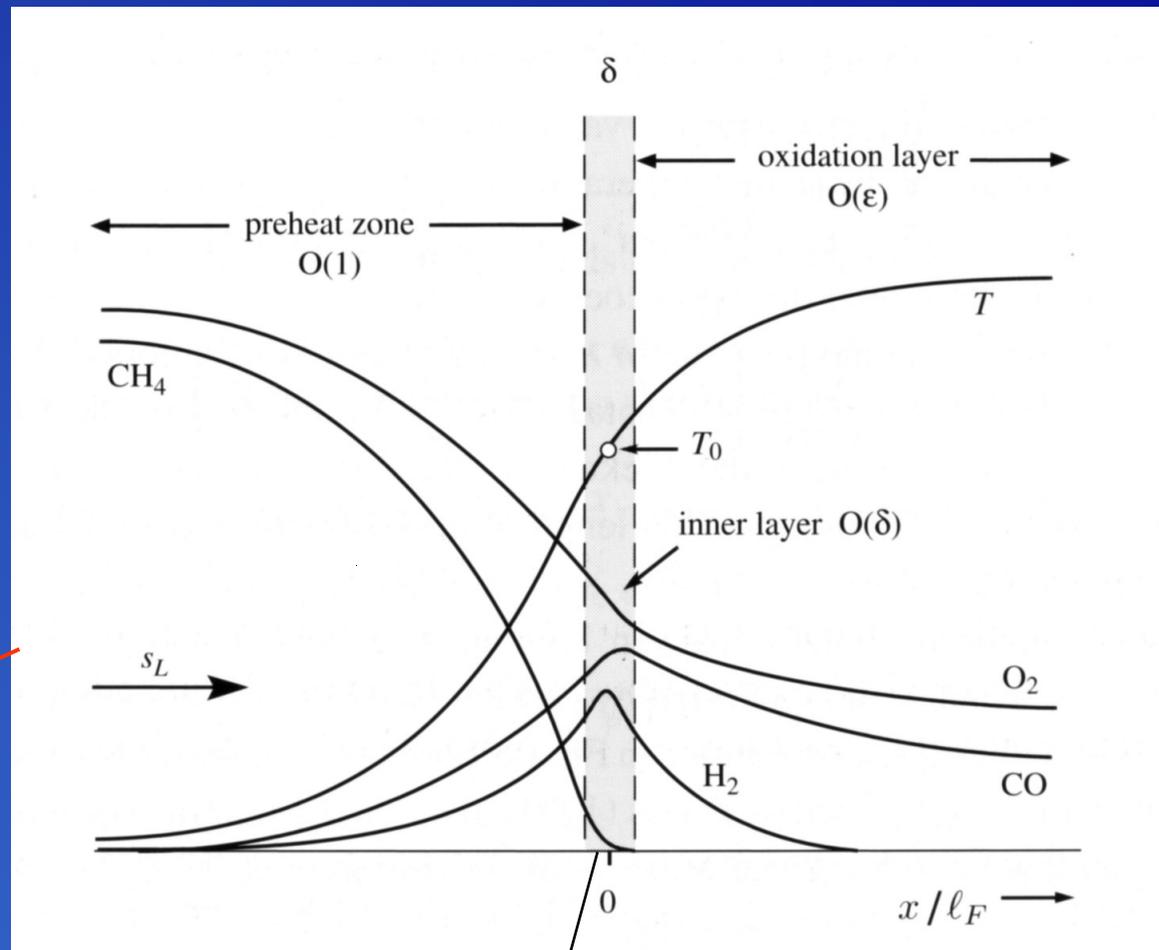
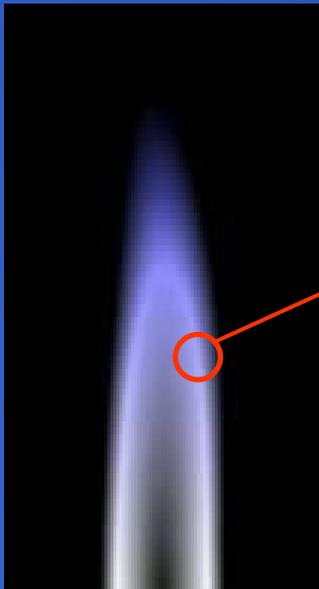


# Vergleich verschiedener Verbrennungsmodelle für die vorgemischte turbulente Verbrennung im Hinblick auf die motorische Anwendung

A. Brandl, M. Pfitzner, E.Tangermann, B.Durst, W. Kern

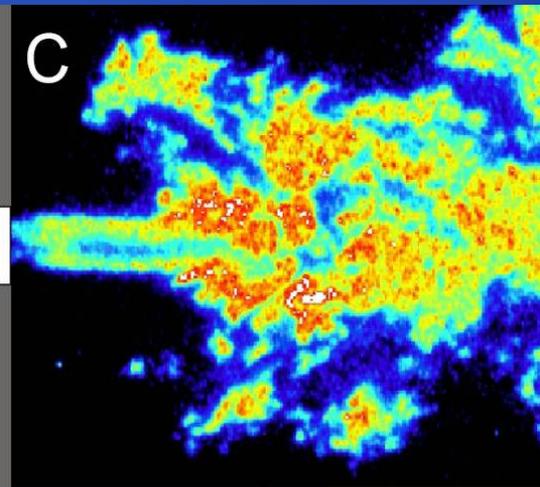
## Übersicht:

- Einführung : laminare Flamelets, Grundlagen turbulenter Verbrennung
- Beschreibung der Implementierung des Verbrennungsmodells von Lindstedt-Vaas
- Ergebnisse Versuchsbrennkammer und starrer Zylinder
- Aussicht: Anwendung für Drallstabilisierte Brennkammer

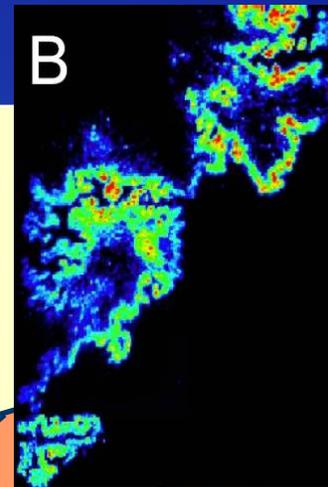


Durch Turbulenz wird die laminare Flammenfront aufgerollt und gestreckt:  
=> Beschleunigung des chemischen Umsatzes



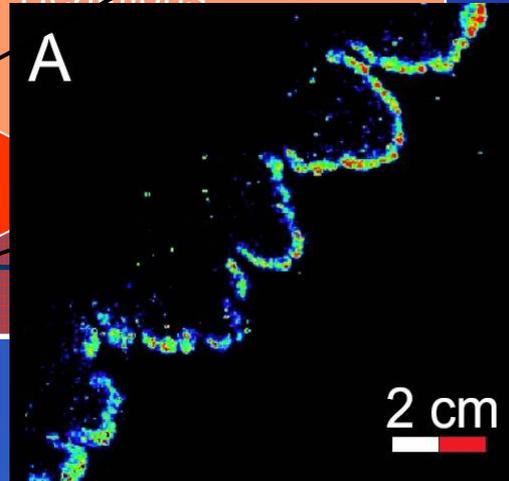
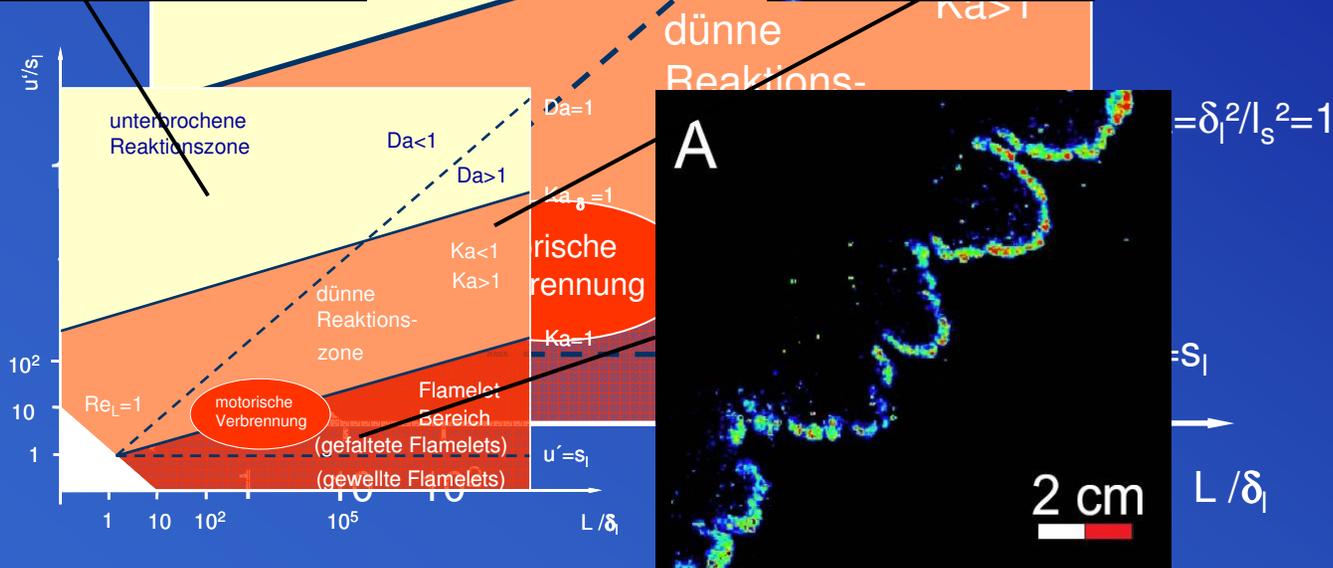


