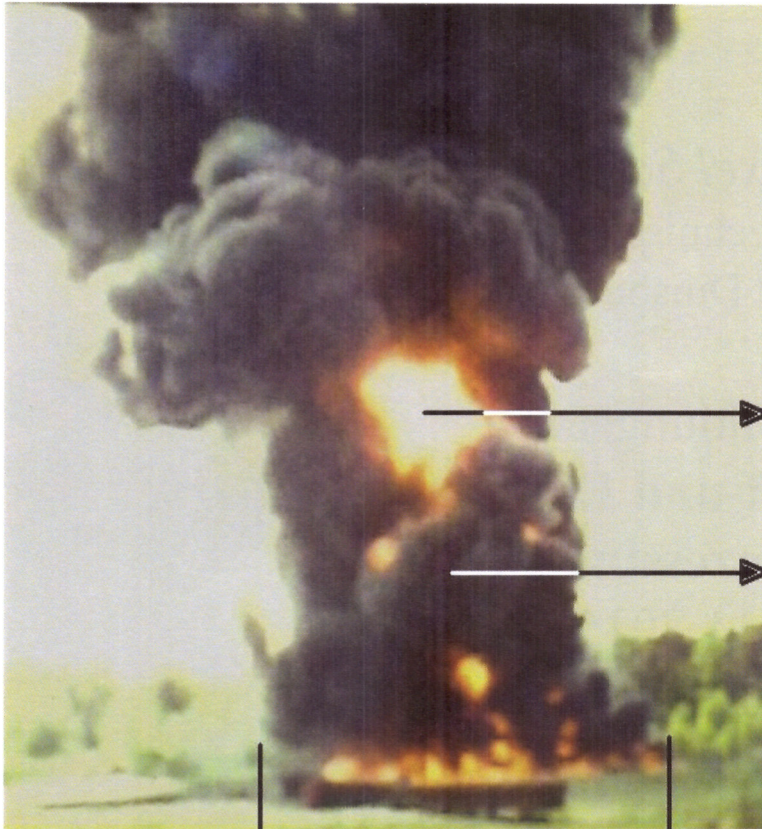


Prof. Dr. Axel Schönbacher
Institut für Technische Chemie I
Universität Duisburg-Essen

Fortbildungstag
Störungsbedingte Stoff- und Energiefreisetzen
in der Prozessindustrie
10.11.2015
DECHEMA-Haus
Frankfurt/Main

Inhaltsverzeichnis

- Einführung: Massen- und Wärmeströme bei Bränden
- Physikalische Vorgänge, Energiebilanzen, Massenbilanz
- Quellterme
 - Abbrandgeschwindigkeit (Massenabbrandrate)
 - Wärmestrom an der Flammenspitze
- Einflussgrößen
 - Lachengröße bzw. Lachendurchmesser bei Brand
 - Sichtbare Flammenlänge, Flammenneigung und Flammendrag
 - Luftentrainment-Massenströme
 - Spezifische Ausstrahlung (SEP)
 - Berechnung von Einflussgrößen mit CFD-Simulation
- Thermische Abstände von Bränden
- Berechnungsbeispiel
 - Massen- und Wärmeströme in einem Benzin-Poolfeuer ($d = 20 \text{ m}$)
- Zusammenfassung



Flamme brennt auf einer Wasseroberfläche

$$\overline{SEP}_{hs}(d,f)$$

$$\overline{SEP}_{sp}(d,f)$$

$$\overline{H}_{cl}$$

Testfeuer

$$\leftarrow d = 25 \text{ m} \rightarrow$$

JP-4 Poolfeuer

Typen von Feuern bzw. Bränden

- **Poolfeuer** (mit Berandung) flüssiger und fester Brennstoffe
- **Lachenfeuer** (ohne Berandung) flüssiger Brennstoffe auf Land, auf Wasser
- **Tankfeuer** flüssiger Brennstoffe
- **Rinnen-, Schlitz- und Kanalfeuer** flüssiger Brennstoffe
- auftriebsdominierte, offene Feuer *gasförmiger* Brennstoffe
- Einzel- und **multiple** Feuer

▪ Berechnung von Quelltermen bei Bränden

$$\dot{m}_f(d) \equiv A \dot{m}_f''(d) \quad \text{und} \quad \dot{m}_v = A \rho_v (u_v + \frac{\dot{m}_f''}{\rho_f}) \quad \text{aus Gesamt-Massenbilanz}$$

\dot{m}_f [kg / s]: Brennstoffmassenstrom, \dot{m}_v [kg / s]: Massenstrom in Gasphase
 \dot{m}_f'' [kg / (sm²)]: Massenabbrandrate

$$\dot{m}_P(t) = y_P \dot{m}_f(t) = y_P \frac{\dot{Q}_c(t)}{(-\Delta h_c)}$$

$\dot{m}_P(t)$ [kg / s] : Massenstrom (Bildungsrate) eines Brandproduktes P, z.B. Ruß, CO, CO₂
 y_P [kg / kg]: Ausbeute eines charakteristischen Brandproduktes P
 $\dot{Q}_c(t)$ [kW] : Brandleistung des Feuers

$$\dot{Q}_{top} = \dot{Q}_{conv} + A_{top} SEP^{ma}$$

\dot{Q}_{top} [kW]: Wärmestrom an Flammenspitze

SEP^{ma} [kW / m²]: maximale SEP einer klaren, nicht rußbedeckten Flamme

Zur Berechnung der Quellterme sind die folgenden **Einflussgrößen** eines Feuers zu bestimmen bzw. müssen bekannt sein:

