}$	+	$\rho u_i \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_i}$	=	$-\frac{\partial}{\partial x_i} j_{iY_\alpha} + \omega_\alpha$
	<i>Akkumulation</i>		<i>Konvektion</i>		<i>Diffusion</i> <i>Quellterm</i>

Einstein'sche Summenkonvention: $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) \equiv \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)$

DPG (46)

Gemittelte Bilanzgleichungen (Dichte-Mittelung)

Gesamtmasse (Kontinuitätsgleichung)	$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0$	
Impuls (3 Gl.) (Navier-Stokes)	$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j'') - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_j$	
Energie	$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{j}_{iq} - \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_\alpha'') + \bar{q}_R$	
Spezies (N Gl.)	$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{Y}_\alpha}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{Y}_\alpha}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{j}_{iY_\alpha} - \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_\alpha'') + \bar{\omega}_\alpha$	
Turb. kin. Energie	$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_i} = \dots$	
Turb. Diss.rate	$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_i} = \dots$	

Gemittelter Arrheniusansatz falsch!

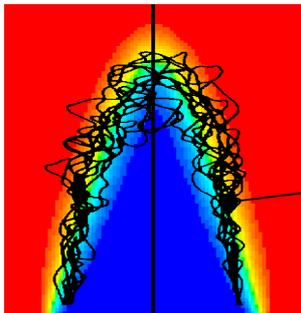
Problematisch sind diese Terme ...

... Modelle nötig!

Lösung mittels numerischer Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) auf ~ 10⁶ Gitterpunkten

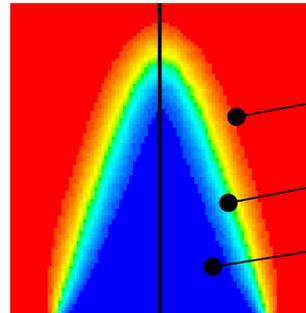
Warum ein Arrhenius-Ansatz nicht funktioniert

Realität: Dünne Flammenfront (< 0.5 mm), oszilliert

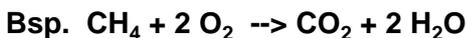


48% : T = 2100 K
48% : T = 300 K
4% : 300 K < T < 2100 K

Gemittelte Berechnung



$\bar{T} = 2.100 \text{ K}$
 $\bar{T} = 1.200 \text{ K}$
 $\bar{T} = 300 \text{ K}$



Arrhenius-Ansatz:

$$\bar{\omega}_\alpha \sim \overline{A \cdot \exp(-E_A/RT) \cdot Y_A \cdot Y_B} \neq A \cdot \exp(-E_A/R\bar{T}) \cdot \bar{Y}_A \cdot \bar{Y}_B$$

Gemittelt: Völlig falsches Ergebnis

Flamelet-Idee:

- Gefaltete laminar-ähnliche Flamme
- Flamme beschrieben durch mittleren Reaktionsfortschritt \bar{c}
 \bar{c} = Wahrscheinlichkeit, verbranntes Gas zu finden
- 1 Transportgleichung für mittleren Reaktionsfortschritt (statt N Speziesgleich.)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{c}) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}\frac{v_t}{Sc}\frac{\partial\bar{c}}{\partial x_i}\right) + \bar{w}_c$$

- Reaktionsrate wie im **laminaren Fall** x Faltungsfaktor Σ

$$\bar{w}_c = \rho_u s_L I_0 \Sigma$$

wie turbulente Flammengeschwindigkeit S_T

Flammenausbreitung

Wie schnell breitet sich eine Flammenfront aus?

- Waldbrand



Warnhinweis Indien

Versuch Cottbus 23.8.2001: 4-9 m/min



Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig von

- Brennstoff-/Luft-Angebot
- Reaktionsrate
- Ausbreitungsmechanismen
-

Wie schnell breitet sich eine Flammenfront aus?