unterbrochene  
 Reaktionszone



Da=1

$$Ka_{\delta} = \delta_r^2 / l_s^2 = 1$$

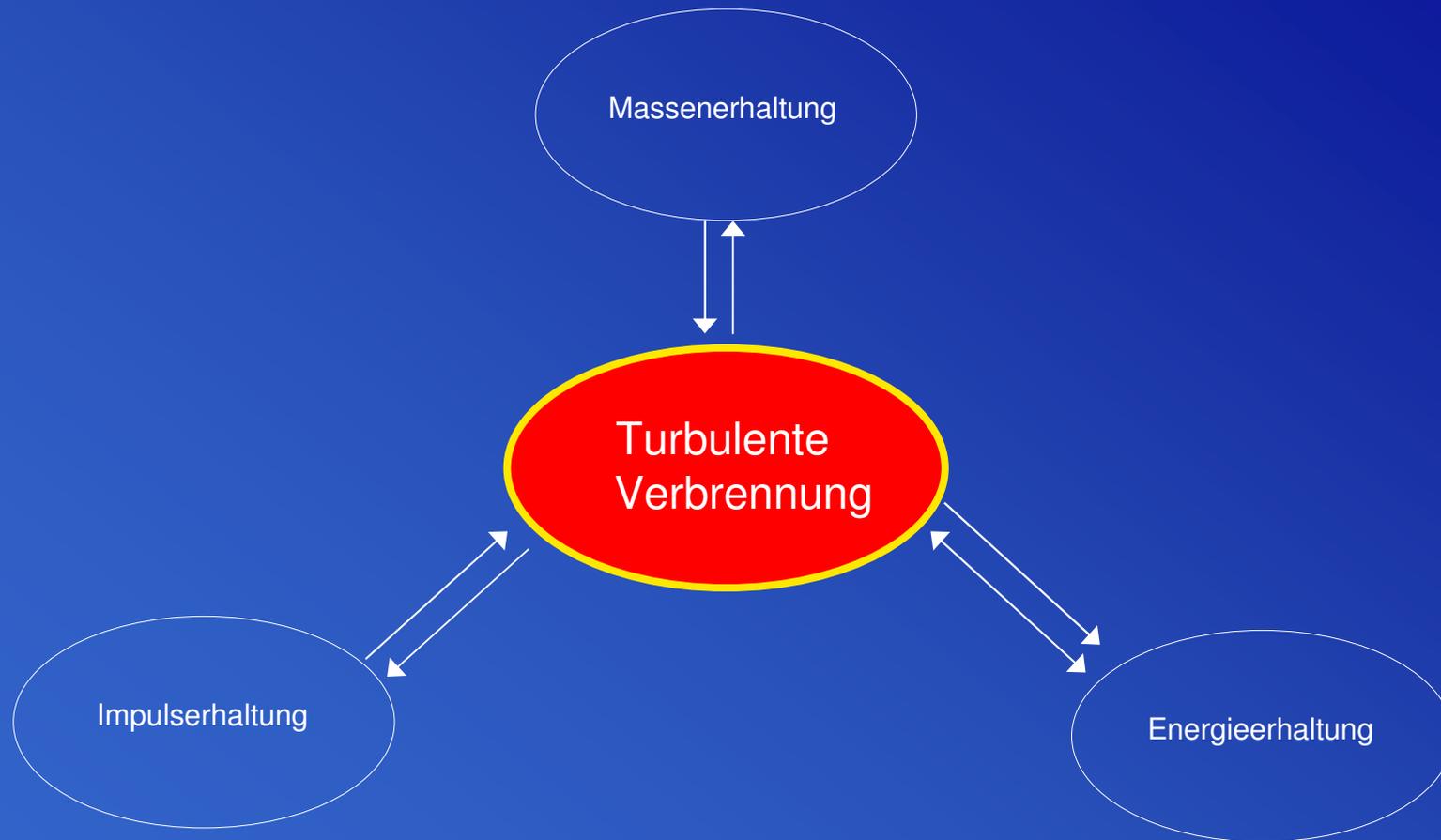


$$= \delta_l^2 / l_s^2 = 1$$

$= s_l$

$L / \delta_l$

Regime-Diagramm für die turbulente Vormischverbrennung  
 [Peters94],[Ardey98],[Jordan99]



## Gemittelte Erhaltungsgleichungen:

Kontigleichung: 
$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0$$

Impulserhaltung: 
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \bar{\rho} g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \widetilde{u_i u_j})$$

Stofftransport: 
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D_\alpha \frac{\partial \tilde{Y}_\alpha}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \widetilde{u_i Y_\alpha}) + \bar{R}_\alpha$$

Enthalpiegleichung: 
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D_h \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \widetilde{u_i h}) + \dot{q}_{\text{str}}$$

→ Turbulenzmodellierung bezieht sich auf die ungeschlossenen Terme

Problem:  $\bar{R}_\alpha \neq f(\tilde{c}_i, \tilde{T})$ , es entstehen unbekannte Schwankungsterme,  
 die modelliert werden müssen

Tab. 8.1. Mechanismus für die Beschreibung der Verbrennung von  $H_2$ , CO und Kohlenwasserstoffen bis herauf zum Propan ( $C_3H_8$ ) bei nicht zu fetten Bedingungen (Warnatz 1983). Die Zahlen sind präexponentieller Faktor A (cm, mol, s), Temperaturexponent b (dimensionlos) und Aktivierungsenergie E (kJ/mol). Gleichheitszeichen kennzeichnen reversible Reaktionen, Pfeile nur Hinreaktionen.

1. $H_2$ - $O_2$ Mechanismus	A (cm, mol, s)	b	E (kJ/mol)	Nr.
1.1 Kettenreaktionen				
$O_2 + H = OH + O$	2.20E+14	0.00	70.3	(1, 2)
$H_2 + O = OH + H$	5.06E+04	2.67	26.3	(3, 4)
$H_2 + OH = H_2O + H$	1.00E+08	1.60	13.8	(5, 6)
$OH + OH = H_2O + O$	1.50E+09	1.14	0.4	(7, 8)
1.2 Rekombinationsreaktionen				
$H + H + M' = H_2 + M'$	1.80E+18	-1.00	0.0	(9, 10)
$H + OH + M' = H_2O + M'$	2.20E+22	-2.00	0.0	(11, 12)
$O + O + M' = O_2 + M'$	2.90E+17	-1.00	0.0	(13, 14)
1.3 $HO_2$ -Bildung und -Verbrauch				
$H + O_2 + M' = HO_2 + M'$	2.30E+18	-0.80	0.0	(15, 16)
$HO_2 + H = OH + OH$	1.50E+14	0.00	4.2	(17, 18)
$HO_2 + H = H_2 + O_2$	2.50E+13	0.00	2.9	(19, 20)
$HO_2 + H = H_2O + O$	3.00E+13	0.00	7.2	(21, 22)
$HO_2 + O = OH + O_2$	1.80E+13	0.00	-1.7	(23, 24)
$HO_2 + OH = H_2O + O_2$	6.00E+13	0.00	0.0	(25, 26)
1.4 $H_2O_2$ -Bildung und -Verbrauch				
$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	2.50E+11	0.00	-5.2	(27)
$OH + OH + M' = H_2O_2 + M'$	3.25E+22	-2.00	0.0	(28, 29)
$H_2O_2 + H = H_2 + HO_2$	1.70E+12	0.00	15.7	(30, 31)
$H_2O_2 + H = H_2O + OH$	1.00E+13	0.00	15.0	(32, 33)
$H_2O_2 + O = OH + HO_2$	2.80E+13	0.00	26.8	(34, 35)
$H_2O_2 + OH = H_2O + HO_2$	5.40E+12	0.00	4.2	(36, 37)
2. CO- $CO_2$ Mechanismus				
2.1 CO- $CO_2$ Reaktionen				
$CO + OH = CO_2 + H$	4.40E+06	1.50	-3.1	(38, 39)
$CO + HO_2 = CO_2 + OH$	1.50E+14	0.00	98.7	(40, 41)
$CO + O + M' = CO_2 + M'$	7.10E+13	0.00	-19.0	(42, 43)
$CO + O_2 = CO_2 + O$	2.50E+12	0.00	200.0	(44, 45)
3. $C_1$ -Mechanismus				
3.1 Verbrauch von CH				
$CH + O = CO + H$	4.00E+13	0.00	0.0	(46, 47)
$CH + O_2 = CHO + O$	3.00E+13	0.00	0.0	(48, 49)
$CH + CO_2 \rightarrow CHO + CO$	3.40E+12	0.00	2.9	(50)
3.2 Verbrauch von CHO				
$CHO + H = CO + H_2$	2.00E+14	0.00	0.0	(51, 52)
$CHO + O = CO + OH$	3.00E+13	0.00	0.0	(53, 54)

$C_2H_2 + OH = H_2O + C_2H$	1.00E+13	0.00	29.3	(120,121)
$C_2H_2 + M = C_2H + H + M$	3.60E+16	0.00	446.0	(122,123)
4.4 Verbrauch von $CH_2$ -CO				
$CH_2CO + H = CH_2 + CO$	7.00E+12	0.00	12.6	(124,125)
$CH_2CO + O = CHO + CHO$	1.80E+12	0.00	5.6	(126,127)
$CH_2CO + OH = CH_2O + CHO$	1.00E+13	0.00	0.0	(128,129)
$CH_2CO + M' = CH_2 + CO + M'$	1.00E+16	0.00	248.0	(130,131)
4.5 Verbrauch von $C_2H_3$				
$C_2H_3 + H = H_2 + C_2H_2$	2.00E+13	0.00	0.0	(132,133)
$C_2H_3 + O = CH_2CO + H$	3.00E+13	0.00	0.0	(134,135)
$C_2H_3 + O_2 \rightarrow CH_2O + CHO$	1.50E+12	0.00	0.0	(136)
$C_2H_3 = C_2H_2 + H$	1.60E+32	-5.50	193.5	(137,138)
4.6 Verbrauch von $CH_3$ -CO				
$CH_3CO + H = CH_3CO + H_2$	2.00E+13	0.00	0.0	(139,140)
$CH_3CO + O = CH_3 + CO_2$	2.00E+13	0.00	0.0	(141,142)
$CH_3CO + CH_3 = C_2H_6 + CO$	5.00E+13	0.00	0.0	(143,144)
$CH_3CO = CH_3 + CO$	2.30E+26	-5.00	75.2	(145,146)
4.7 Verbrauch von $C_2H_4$				
$C_2H_4 + H = C_2H_3 + H_2$	1.50E+14	0.00	42.7	(147,148)
$C_2H_4 + O \rightarrow CH_2CO + H$	1.60E+09	1.20	3.1	(149)
$C_2H_4 + OH = C_2H_3 + H_2O$	3.00E+13	0.00	12.6	(150,151)
$C_2H_4 + CH_3 = C_2H_5 + CH_3$	4.20E+11	0.00	46.5	(152,153)
$C_2H_4 + M' = C_2H_2 + H_2 + M'$	7.50E+17	0.00	319.8	(154,155)
4.8 Verbrauch von $CH_3$ -CHO				
$CH_3CHO + H = CH_3CO + H_2$	4.00E+13	0.00	17.6	(156,157)
$CH_3CHO + O = CH_3CO + OH$	5.00E+12	0.00	7.5	(158,159)
$CH_3CHO + OH = CH_3CO + H_2O$	8.00E+12	0.00	0.0	(160,161)
$CH_3CHO + HO_2 = CH_3CO + H_2O_2$	1.70E+12	0.00	44.8	(162,163)
$CH_3CHO + CH_2 = CH_3CO + CH_3$	2.50E+12	0.00	15.9	(164,165)
$CH_3CHO + CH_3 = CH_3CO + CH_4$	8.50E+10	0.00	25.1	(166,167)
$CH_3CHO = CH_3 + CHO$	2.00E+15	0.00	331.0	(168,169)
4.9 Verbrauch von $C_2H_5$				
$C_2H_5 + H = CH_3 + CH_3$	3.00E+13	0.00	0.0	(170,171)
$C_2H_5 + O = H + CH_3CHO$	5.00E+13	0.00	0.0	(172,173)
$C_2H_5 + O_2 = C_2H_4 + HO_2$	2.00E+12	0.00	20.9	(174,175)
$C_2H_5 + CH_3 = C_2H_6$	7.00E+12	0.00	0.0	(176,177)
$C_2H_5 + C_2H_3 = C_2H_4 + C_2H_4$	1.40E+12	0.00	0.0	(178,179)
$C_2H_5 = C_2H_4 + H$	1.00E+43	-9.1	224.1	(180,181)
4.10 Verbrauch von $C_2H_6$				
$C_2H_6 + H = H_2 + C_2H_5$	5.40E+02	3.50	21.8	(182,183)
$C_2H_6 + O = OH + C_2H_5$	3.00E+07	2.00	21.4	(184,185)
$C_2H_6 + OH = H_2O + C_2H_5$	6.30E+06	2.00	2.7	(186,187)
$C_2H_6 + HO_2 = H_2O_2 + C_2H_5$	6.00E+12	0.00	81.2	(188,189)
$C_2H_6 + CH_3 = C_2H_5 + CH_3$	5.50E-01	4.00	34.7	(190,191)
$C_2H_6 + CH_2 = CH_3 + C_2H_5$	2.20E+13	0.00	36.3	(192,193)
$C_2H_6 + CH = H + C_2H_5$	1.10E+14	0.00	-1.1	(194,195)