- Lachendurchmesser d bzw. Brandfläche A_L
- relative Flammenlänge, Flammenneigung, Flammendrag:

$$H/d, H_{cl}/d, \theta, d_w/d;$$

$$A_F(H, \theta, d_w)$$

- Entrainmentmassenstrom

$$\dot{m}_{ent}(\dot{Q}_{conv});$$

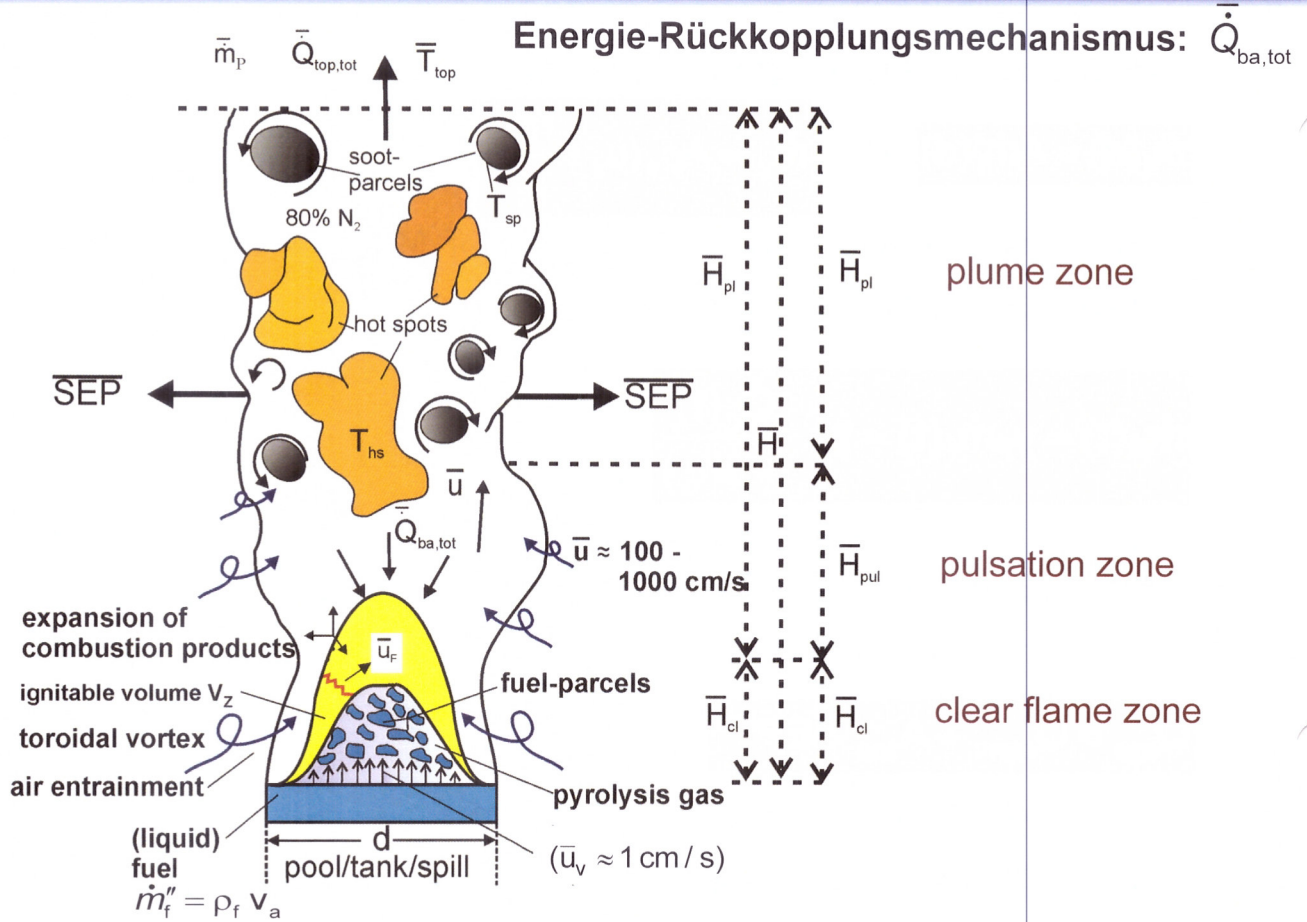
$$\dot{m}_{pl} = \dot{m}_{ent} + \dot{m}_P(y_P, \dot{Q}_C)$$

- Spezifische Ausstrahlung

$$SEP(d, A_F(H))$$

- Temperatur und Wärmestrom an Flammenspitze:

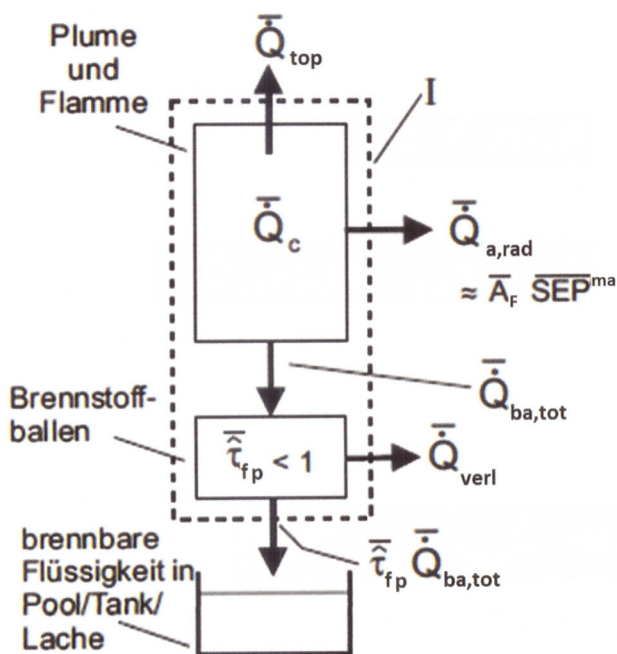
$$T_{top} \text{ bzw. } \dot{Q}_{top} = \dot{m}_{pl} c_p (T_{top} - T_a); \text{ oder } \dot{Q}_{top}(\dot{Q}_{conv}, SEP)$$