- **Laminare Vormischflamme**
 - $s_L \approx 0,5 \text{ m/s}$

- **Turbulente Vormischflamme**
 - $s_T \approx 5 \text{ m/s}$

- **Detonations-Welle**
 - $v \approx 1000 \text{ m/s !}$

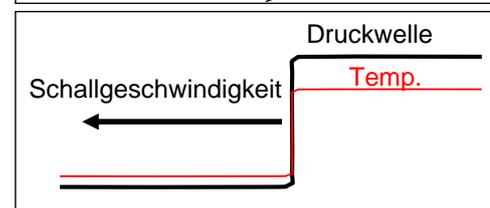
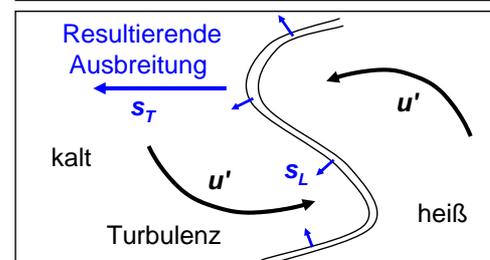
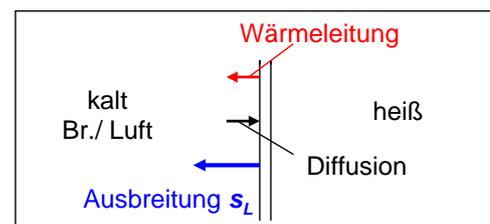
Warum ?

Welche
Mechanismen ?

DPG (51)

Mechanismen

- | | | |
|---|--------------|---|
| } | Deflagration | <ul style="list-style-type: none"> • Laminare Vormischflamme <ul style="list-style-type: none"> • Flammenausbreitung thermisch-chemisch • Druckanstieg unbedeutend • $s_L \approx 0,5 \text{ m/s}$ ('langsam' !!!) (0,1 - 2 m/s) |
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Turbulente Vormischflamme <ul style="list-style-type: none"> • Flammenausbreitung thermisch-chemisch • Turbulente Faltung und Rückmischung unterstützt Ausbreitung • $s_T \approx 5 \text{ m/s}$ (1 - 20 m/s) |
| } | Detonation | <ul style="list-style-type: none"> • Detonations-Welle <ul style="list-style-type: none"> • Flammenausbreitung durch Druckwelle • Druckwelle induziert Zündvorgang • mit Schallgeschwindigkeit
(typ. $v \approx 1000 \text{ m/s !}$) |



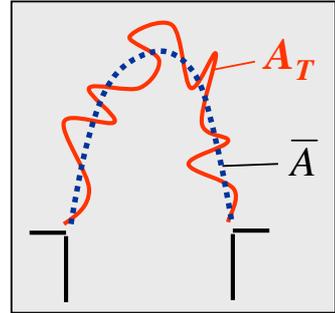
DPG (52)

Ansatz: (Zimont, Lipatnikov, 1995; Muppala, Dinkelacker, 2004)

$$\bar{w}_c = \rho_u s_L I_0 \Sigma$$

$$s_T \cdot |\nabla \bar{c}|$$

$$\Sigma = \frac{A_T}{A} \cdot |\nabla \bar{c}|$$



Turbulente Brenngeschwindigkeit

Ort der Reaktionszone (stat. gemittelt)

$$s_T = f(\text{Re}_t, u', s_L, p, \dots)$$

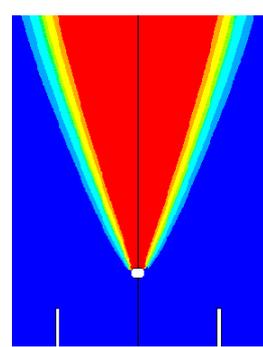
Turbulenzeinfluss modelliert mit algebraischer Beziehung

Lösung als Subroutine mit Standard-CFD-Programm (Fluent)

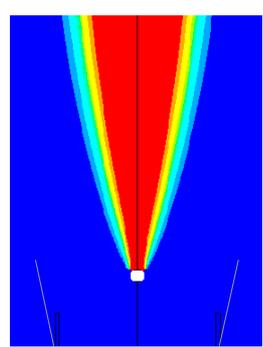
Testfall: V-Flamme

Mittlere Temperatur

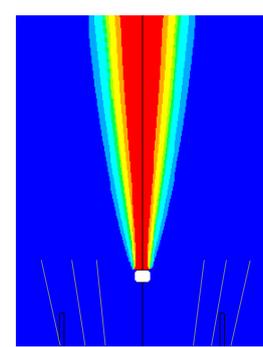
Simulation
(S. Hölzler)