$CHO + O = CO_2 + H$	3.00E+13	0.00	0.0	(55, 56)
$CHO + OH = CO + H_2O$	1.00E+14	0.00	0.0	(57, 58)
$CHO + O_2 = CO + HO_2$	3.00E+12	0.00	0.0	(59, 60)
$CHO + M' = CO + H + M'$	7.10E+14	0.00	70.3	(61, 62)
3.3 Verbrauch von $CH_2$				
$CH_2 + H = CH + H_2$	8.40E+09	1.50	1.4	(63, 64)
$CH_2 + O \rightarrow CO + H + H$	8.00E+13	0.00	0.0	(65)
$CH_2 + O_2 \rightarrow CO + OH + H$	6.50E+12	0.00	6.3	(66)
$CH_2 + O_2 \rightarrow CO_2 + H + H$	6.50E+12	0.00	6.3	(67)
3.4 Verbrauch von $CH_3O$				
$CH_3O + H = CHO + H_2$	2.50E+13	0.00	16.7	(68, 69)
$CH_3O + O = CHO + OH$	3.50E+13	0.00	14.6	(70, 71)
$CH_3O + OH = CHO + H_2O$	3.00E+13	0.00	5.0	(72, 73)
$CH_3O + HO_2 = CHO + H_2O_2$	1.00E+12	0.00	33.5	(74, 75)
$CH_3O + CH_3 = CHO + CH_4$	1.00E+11	0.00	25.5	(76, 77)
$CH_3O + M' = CHO + H + M'$	1.40E+17	0.00	320.0	(78, 79)
3.5 Verbrauch von $CH_3$				
$CH_3 + H = CH_2 + H_2$	1.80E+14	0.00	63.0	(80, 81)
$CH_3 + O = CH_2O + H$	7.00E+13	0.00	0.0	(82, 83)
$CH_3 + OH \rightarrow CH_2O + H + H$	9.00E+14	0.00	64.8	(84)
$CH_3 + OH \rightarrow CH_2O + H_2$	8.00E+12	0.00	0.0	(85)
$CH_3 + O_2 \rightarrow CH_2O + H + O$	1.50E+13	0.00	120.0	(86)
$CH_3 + CH_3 = C_2H_6$	7.47E+52	-11.9	80.2	(87, 88)
$CH_3 + M = CH_2 + H + M$	1.00E+16	0.00	380.0	(89, 90)
$CH_3 + CH_2 \rightarrow C_2H_5 + H_2$	1.00E+16	0.00	134.0	(91)
$CH_3 + CH_2 \rightarrow C_2H_4 + H$	1.00E+13	0.00	0.0	(92)
3.6 Verbrauch von $CH_3$				
$CH_3 + H = H_2 + CH_3$	2.20E+04	3.00	36.6	(93, 94)
$CH_3 + O = OH + CH_3$	1.20E+07	2.10	31.9	(95, 96)
$CH_3 + OH = H_2O + CH_3$	1.60E+06	2.10	10.3	(97, 98)
$CH_3 + HO_2 = H_2O_2 + CH_3$	4.00E+12	0.00	81.2	(99,100)
$CH_3 = CH_2 + H$	3.20E+34	-6.00	457.5	(101,102)
$CH_3 + CH_2 = CH_2 + CH_3$	1.30E+13	0.00	39.9	(103,104)
$CH_3 + CH = C_2H_4 + H$	3.00E+13	0.00	-1.7	(105,106)
4. $C_2$ -Mechanismus				
4.1 Verbrauch von $C_2H$				
$C_2H + O = CO + CH$	1.00E+13	0.00	0.0	(107,108)
$C_2H + H_2 = C_2H_2 + H$	1.10E+13	0.00	12.0	(109,110)
$C_2H + O_2 = C_2HO + O$	5.00E+13	0.00	6.3	(111,112)
4.2 Verbrauch von $CH$ -CO				
$C_2HO + H = CH_2 + CO$	3.00E+13	0.00	0.0	(113,114)
$C_2HO + O \rightarrow CO + CO + H$	1.00E+14	0.00	0.0	(115)
4.3 Verbrauch von $C_2H_2$				
$C_2H_2 + O = CH_2 + CO$	4.10E+08	1.50	7.1	(116,117)
$C_2H_2 + O = C_2HO + H$	4.30E+14	0.00	50.7	(118,119)

5. $C_3$ Mechanismus				
5.1 Verbrauch von $C_3H_7$				
$C_3H_7 + H = p\text{-}C_3H_6 + H_2$	1.30E+14	0.00	40.6	(196,197)
$C_3H_7 + H = s\text{-}C_3H_6 + H_2$	1.00E+14	0.00	34.9	(198,199)
$C_3H_7 + O = p\text{-}C_3H_6 + OH$	3.00E+13	0.00	24.1	(200,201)
$C_3H_7 + O = s\text{-}C_3H_6 + OH$	2.60E+13	0.00	18.7	(202,203)
$C_3H_7 + OH = p\text{-}C_3H_6 + H_2O$	6.30E+06	2.00	2.7	(204,205)
$C_3H_7 + OH = s\text{-}C_3H_6 + H_2O$	1.20E+08	1.46	-0.8	(206,207)
$C_3H_7 + HO_2 = p\text{-}C_3H_6 + H_2O_2$	6.00E+12	0.00	81.2	(208,209)
$C_3H_7 + HO_2 = s\text{-}C_3H_6 + H_2O_2$	2.00E+12	0.00	71.1	(210,211)
$C_3H_7 + CH_3 = p\text{-}C_3H_8 + CH_3$	7.50E+12	0.00	62.5	(212,213)
$C_3H_7 + CH_3 = s\text{-}C_3H_8 + CH_3$	4.30E+12	0.00	55.5	(214,215)
5.2 Verbrauch von $C_3H_5$				
$p\text{-}C_3H_5 + H = C_3H_4$	2.00E+13	0.00	0.0	(216,217)
$s\text{-}C_3H_5 + H = C_3H_4$	2.00E+13	0.00	0.0	(218,219)
$p\text{-}C_3H_5 + O_2 = C_3H_4 + HO_2$	1.00E+12	0.00	20.9	(220,221)
$s\text{-}C_3H_5 + O_2 = C_3H_4 + HO_2$	1.00E+12	0.00	12.5	(222,223)
$s\text{-}C_3H_5 = C_3H_4 + H$	2.00E+14	0.00	161.9	(224,225)
$p\text{-}C_3H_5 = C_3H_4 + CH_3$	3.00E+14	0.00	139.0	(226,227)
$p\text{-}C_3H_5 = C_3H_4 + H$	1.00E+14	0.00	156.1	(228,229)
5.5 Verbrauch von $C_3H_8$				
$C_3H_8 + O \rightarrow CH_3CO + CH_3$	5.00E+12	0.00	1.9	(230)
$C_3H_8 + OH \rightarrow CH_3CHO + CH_3$	2.00E+13	0.00	12.8	(231)

$k = A \cdot T^b \cdot \exp(-E/RT)$   
 [M] = Gesamtkonzentration  
 [M'] =  $[H_2]+6.5[H_2O]+0.4[O_2]+0.4[N_2]+0.75[CO]+1.5[CO_2]+3.0[CH_4]$

# Kohlenwasserstoffverbrennung bis zum Propan:

- 231 Elementarreaktionen!
- 29 Spezies!

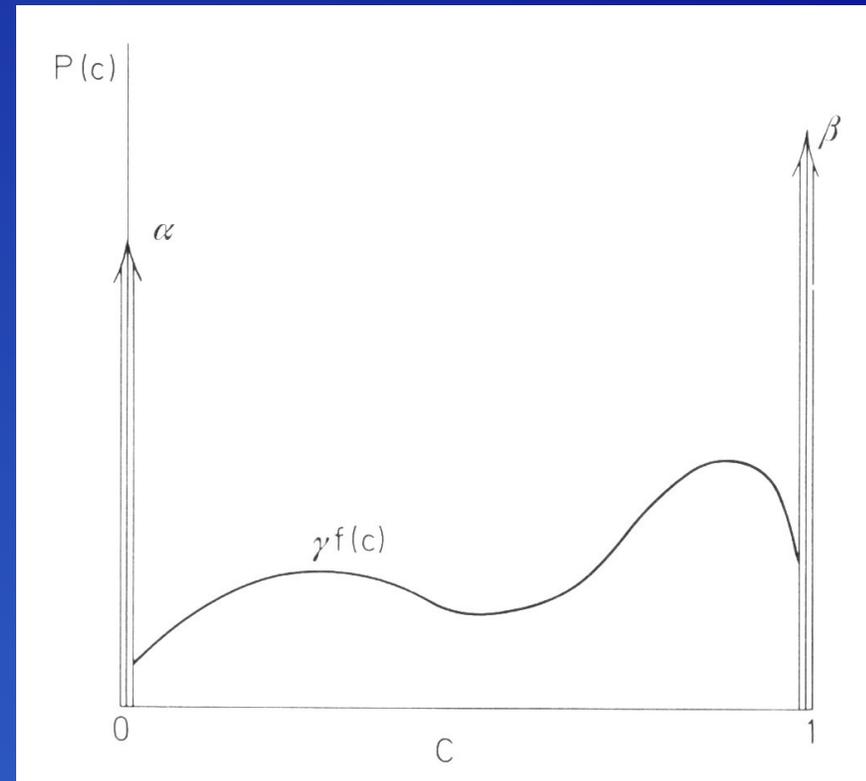
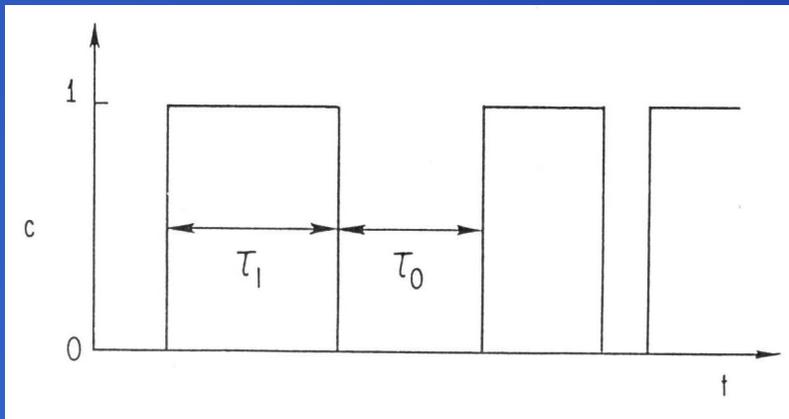
## Vollständiger chemischer Mechanismus für Kohlenwasserstoffverbrennung [Warnatz1993]

- Eddy-Breakup: 
$$\overline{R}_{fu} = \frac{\text{const.}}{\tau} \bar{\rho} \min \left( \bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}_{O_x}}{S}, \frac{C_{Pr} \cdot \bar{y}_{Pr}}{1+S} \right)$$
- Flamelet-Modelle (z.B. Coherent Flame-Modell): 
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \Sigma) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial x_j} \right) = S_\Sigma = S_{\sigma_c} - S_a$$
  

$$\overline{R} = \rho_{fr} y_{fu} S_L \Sigma$$
- Zimont-Modell: 
$$\overline{R} = \bar{\rho} S_T \nabla c f_{st} \cdot \text{const.} \quad S_T = f(u', Da)$$
- PDF-Modelle: Transportgleichung für Wahrscheinlichkeitsdichte (Speziesmassenbrüche, Mischungsbruch, evtl. Geschwindigkeit + turbulente Größen); chemischer Quellterm geschlossen
- Lindstedt-Vaos