Physikalische Vorgänge in Pool-, Tank- und Lachenfeuern

Physikalische Vorgänge, Energiebilanzen

$$\bar{Q}_c = \bar{Q}_{a,rad} + \bar{Q}_{top} + \bar{\tau}_{f,p} \bar{Q}_{ba,tot} + \bar{Q}_{sens} + \bar{Q}_{verl} \quad (I)$$



$$\bar{Q}_c \equiv \bar{q}_f'' A_P = \bar{m}_{f,max}'' A_P (-\Delta \bar{h}_{c,i})$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{top} &= \bar{Q}_{conv} + \bar{A}_{top} \overline{SEP}^{ma} \\ &= \bar{Q}_{conv} + \bar{Q}_{top,rad} \end{aligned}$$

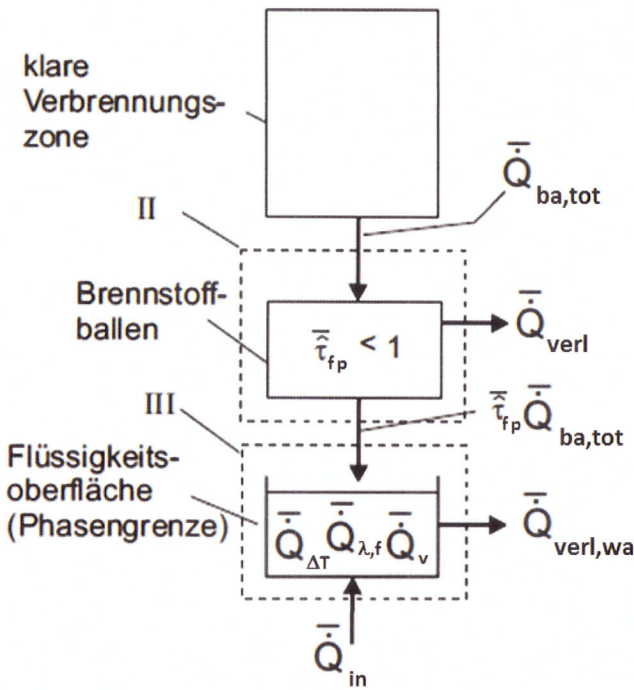
$$\bar{e} \equiv \bar{A}_{top} / A_P \Rightarrow \bar{A}_{top} \approx \bar{e} A_P$$

$$\bar{Q}_{conv} = \pi \rho \bar{u}_{ax} \bar{r}_{pl}^2 \bar{c}_{p,pl} (\bar{T}_{pl} - T_a)$$

oder näherungsweise:

$$\bar{Q}_{conv} / \bar{Q}_c \lesssim 0.7$$

Energiebilanz im Bilanzgebiet I zwischen Plume, Flamme und Pool/Tank/Lache



$$\bar{\tau}_{fp} \bar{Q}_{ba,tot} + \bar{Q}_{in} = \bar{Q}_{f,ges} + \bar{Q}_{verl,wa} \quad (III)$$

$$\bar{Q}_{f,ges} = \bar{Q}_v + \bar{Q}_{\Delta T} + \bar{Q}_{\lambda,f}$$

$$\bar{Q}_{ba,tot} = \bar{Q}_{ba,rad} + \bar{Q}_{ba,\alpha} + \bar{Q}_{ba,\lambda}$$

$$\bar{Q}_{ba,tot} = \bar{\tau}_{fp} \bar{Q}_{ba,tot} + \bar{Q}_{verl} \quad (II)$$

Energie-Rückkopplungsmechanismus über $\bar{Q}_{ba,tot}$ (d) in Gl. (III), bedeutsam für \dot{m}_f

Energiebilanzen an Phasengrenzfläche im Bilanzgebiet III : zwischen Flüssigkeitsoberfläche und Brennstoffballen sowie im Bilanzgebiet II : zwischen klarer Verbrennungszone und Brennstoffballen

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate

Nach *Hottel* und *Hertzberg* folgt aus Bilanzen (III,1) für

$$\dot{Q}_{\lambda,f} \rightarrow 0, \dot{Q}_{verl} \rightarrow 0, c_{p,v} \approx c_{p,f}, \text{ im Strahlungs-Grenzfall mit}$$

$$\dot{Q}_{ba,\alpha} \rightarrow 0, \dot{Q}_{ba,\lambda} \rightarrow 0:$$

$$\dot{m}_f'' \equiv \dot{m}_f / A \equiv \rho_f v_a = \frac{\dot{Q}_{ba,tot} / A}{\Delta h_v + \bar{c}_{p,f} (T_{f,b} - T_{f,a})}, \quad d \gtrsim 1 \text{ m}$$

worin $A = A_p$ oder A_L .

\dot{m}_f'' , \dot{m}_f und v_a sind *abhängig* von d , *Brennstoff*, u_w , $(-\Delta h_c)/\Delta h_v$, t sowie Poolrandeffekten und stellen fundamentale *Schlüsselgrößen* dar.

Annahmen:

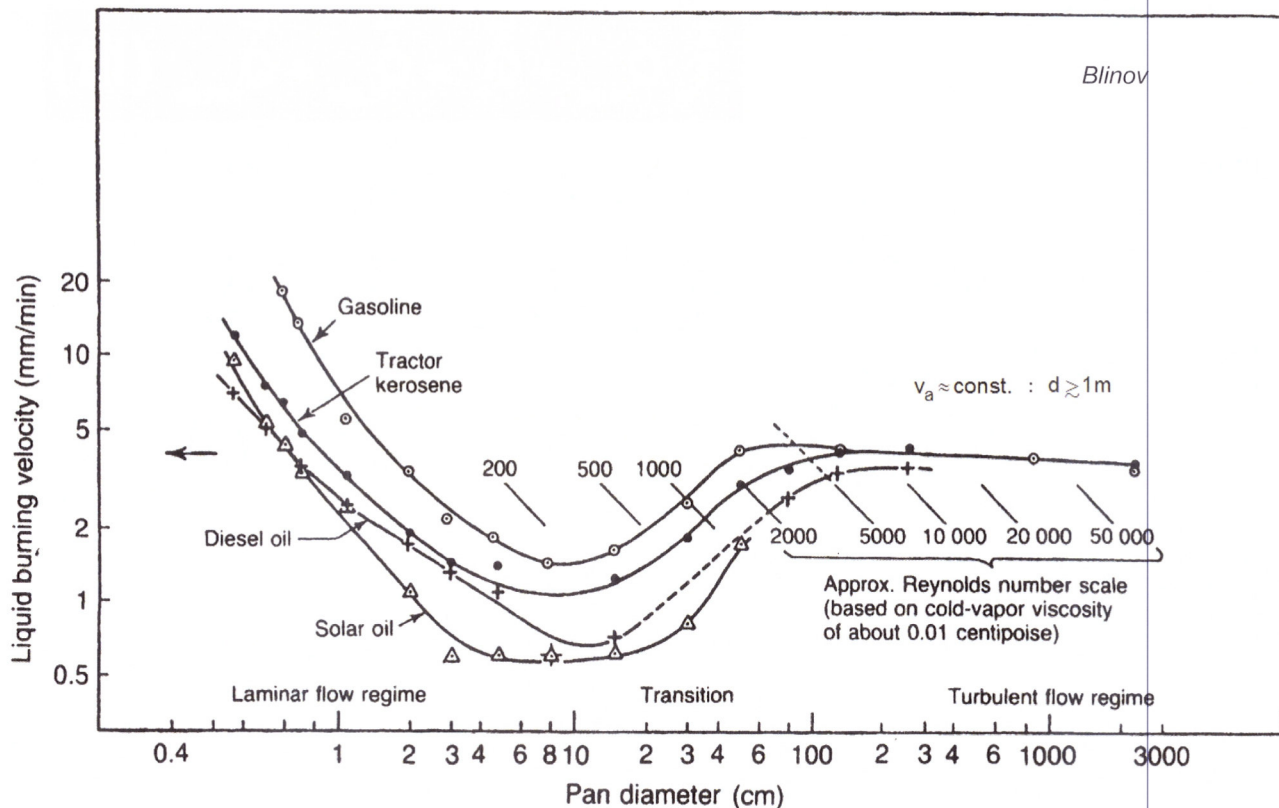
- Einstrahlzahl $\varphi_{F,f}$ zwischen Flamme (F) und Flüssigkeit (f) ist konstant:

$$\dot{Q}_{ba,rad} / A \sim \varphi_{F,f} \varepsilon_{F,f}(d), \text{ worin } \varepsilon_{F,f}(d) = \frac{\dot{m}_f''(d)}{\dot{m}_{f,max}''} \approx \frac{0.5 \varepsilon_f \varepsilon_F(d)}{\varepsilon_f + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_F(d)} \approx 0.5 \varepsilon_F(d) \text{ ist}$$

- für *adiabatische* (zwischen Substrat und Brennstoff) Poolfeuer [Hertzberg]

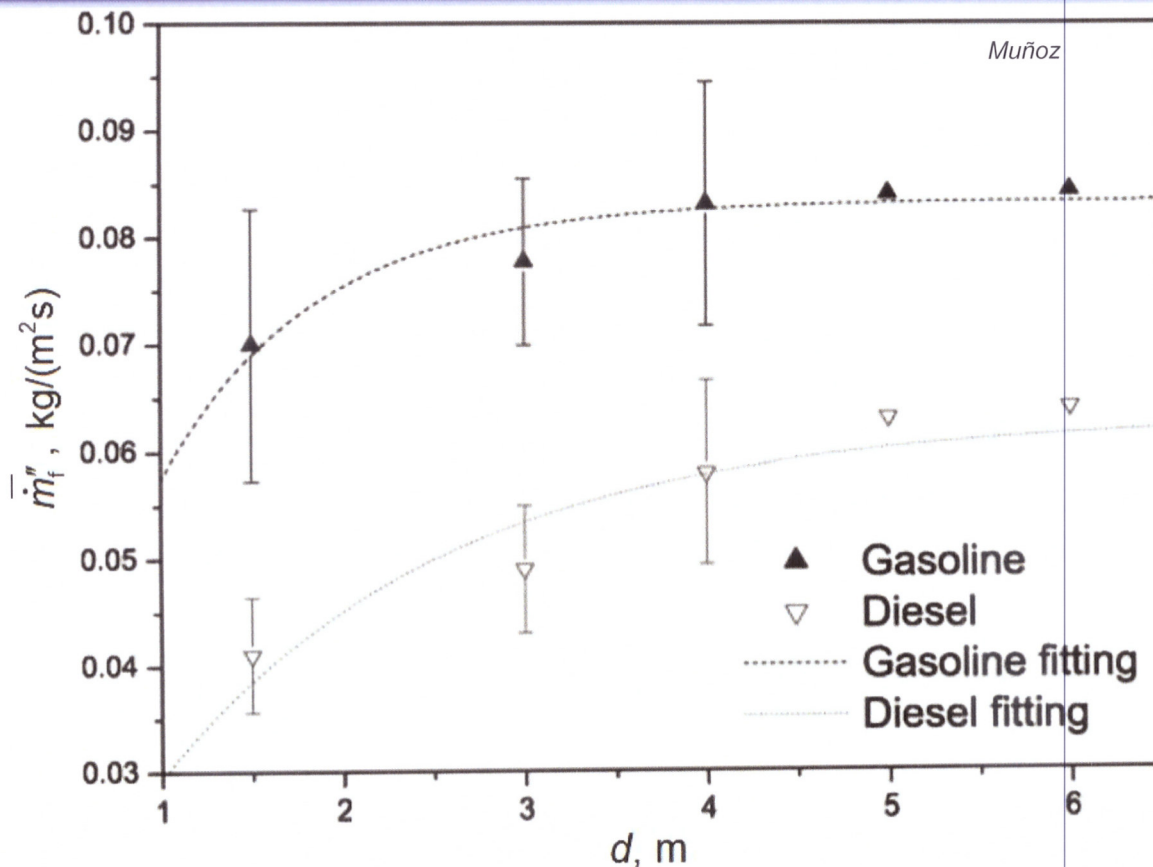
Physikalische Begründung für v_a und \dot{m}_f''