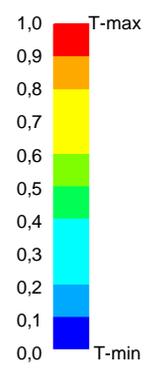
$\lambda = 1.43$



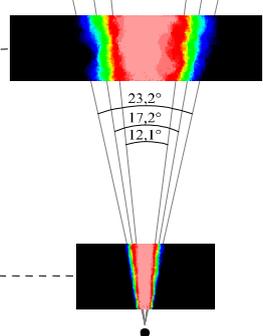
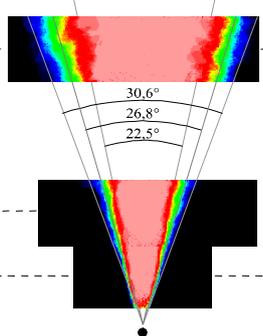
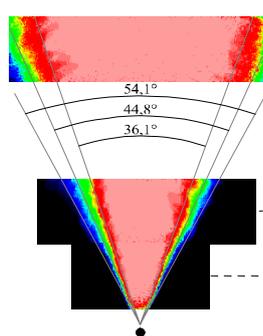
$\lambda = 1.72$



$\lambda = 2.00$



Experiment
2-dim. Rayleigh-Thermometry
(A. Soika)



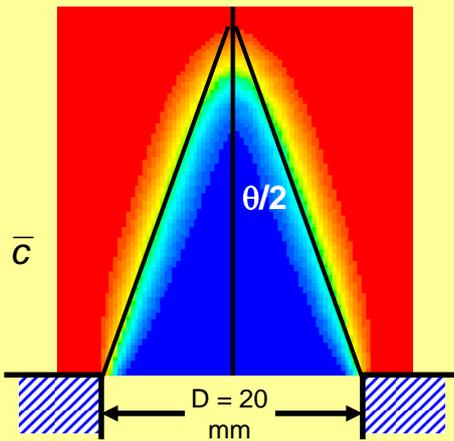
$\dot{m} = 18 \text{ kg/h}$

Experimentelle Daten (Kobayashi)

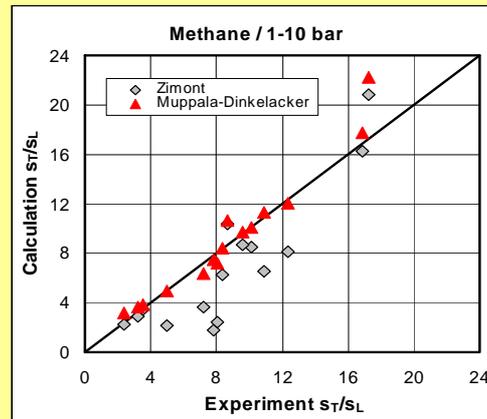
- 101 verschiedene Bunsen-Flammen
- 1 - 10 bar
- Methan, Ethylen, Propan
- variierte Turbulenzbedingungen

Rechnung

Flammenwinkel
 $s_T/U = \sin(\theta/2)$



Vergleich Experiment - Rechnung (Bsp.)



Ergebnis (aus Optimierung)

$$Le = a/D_B$$

$$\frac{s_T}{s_L} = 1 + a \cdot Re_t^{0,25} \cdot \left(\frac{u'}{s_L}\right)^b \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^c$$

$$a = 0,46 / Le$$

$$b = 0,30$$

$$c = 0,20$$

Muppala et al., 21. Dt. Flammentag (2003), Comb. Flame (2005)

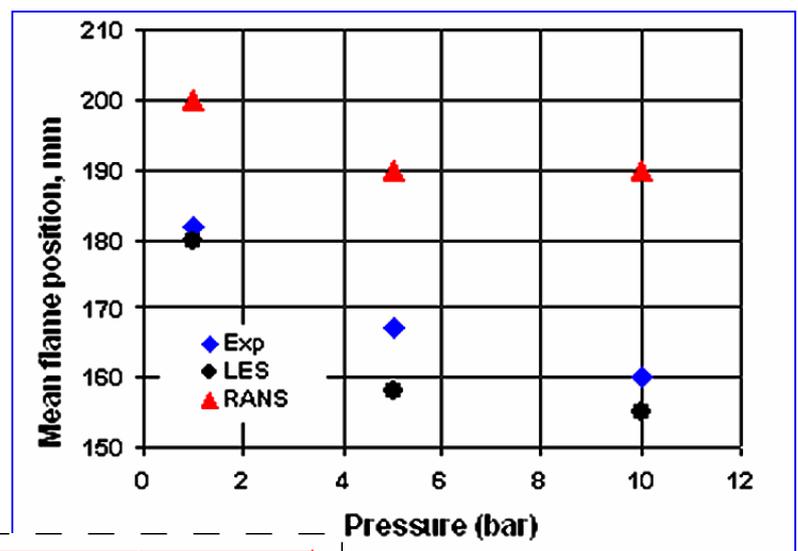
DPG (55)