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) für Reaktionsfortschrittsvariable am Ort x

$$c = \frac{T - T_u}{T_b - T_u}$$



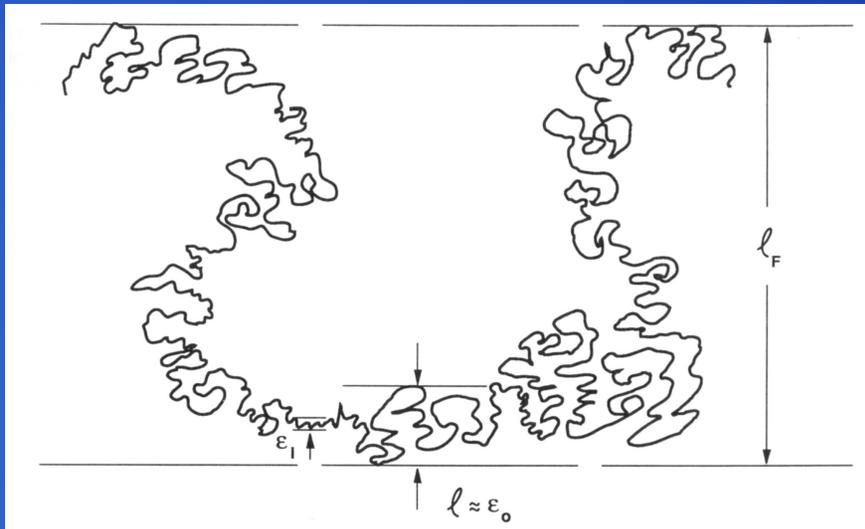
Flamelets: verbranntes und unverbranntes Gas räumlich scharf voneinander getrennt

$$\gamma \rightarrow 0 \Rightarrow \widetilde{c}''^2 = \widetilde{c} \cdot (1 - \widetilde{c})$$

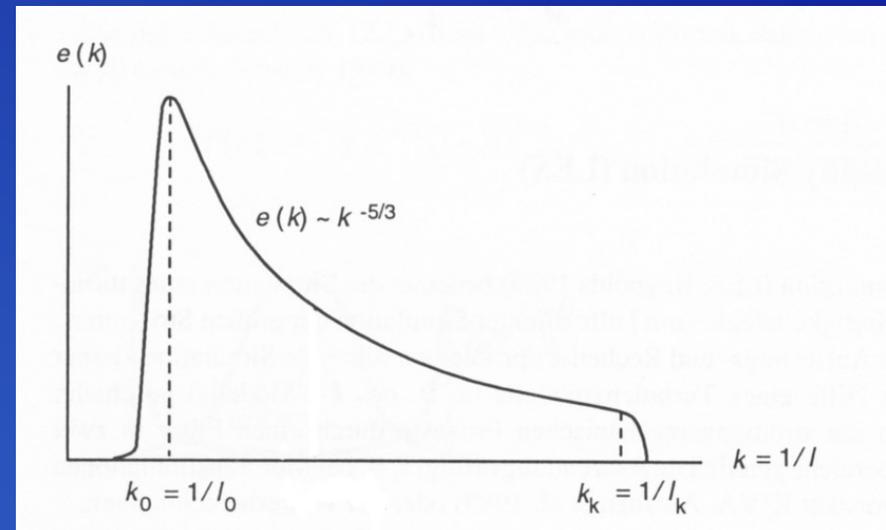
## Ansatz für chemischen Quellterm über Flammenoberflächendichte

$$\bar{S}_c = \rho_u \cdot s_{l,0} \cdot \Sigma$$

- $\rho_u$  Dichte des unverbrannten Gases
- $s_{l,0}$  Geschwindigkeit der laminaren Flamme
- $\Sigma$  Oberflächendichte des Flamelets; aus fraktaler Theorie [Gouldin1989]:



fraktale Flammenfront



Turbulenzspektrum

$$\Rightarrow \bar{S}_c = C_R \cdot \rho_u \cdot \frac{s_{l,0}}{V_k} \cdot \frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{k}} \cdot \tilde{c} \cdot (1 - \tilde{c})$$

Modellierung des Umsatzes  
 mittels Fortschrittsvariable:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{c}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{c}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{c}''') + \bar{S}_c$$

$$\tilde{c} = \frac{\tilde{T} - T_u}{T_b - T_u}$$

$$\bar{S}_c = C_R \cdot \rho_u \cdot \frac{s_{1,0}}{\nu^{1/4}} \cdot \frac{\tilde{\epsilon}^{3/4}}{\tilde{k}} \cdot \tilde{c} \cdot (1 - \tilde{c})$$

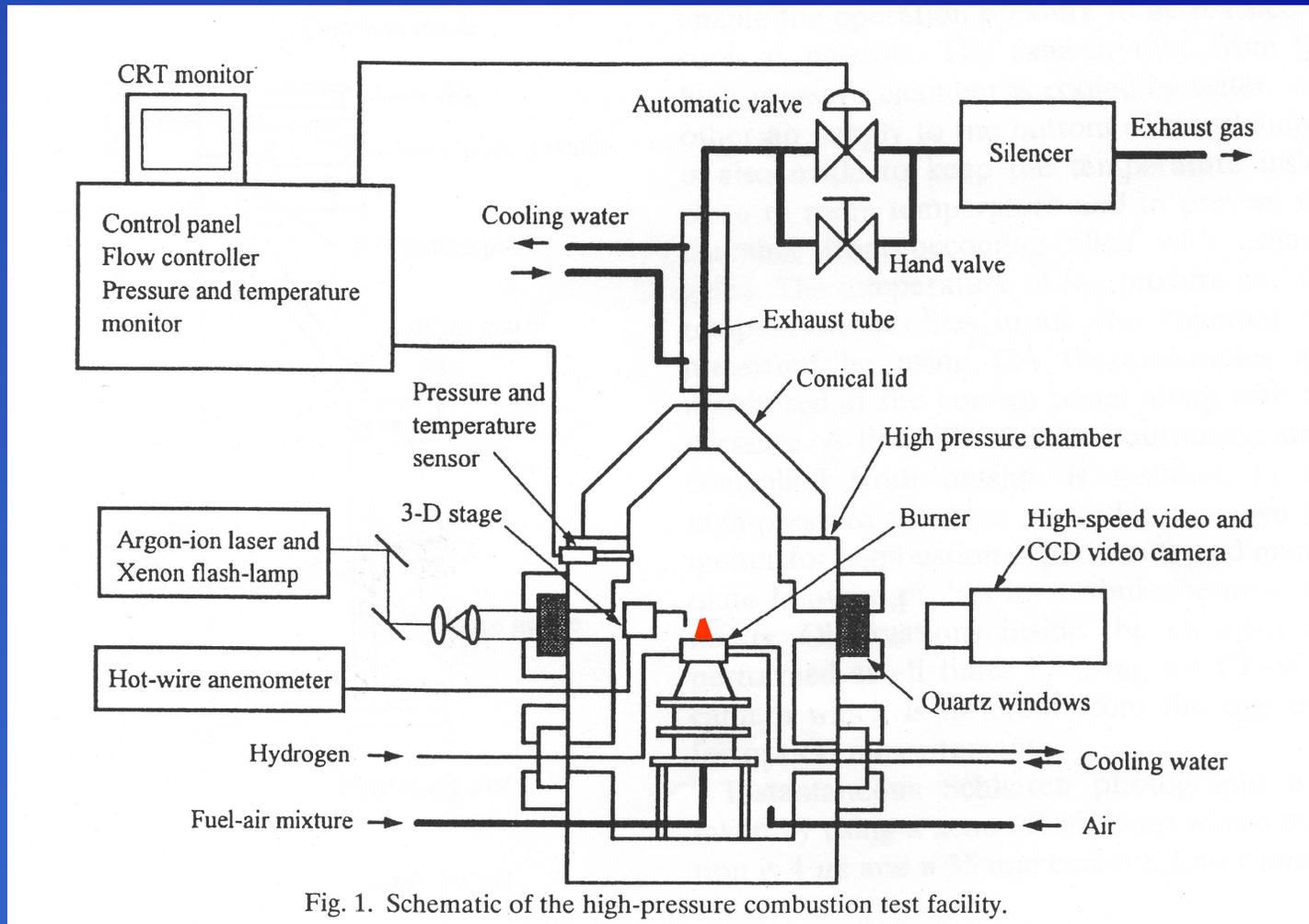
Modellierung mit  
 Massenbrüchen:

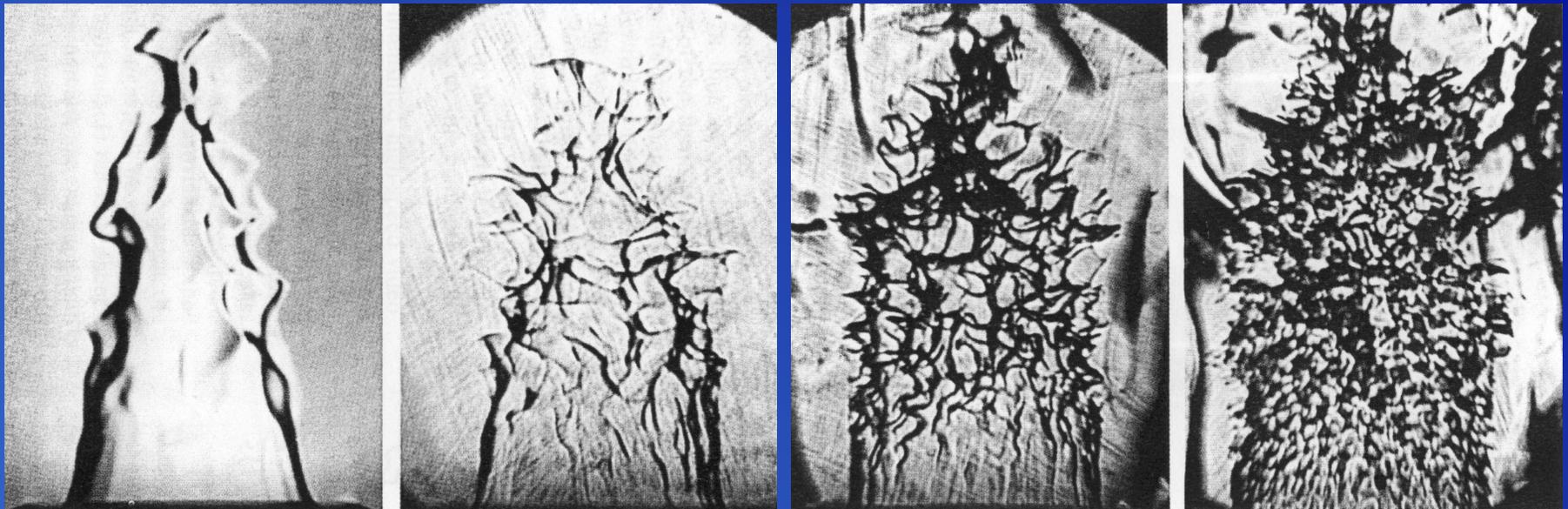
$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{Y}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Y}_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Y}_i''') + \bar{R}_i$$

$$\tilde{c} = \frac{\tilde{Y} - Y_u}{Y_b - Y_u}$$

$$\bar{R}_i = \bar{S}_c \cdot (Y_b - Y_u)$$

Vorteil: Transportgleichungen für Spezies in gängigen CFD-Codes bereits implementiert