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate



Abbrandgeschwindigkeiten v_a als $f(d)$ für technisch wichtige Brennstoffe

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate



Massenabbrandraten \bar{m}_f'' in Abhängigkeit vom Durchmesser d , für $d > 1\text{m}$

Nach *Burgess*, *Zabetakis* und *Babrauskas* gilt:

$$\begin{aligned} \bar{m}''_f(d) &= \bar{m}''_{f,\max} \left(1 - e^{-k\beta d}\right), \\ \bar{v}_a(d) &= \bar{v}_{a,\max} \left(1 - e^{-k\beta d}\right) \end{aligned} \quad 0.004\text{m} < d < 30\text{m}$$

k [1/m]: Extinktionskoeffizient od. „Opazitäts“koeffizient nach *Hottel*
 β [-]: Korrekturfaktor der *mittleren* Strahllänge

$1 - e^{-k\beta d} = \varepsilon_{F,f}$ [-]: effektiver Emissionsgrad zwischen der grauen Flamme (F) und der Oberfläche des Brennstoffes (f); $\varepsilon_{F,f} \neq \varepsilon_F$
 [Hertzberg]

- insbes. für Benzin, Diesel, Kerosin, Transformatorenöl, Petroleum
- für windstille Bedingungen

Abhängigkeit vom Durchmesser d

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate

Maß für die *Verbrennungsgeschwindigkeit* bei *unfallbedingten* Lachen-, Pool- und Tankfeuern:

$$\bar{m}''_{f,\max} \equiv \rho_f \bar{v}_{a,\max} \approx 1.27 \cdot 10^{-6} \rho_f (-\Delta h_{c,i} / \Delta h_{v,i}), \quad \bar{m}''_{f,\max} \neq f(d)$$

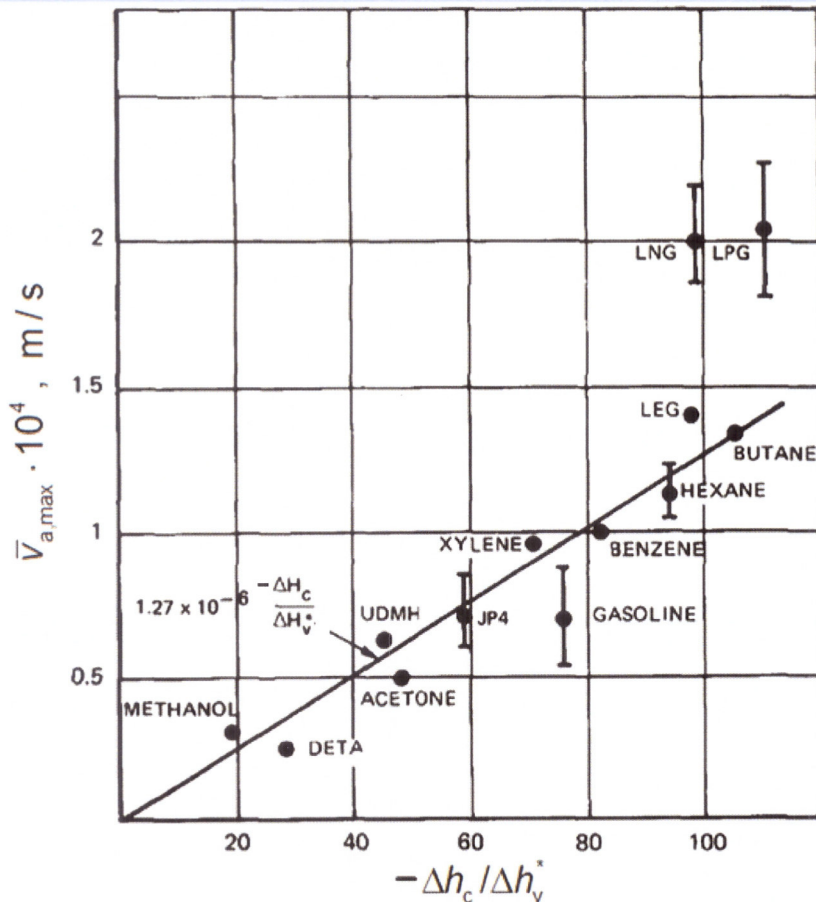
$$\begin{aligned} \bar{m}''_{f,\max}(d' \approx 5\text{m}) &\approx 0.055 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \text{ für Benzin} \\ &\approx 0.039 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \text{ für Diesel} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\bar{m}''_{f,\max}} \right\} \text{ nach } \textit{Hottel}; \textit{Babrauskas}$$

$$\bar{m}''_{f,\max}(d' \approx 9\text{m}) \approx 0.062 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \text{ für Diesel [Muñoz]}$$

$$\bar{m}''_{f,\max}(d' \approx 20\text{m}) \approx 0.049 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \text{ für Rohöl [Koseki]}$$