Test an hochturbulenter Hochdruckflamme

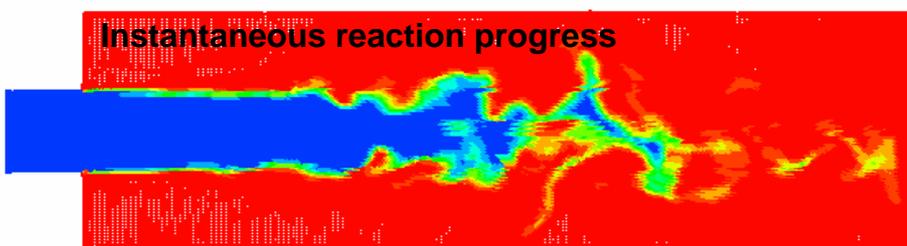
Vergleich
 Flammenlänge:
Experiment

RANS-Rechnung
 (MD-Modell)

LES-Rechnung
 (MD-Modell)



Instantaneous reaction progress



1.1 million cells; 4x3 GHz / Processor; ~ 96 hrs

Aluri et al. 2005

DPG (56)

1. Turbulente Verbrennung

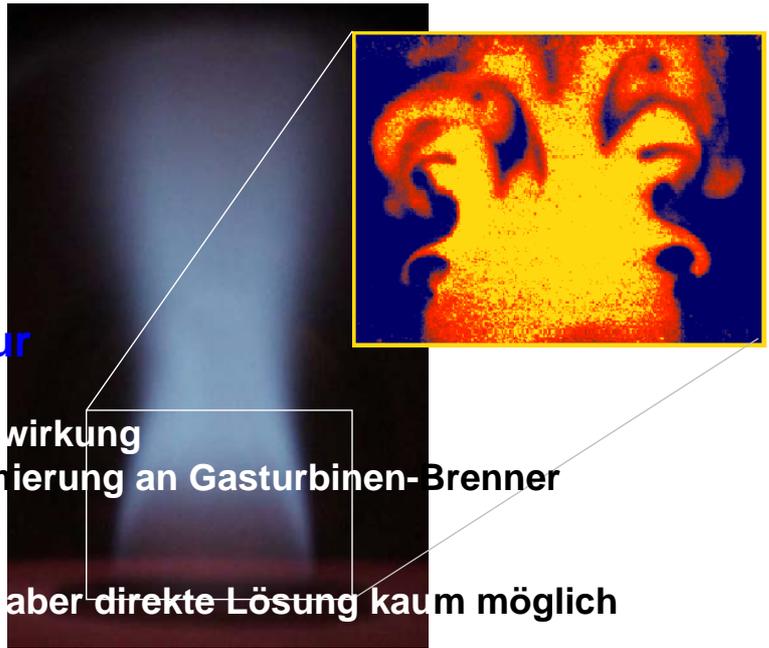
- Flammentypen
- Laminare Flamme
- Turbulente Flammen

2. Turbulente Flammenstruktur

- Planare Lasermesstechnik
- Turbulenz-Flamme Wechselwirkung
- Exkurs: Vermischungsoptimierung an Gasturbinen-Brenner

3. Numerische Berechnung

- Gleichungen sind bekannt - aber direkte Lösung kaum möglich
- Mittelungsproblematik
- Gibt es doch eine Lösung ?
- Turbulentes Flammenpropagationsmodell



DPG (57)

Dank ...

Prof. Dr. Edgar Lüscher, Prof. Dr. Alfred Hübler, München
Prof. Dr. Jürgen Wolfrum, Heidelberg
Prof. Dr.-Ing. Alfred Leipertz, Erlangen

Mitarbeiter und Kollegen:

Daniel Hofmann, Armin Soika, Dieter Most, Hanno Krämer, Ahmad Sakhrieh, Florian Altendorfner, Micha Löffler, Sebastian Pfadler, Jörg Scheuerlein (Experimente)
Reddy Muppala, Naresh Aluri, Bhu Manickam (Numerik)

Industriepartner:

ABB Research Ltd., Baden (CH) / Alstom
Siemens - KWU, Mülheim (Ruhr)
Siemens Zentrale Forschung, Erlangen
MAN Nürnberg
Webasto Stockdorf
Brose Coburg
ESYTEC Erlangen

Externe Forschungspartner:

ZSW Stuttgart
FhG ISE Freiburg
TU-Sofia (Bulgarien) Prof. Stankov, D. Markov
Univ. Nis (Serbien) Prof. Ilic
TU-München
Univ. Bayreuth

Finanzielle Unterstützung:
DFG, DAAD, VW-Stiftung
Freistaat Bayern

... für Ihre Aufmerksamkeit

DPG (58)