0.1 MPa

0.25 MPa

0.5 MPa

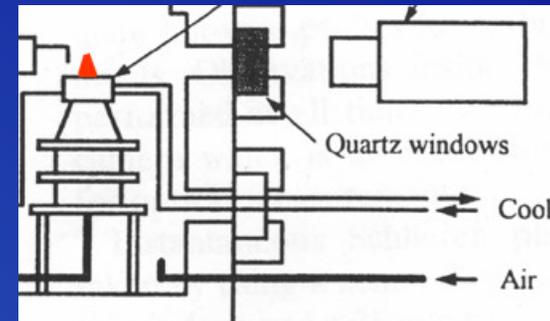
1 MPa

$\Phi=0.9$ ,  $u=2.0\text{m/s}$ ,  $d=20\text{mm}$

$Re \uparrow$  : zunehmend feinstrukturierte fraktale Flammenstruktur

- Zwei Ströme unterschiedlicher Zusammensetzung (Brenngas/Luft); Modellierung mit Mischungsbruch für Kohlenstoff:

$$f = \frac{Z_C - Z_{C,o}}{Z_{C,f} - Z_{C,o}}$$

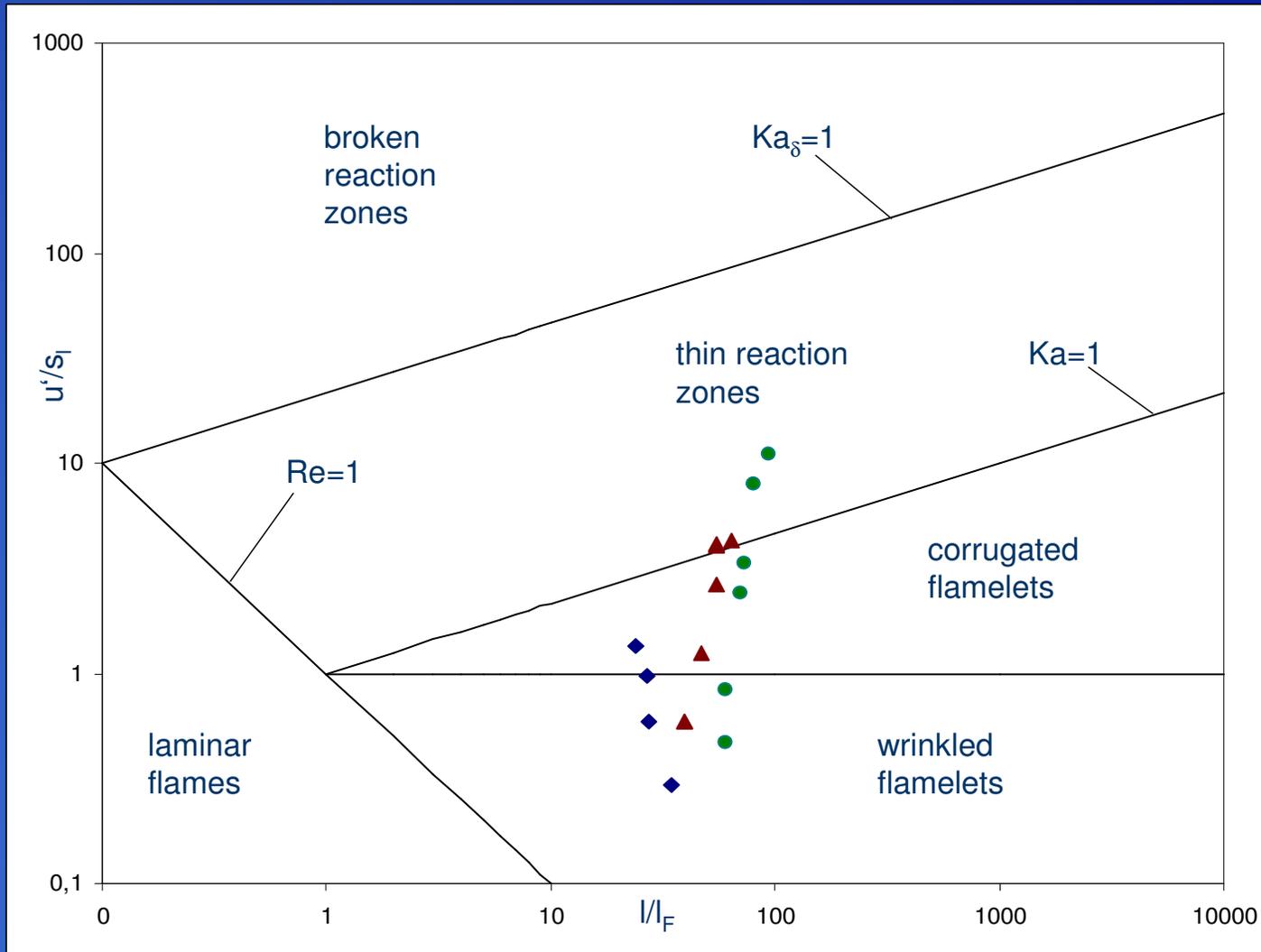


- Fortschrittsvariable unter Berücksichtigung des Mischungseffektes:

$$\tilde{c} = 1 - \frac{\tilde{Y}_F - f \cdot Y_{F,b}}{(Y_{f,u} - Y_{f,b}) \cdot f}$$

- Randbedingungen:
 

Druck:	1bar, 5bar, 10bar
Einlassgeschwindigkeit:	2.02 bis 4.06m/s
Turbulente Schwankung am Einlass:	0.09 bis 0.65 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Brennstoffgemisch:	Methan/Luft bei $\Phi=0.9$
Brennerdurchmesser:	20mm

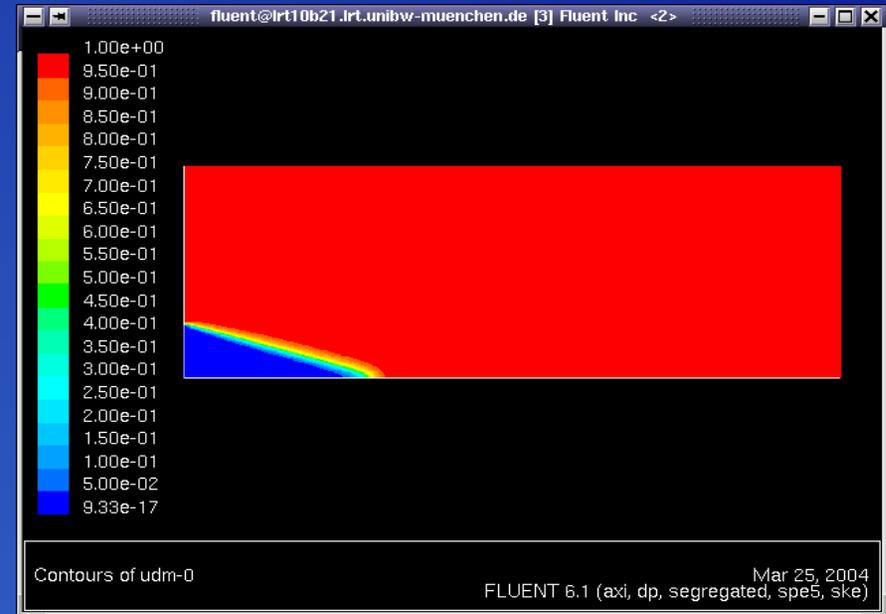
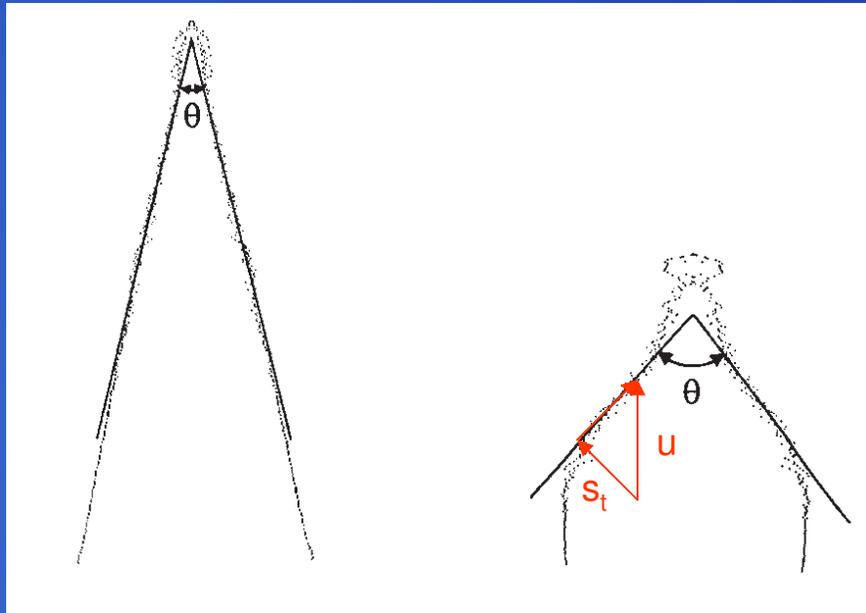