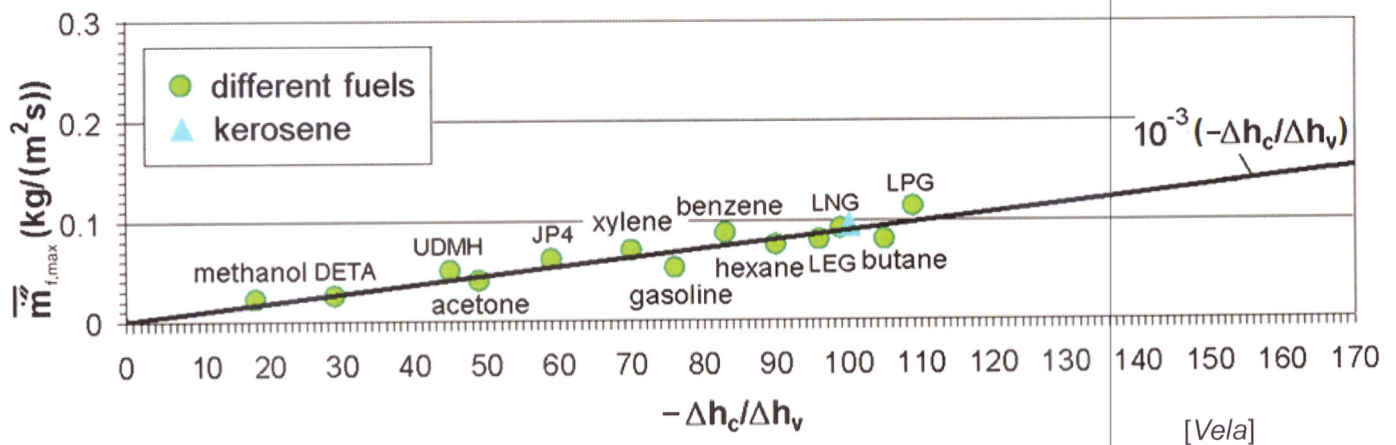
$$\bar{m}''_f(d) = \bar{m}''_{f,\max} \left(1 - e^{-k\beta d}\right): \text{ je kleiner } k\beta, \text{ umso größer } d'.$$

Maximale Massenabbrandraten $\bar{m}''_{f,\max}$ und maximale Abbrandgeschwindigkeiten $\bar{v}_{a,\max}$



[Mudan]

$\bar{v}_{a,max}$ in Abhängigkeit von thermochemischen Eigenschaften



[Vela]

$\bar{m}''_{f,max}$ in Abhängigkeit von thermochemischen Eigenschaften

$r \approx 1 \text{ m}$

$\bar{m}''_{f,max} = 1.27 \cdot 10^{-6} \rho_f (-\Delta h_{c,i}) / \Delta h_{v,i}$: insbes. für Methanol, $H_{2,l}$, LNG, Butan, Hexan, Benzol, Xylol

$$\bar{m}''_f = \frac{10^{-3}(-\Delta h_{c,i})}{\Delta h_{v,i} + c_{p,f}(T_{f,bp} - T_{f,a})}$$

für viele Einzel-Brennstoffe gültig: insbes. Butan, Hexan, Benzin, JP-4, Methanol, Aceton, Benzol, Xylol, LNG, LPG, LEG; beste Abschätzung, wenn $\bar{m}''_{f,max}$ nicht bekannt ist

Abhängigkeit vom Brennstoff

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate

Für Flüssigkeitsgemische (basierend auf Gemischen von U_{sym} . Di-Methyl-Hydrazon [UDMH] und Di-Ethyl Tri Amin [DETA]):

$$\bar{m}''_{f,max} = \rho_f \bar{v}_{a,max} \approx 1.27 \cdot 10^{-6} \frac{\rho_f \sum_i \tilde{y}_i (-\Delta h_{c,i})}{\sum_i \tilde{y}_i \Delta h_{v,i} + \sum_i \tilde{x}_i \int_{T_{f,a}}^{T_{f,b}} \bar{c}_{p,i}(T) dT}$$

\tilde{y}_i, \tilde{x}_i : Stoffmengenanteil in Dampf- und Flüssigkeitsphase

oder näherungsweise mit

$-\Delta h_{c,i} \approx \text{const.}, \Delta h_{v,i} \approx \text{const.},$ jeweils für alle $i, \tilde{y}_i \approx \tilde{x}_i$: $\bar{m}''_{f,max} \approx \sum_i \tilde{y}_i \bar{m}''_i$

- gute Näherung für insbes. alle flüssigen KW, ausgenommen sind verflüssigte Gase (z.B. LNG, LPG, LEG), deren $\bar{m}''_{f,max}$ meist etwa um den Faktor 2 größer ist.

Beziehungen bei Brennstoffgemischen

Nach *Babrauskas* (1983) gilt:

$$\frac{\bar{m}_{f,w}(u_w)}{\bar{m}_f''} = 1 + \frac{a_2 u_w}{d}, \text{ für } u_w \leq 5 \text{ m/s}$$

$a_2 = 0.155$; nicht für Alkohole

Abhängigkeit von der *Windgeschwindigkeit* u_w

Quellterme: Abbrandgeschwindigkeit, Massenabbrandrate

$$\bar{m}_{LPG}''(\text{H}_2\text{O}) \approx 2 \bar{m}_{LPG}''(\text{Land})$$

bei *Wärmeeintrag* ($\dot{Q}_{in} \neq 0$) vom Substrat auf Brennstoff

$$\bar{m}_{LNG}''(\text{H}_2\text{O}) \approx 3 \bar{m}_{LNG}''(\text{Land})$$

für Rohöl, Benzin gilt: $\bar{m}_f''(\text{H}_2\text{O}) \approx \bar{m}_f''(\text{Land})$

Petty-Korrelation:

$$\bar{m}_f''(\text{H}_2\text{O}) = \frac{\bar{Q}_{ba,rad} / A}{\Delta h_v \ln(B_{conv} + 1)} + \frac{\alpha}{c_{p,f}} \ln(B_{conv} + 1)$$

$B_{conv} \approx 3000 / \Delta h_v$: konvektive *Spaldingsche* Massentransferzahl