Nachgerechnete Experimente im Regime-Diagramm

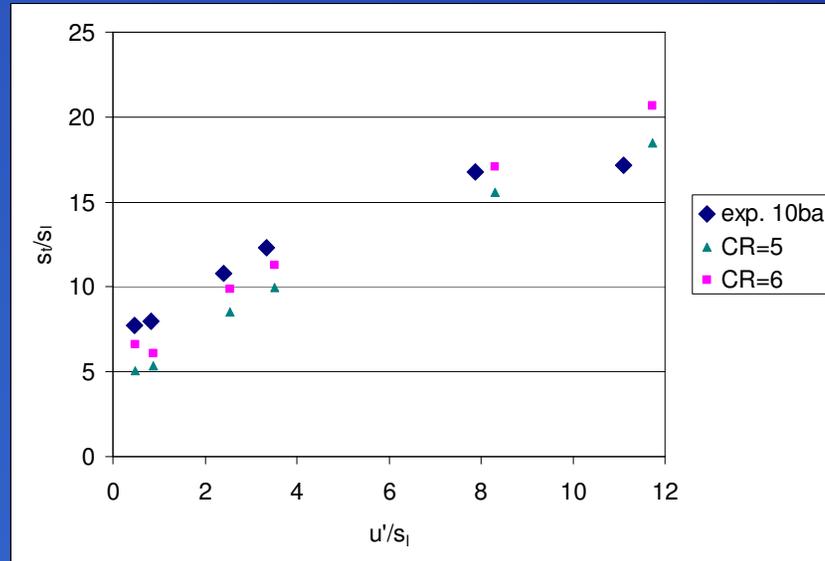
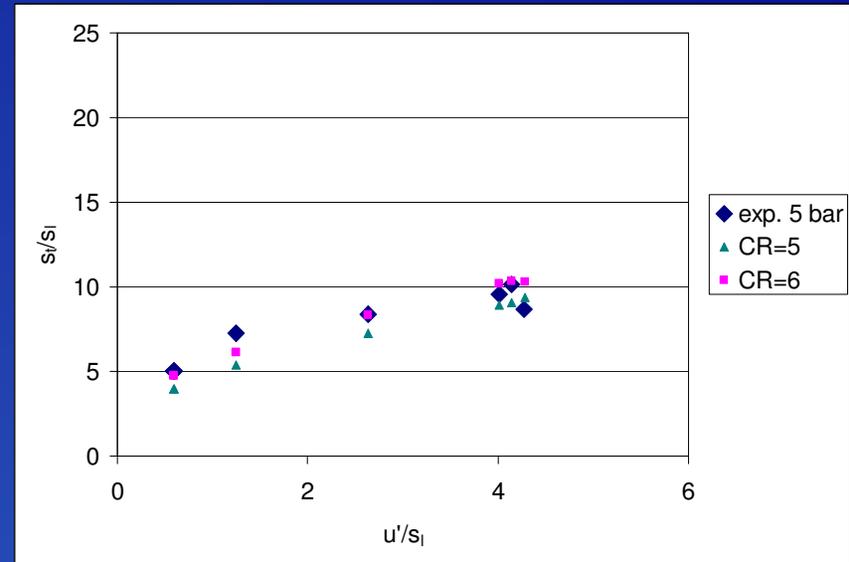
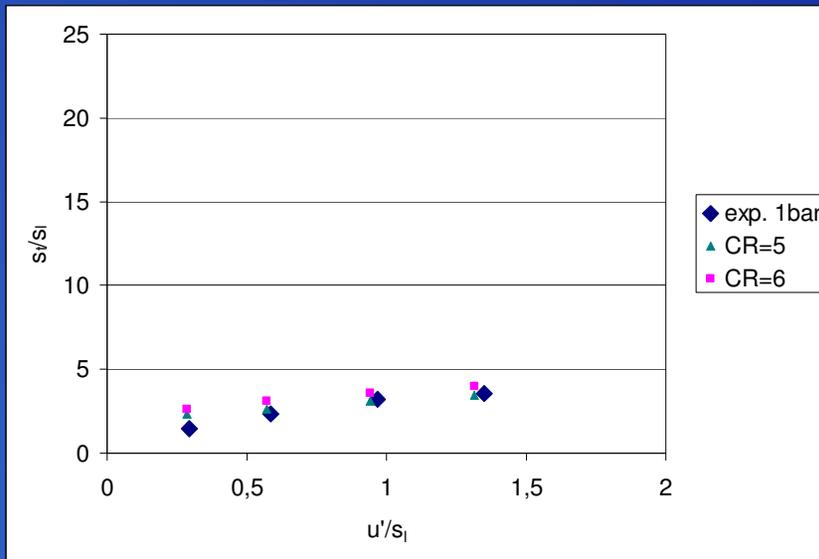
Aus Winkel des Flammenkonus:  $s_t = u \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Experiment

Rechnung:  $\bar{c} = \frac{(1 + \tau)\tilde{c}}{1 + \tau\tilde{c}}$

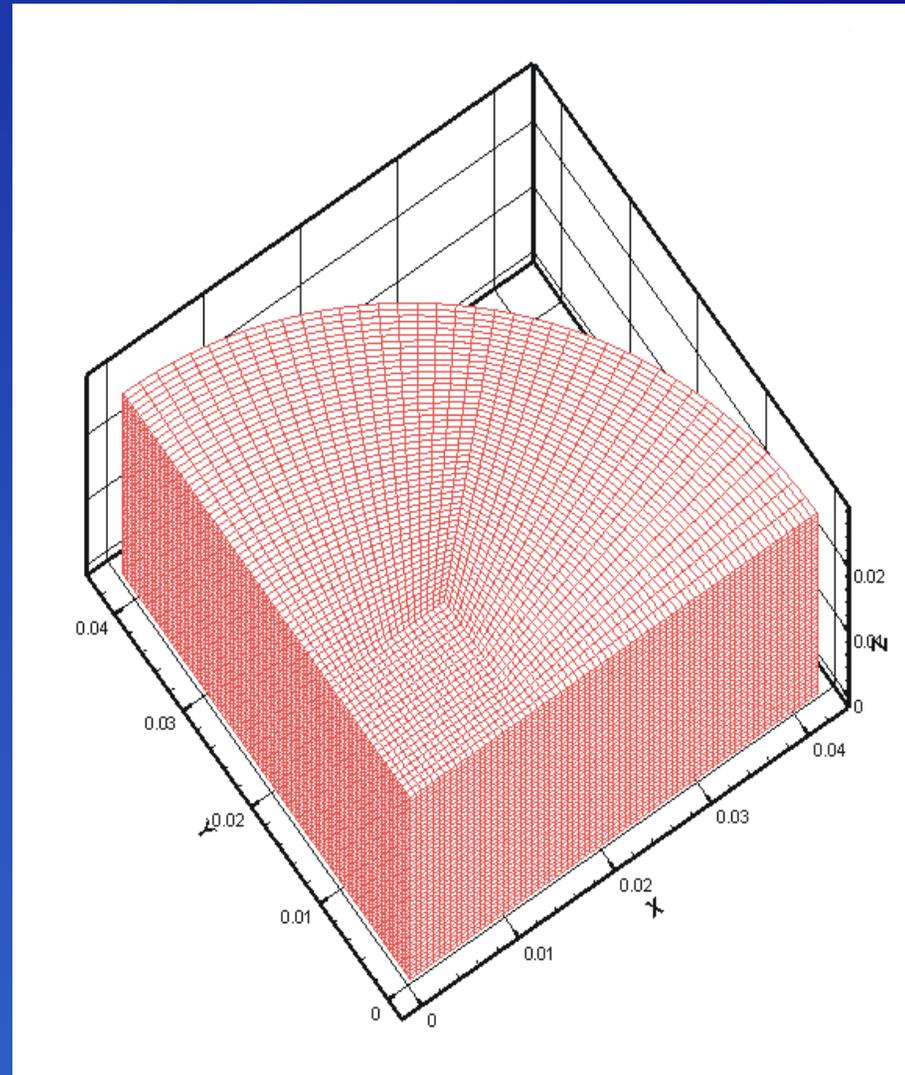


Bestimmung der turbulenten Flammengeschwindigkeit aus der CFD-Rechnung [Kobayashi],[Dinkelacker],[Libby]



Ergebnisse Methan/Luft,  $\Phi=0.9$

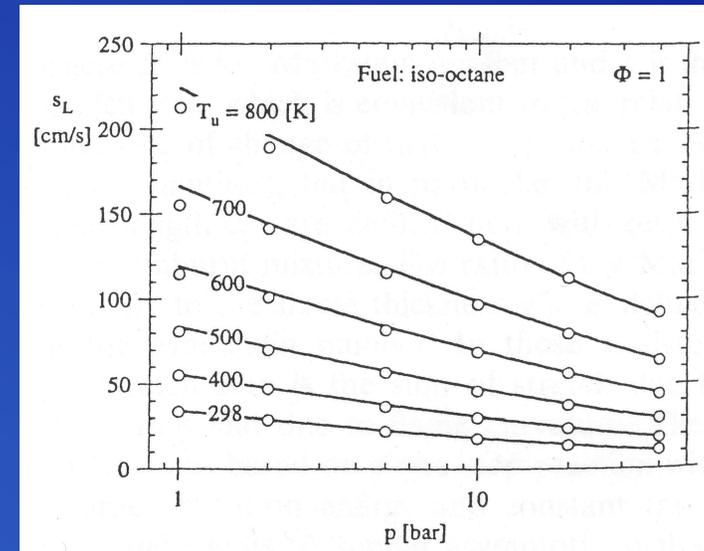
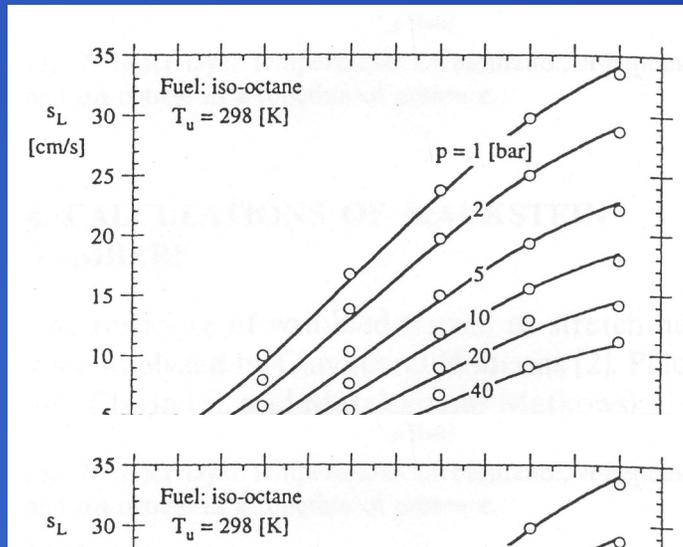
- Zylindersektor
- Randbedingungen:
  - zyklisch an Seitenflächen
  - symmetrisch an Unterseite
  - adiabate Wände
- Anfangsbedingungen:
  - Luft/Oktan-Gemisch,  $\lambda=1$
  - $T = 785.6 \text{ K}$
  - $p = 9.294 \text{ bar}$
  - $\text{TKE} = 18 \text{ m}^2/\text{s}^2$
  - Zündung bei  $(x,y,z)=(0,0,0)$   
Zündradius = 2mm



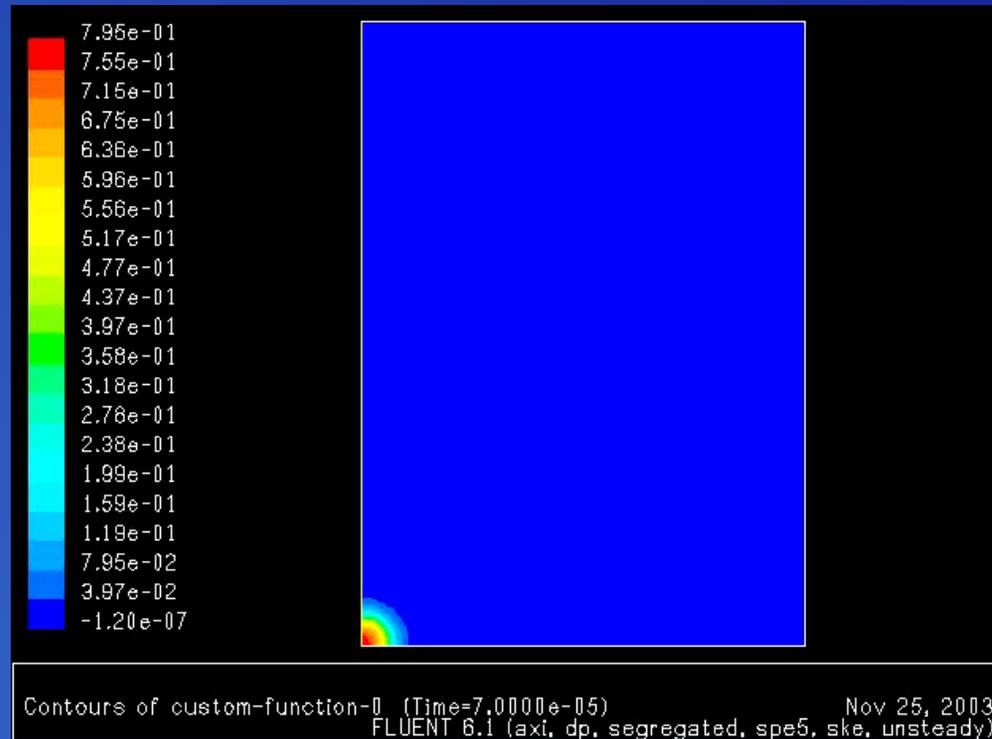
$$s_l = \text{const.} \cdot \exp\left(-\frac{G}{T_0}\right) \sqrt{Y_{F,u}} \frac{T_u}{T_0} \left(\frac{T_b - T_0}{T_b - T_u}\right)^2, T_0 = T_0(p)$$

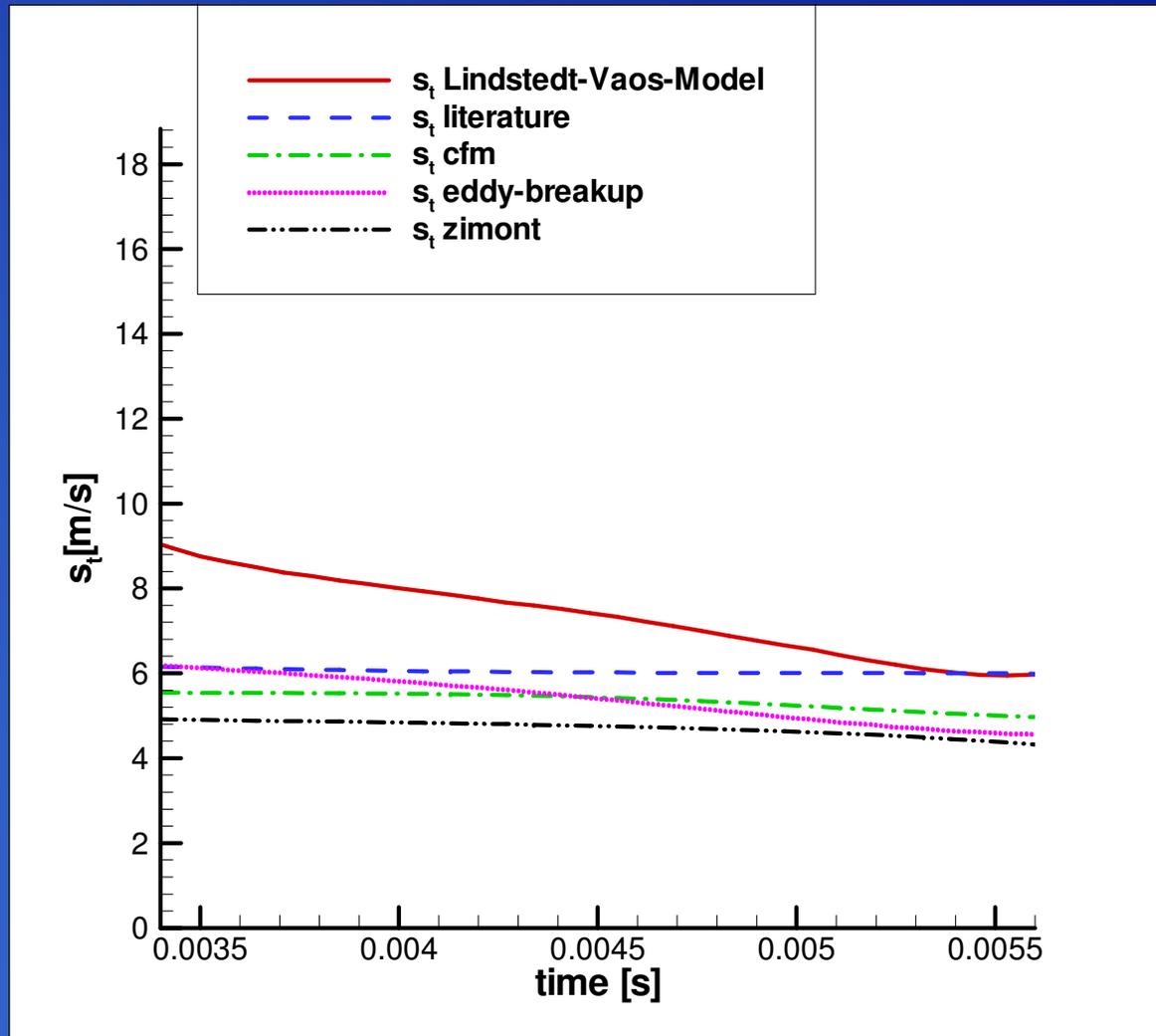
$$T_b = aT_u + b + c\phi + d\phi^2 + e\phi^3$$

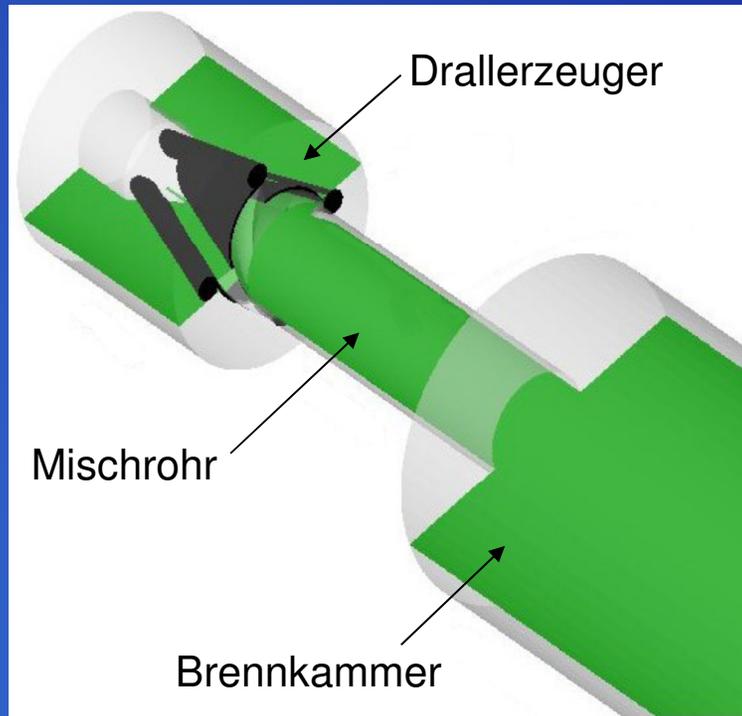
$p=1 \dots 40 \text{ bar}, T_u = 298 \dots 800 \text{ K}$



Ermittlung von  $T_u$  aus isentroper Kompression

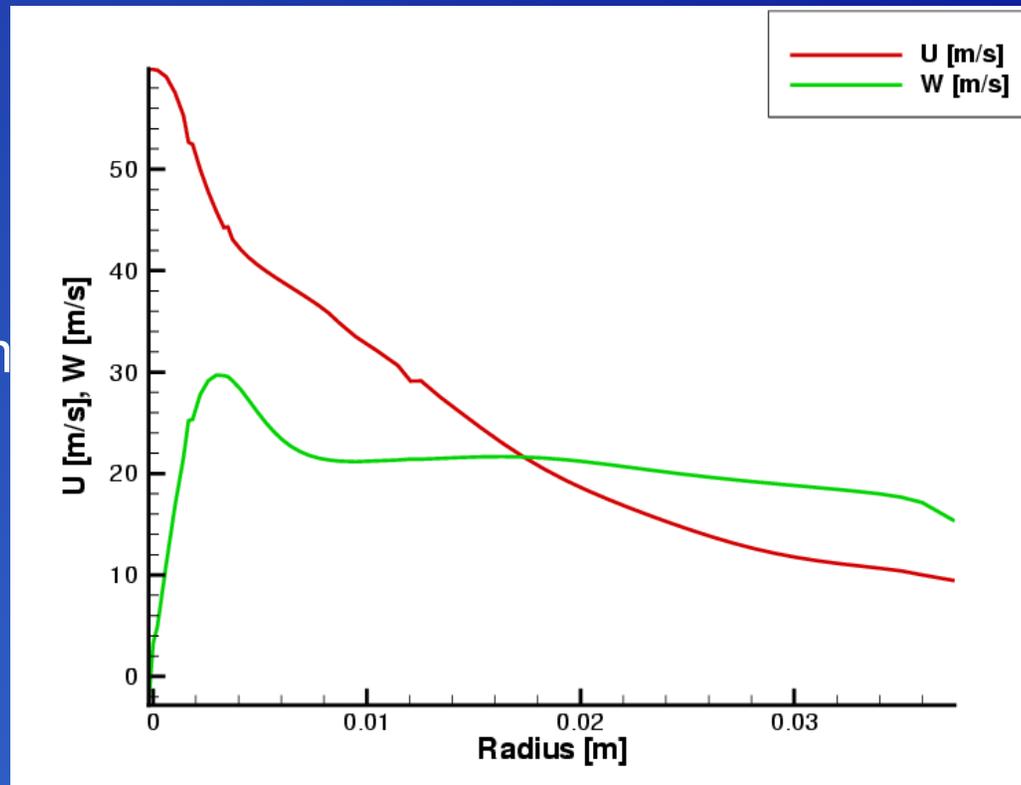






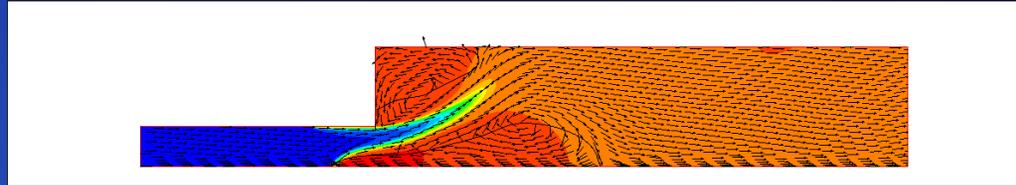
- Aufprägen einer Drallströmung zur Stabilisierung bei magerer Verbrennung
- Untersuchung des Flammenrückschlags ins Mischrohr

- Brennstoff:  
Methan
- Eintrittsmassenstrom  
70g/s
- Eintrittstemperatur:  
100 °C