$10 < B_{conv} < 15$ bzw. $\ln(B_{conv} + 1) \approx 2.6$

Nicht adiabatische Lachen- und Poolfeuer

Brennstoff	$\dot{m}''_{f,max}$ [kg/(m ² s)]	$(-\Delta h_{c,i})$ [kJ/kg]	$\dot{q}''_{f,max}$ [kW/m ²]	Δh_v [kJ/kg]	$\bar{v}_{a,max}$ [10 ⁻⁴ m/s]	$k\beta$ [m ⁻¹]	k [m ⁻¹]
Rohöl	0.022 0.045	42600	9372 1917		0.26 0.53	2.8	
Diesel	0.035 0.062	39700	1390 2461		0.36	1.7	
Benzin	0.055 0.083	43700	2404 3627	330	0.74 1.106	2.1	2
JP-4	0.051	43500	2219		0.67	3.6	
JP-5	0.054	43000	2322	700	0.67	1.6	0.5
Kerosin	0.039	43200	1684	670	0.48	3.5	2.6
LNG / Methan	0.078	50020	3902	510	1.90	1.1	0.5
PG/Propan	0.099	46010	4555	430	1.69	1.4	0.4
LNG ($d = 15$ m) (auf Wasser)	0.164 0.451	50020	8203 22559	510 619	4 11		

Messdaten für technisch wichtige Brennstoffe

Einflussgrößen: Lachengröße bzw. Lachendurchmesser bei Brand

Bei Zündung einer sich störungsbedingt ausbreitenden Flüssigkeit:

Lachenfeuer mit $d = f(\text{Freisetzungsszenarium}, \dot{V}_{rf} \text{ bzw. } V_{rf}, v_a)$ rf: released fuel

Kategorien

- (I) *Kontinuierliche* Freisetzung: endliche Rate $\dot{V}_{rf} \equiv V_{rf} / t_s$, über längere Zeit t_s
- (II) *Momentane* Freisetzung: *gesamtes* V_{rf} , in sehr kurzer Zeit t_s
bzw. für $\dot{V}_{rf} \rightarrow \infty$
- (III) *Quasi kontinuierliche* Freisetzung: bestimmtes V_{rf} über eine bestimmte Zeitdauer t_s ; endliche Rate $\dot{V}_{rf}(t)$, d.h. $\dot{V}_{rf} \not\rightarrow \infty$

Kategorie III: am häufigsten, jedoch *bisher keine* analytischen Beziehungen.

Klassifizierung von Flüssigkeits-Freisetzungen (Verschüttungen)

Für stationäre, brennende Lache gelten die Beziehungen:

$$d_e = 2 \left(\frac{\dot{V}_{rf}}{\pi \bar{v}_a} \right)^{1/2}$$

$$t_e = \frac{0.564 d_e}{\sqrt[3]{g_{eff} \bar{v}_a d_e}}$$

Annahmen:

- $\bar{v}_a = \dot{V}_{rf} / \frac{\pi d_e^2}{4}$ (stationär), conti-Freisetzung
- $\dot{Q}_{ba,tot}$ durch Flamme dominiert ($\dot{Q}_{in} = 0$)
- $\bar{v}_a = \text{const.}$ (alle KWs mit $T_s > T_a$)
- auch für nicht adiabate ($\dot{Q}_{in} \neq 0$) Lachen- u. Poolfeuer, wenn $\alpha = \text{const.}$ (Substrat \rightarrow Brennstoff) z.B. LNG, LPG auf Wasser, dann \bar{v}_a jedoch höher
- keine Perkolation durch Boden
- keine Löslichkeit in Wasser
- ebene und glatte Brennstoffoberfläche

- t_e : (Ausbreitungs-)Zeit bis d_e erreicht ist [s]
- d_e : stationärer (Gleichgewichts-) Durchmesser der Lache bzw. des Pools [m]
- \dot{V}_{rf} : Freisetzungs- bzw. Verschüttungsrate der Flüssigkeit f [m³/s]
- v_a : Abbrandgeschwindigkeit [m/s]
- $g_{eff} = g(1 - \rho_f / \rho_{H_2O})$: auf Wasser
- $g_{eff} = g$: auf Land

Kontinuierliche Flüssigkeits-Freisetzung

Einflussgrößen: Lachengröße bzw. Lachendurchmesser bei Brand

Momentane Freisetzung erfolgt bis zur Gleichheit von gravitativer Ausbreitungskraft (spreading) und Trägheitskraft bei Berücksichtigung der Brennstoffabnahme infolge Verbrennung und führt zu einer instationären Lache $d(t)$:

$$\left(\frac{d(t)}{d_{max}} \right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \left[1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^2 \right]$$

:Raj, Kalekar
in Mudan (1984, 1995)

$$t_{max} = 0.6743 \left[V_{rf} / (g_{eff} \bar{v}_a^2) \right]^{1/4} ; \quad d_{max} = 2 \left[V_{rf}^3 g_{eff} / \bar{v}_a^2 \right]^{1/8}$$

d_{max} : maximaler Durchmesser, existiert nur für kurze Zeit (m)
Führt zur Überschätzung des Gefahrenpotentials

V_{rf} : insgesamt freigesetztes Flüssigkeitsvolumen (m³)

$r(t) = \frac{d(t)}{2}$: momentaner Ausbreitungsradius (m); t : Ausbreitungsdauer (s)

t_{max} : Ausbreitungszeit bis d_{max} erreicht ist (s)

Berechnungsbeispiel:
Tab. 25/56

und

$$\bar{d} = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} d(t) dt < d_{\max}$$