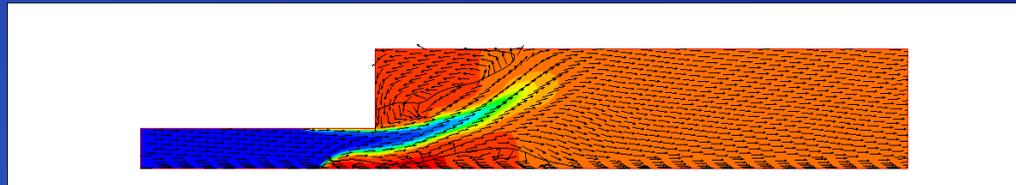


Geschwindigkeitsprofile am Eintritt

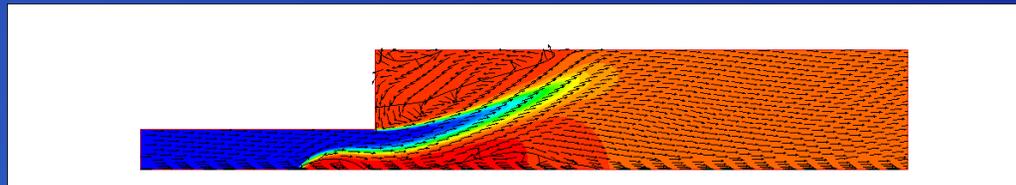
$\lambda = 1.8$



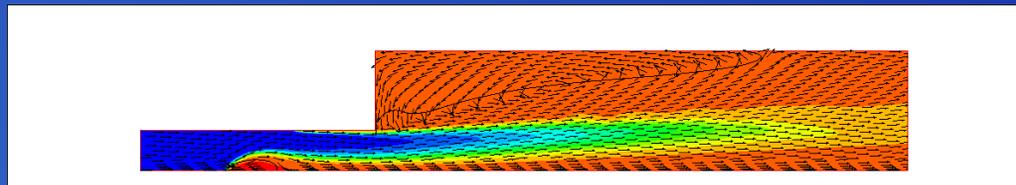
$\lambda = 1.6$



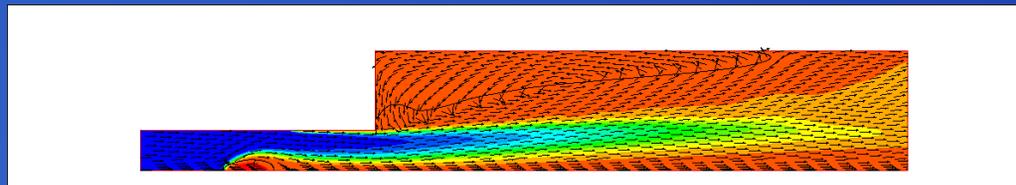
$\lambda = 1.3$



$\lambda = 1.2$



$\lambda = 1.1$



- Lindstedt-Vaos-Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit Experimenten von Kobayashi für isobare Flamme
- Konstante in Lindstedt-Vaos-Modell nicht druckabhängig, jedoch Verbesserungsbedarf bei kleinen Turbulenzgraden
- Vergleich mit Literaturdaten bestätigt richtige Größenordnung für die turbulente Flammengeschwindigkeit  
Verbesserung Möglich durch Berücksichtigung von Flammenstreckungseffekten
- Anwendung des Modells für Betrachtung des Flammenrückschlages in Drallstabilisierter Brennkammerströmung
- Erweiterung auf andere Brennstoffe in Arbeit

Vielen Dank für die  
Aufmerksamkeit!

- Transportgleichung für Flammenoberflächendichte  $\Sigma$ :

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \Sigma) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial x_j} \right) = S_\Sigma = S_g - S_a$$

$$S_g = \alpha K_t \Sigma \quad S_a = \beta \frac{\rho_{fu,fr} S_L}{\rho_{fu}} \Sigma^2$$

- Turbulente Reaktionsrate:

$$\bar{\dot{w}} = \rho_{fr} y_{fu} S_L \Sigma$$

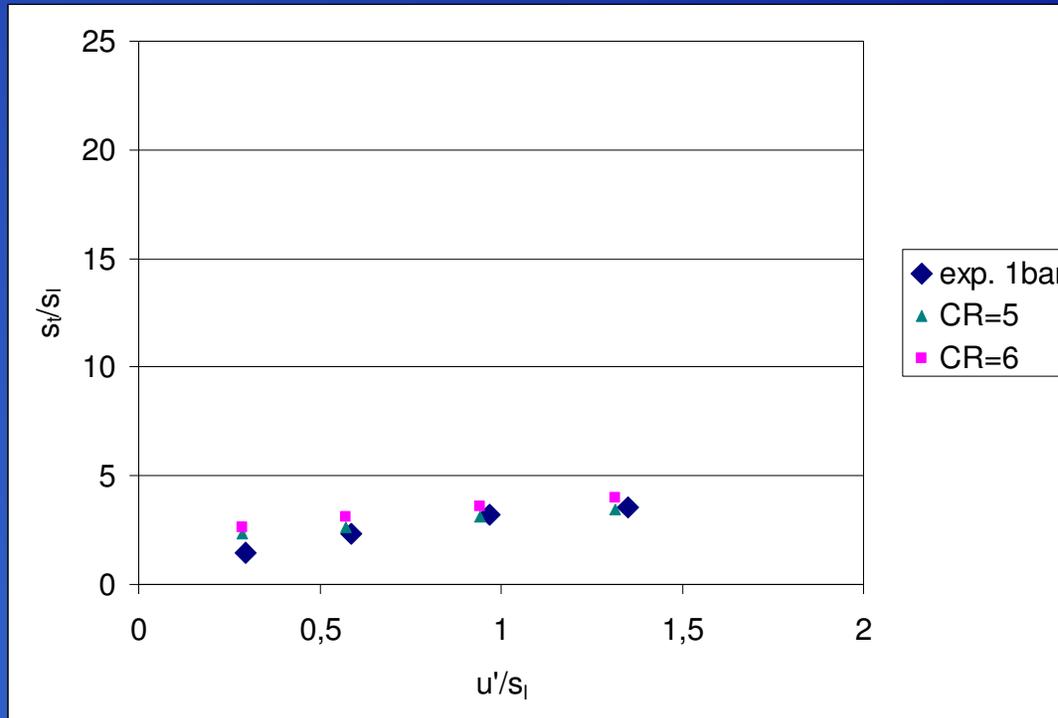
- Turbulenzkontrollierte Modellierung d. Reaktionsrate:

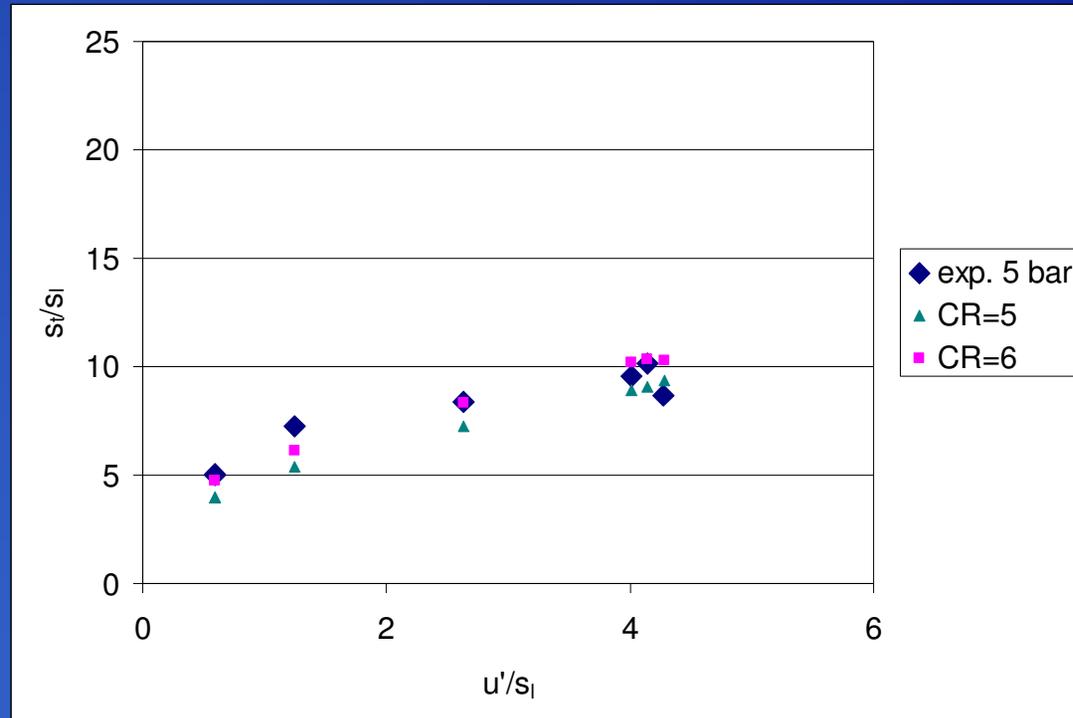
$$\overline{\rho \dot{r}_{fu}} = \frac{C_{fu}}{\tau_R} \bar{\rho} \min \left( \bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}o_x}{S}, \frac{C_{Pr} \cdot \bar{y}_{Pr}}{1+S} \right)$$

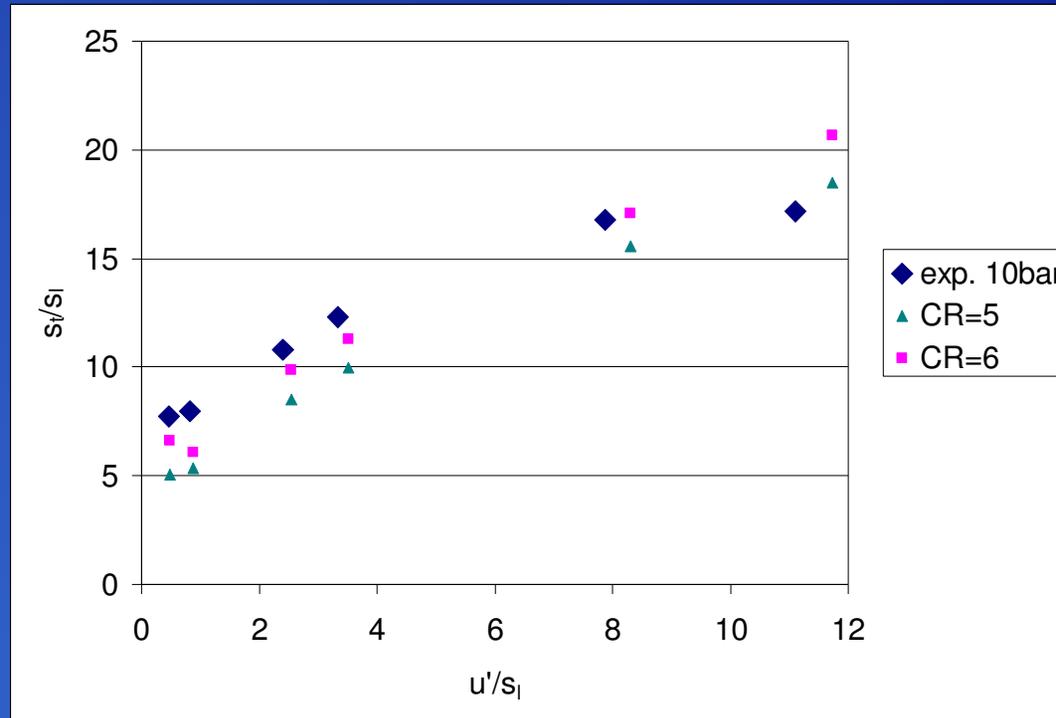
- Vergleich mit der nach Zimont berechneten turbulenten Flammengeschwindigkeit:

$$u_t = A u' (Da)^{1/4} = A (u')^{(3/4)} \sqrt{u_L} \alpha^{-1/4} l_t^{1/4}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$







Problem: Brennen an der Wand (Dissipationsrate sehr groß)

$$\overline{S_c} = C_R \cdot \rho_u \cdot \frac{s_{1,0}}{\nu^{1/4}} \cdot \frac{\tilde{\epsilon}^{3/4}}{\tilde{k}} \cdot \tilde{c} \cdot (1 - \tilde{c})$$

$$\overline{s_1} = \left( \frac{\overline{\epsilon^{3/4}}}{\overline{k}} \right)_1 \equiv \frac{1}{m} \cdot \int_m \frac{\tilde{\epsilon}^{3/4}}{\tilde{k}} dm$$

$$\overline{s_2} = \left( \frac{\overline{\epsilon^{3/4}}}{\overline{k}} \right)_1 \equiv \frac{1}{m} \cdot \int_{m_2 | \frac{\tilde{\epsilon}^{3/4}}{\tilde{k}} < \overline{s_1}} \frac{\tilde{\epsilon}^{3/4}}{\tilde{k}} dm$$