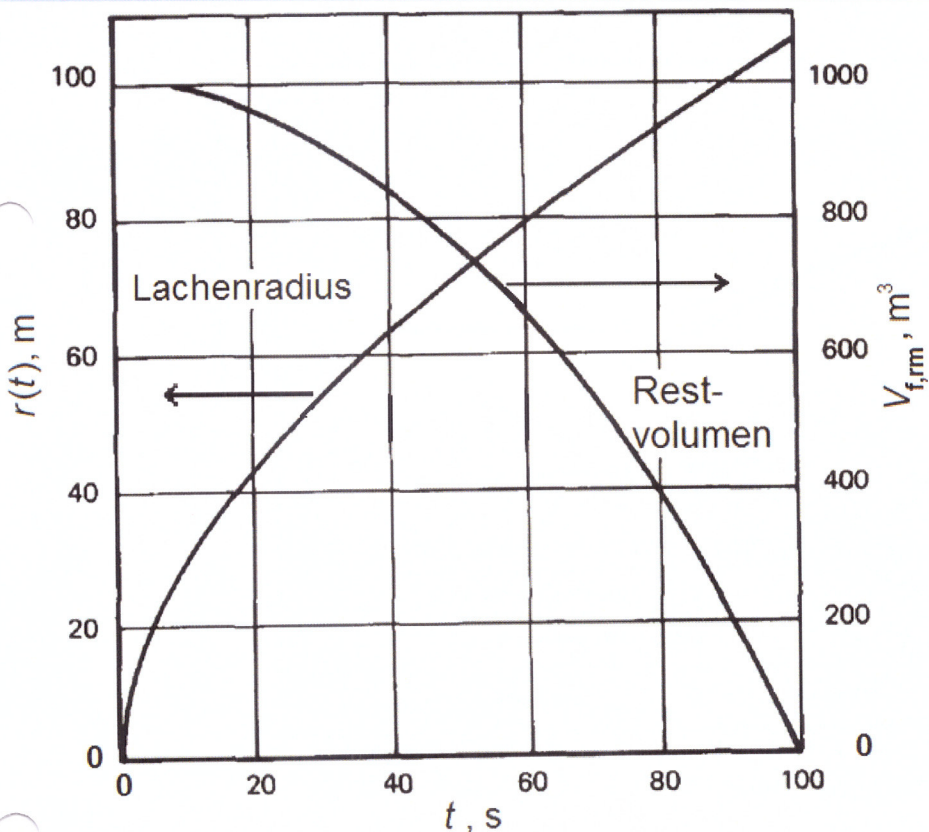
\bar{d} : zeitlich gemittelte Lachengröße bzw. gemittelter Lachendurchmesser (m)

führt zu einem realistischerem thermischen Gefahrenpotential als d_{\max} für Objekte außerhalb des Feuers;

führt jedoch zu einer *Unterschätzung* der *kurzzeitigen* Gefahren und einer *erhöhten* thermischen Strahlung in den späteren Stadien des Feuers für Objekte *innerhalb* des Feuers

Momentane Flüssigkeits-Freisetzung

Einflussgrößen: Lachengröße bzw. Lachendurchmesser bei Brand



Momentane Freisetzung ohne Begrenzung (Hindernisse) bis der gesamte Brennstoff verbraucht ist.

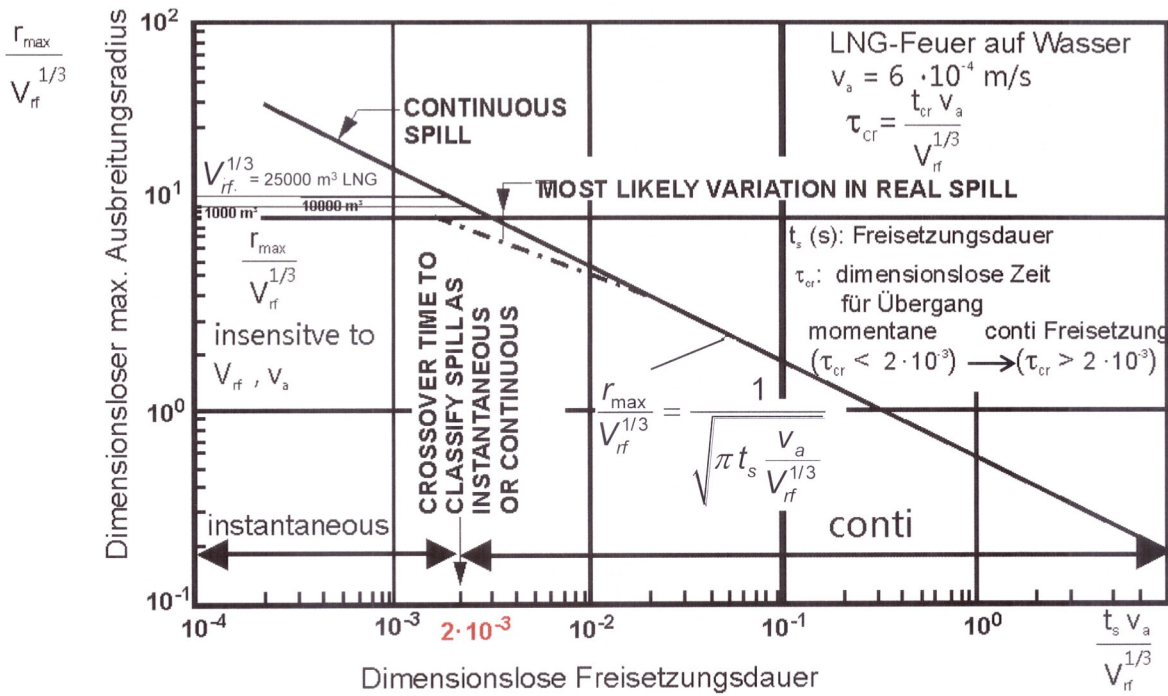
Bei Erreichen einer physikalischen *Begrenzung* ist $d_{\text{real}} < \bar{d}$ und Brennstoff sammelt sich z.B. in einem Pool

LNG Lachenfeuer auf Wasser, $V_{\text{ff}} = 10^3 \text{ m}^3$, $\bar{v}_a = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

$V_{\text{f,rm}}$: Restvolumen an Brennstoff der Lache
rm: remaining

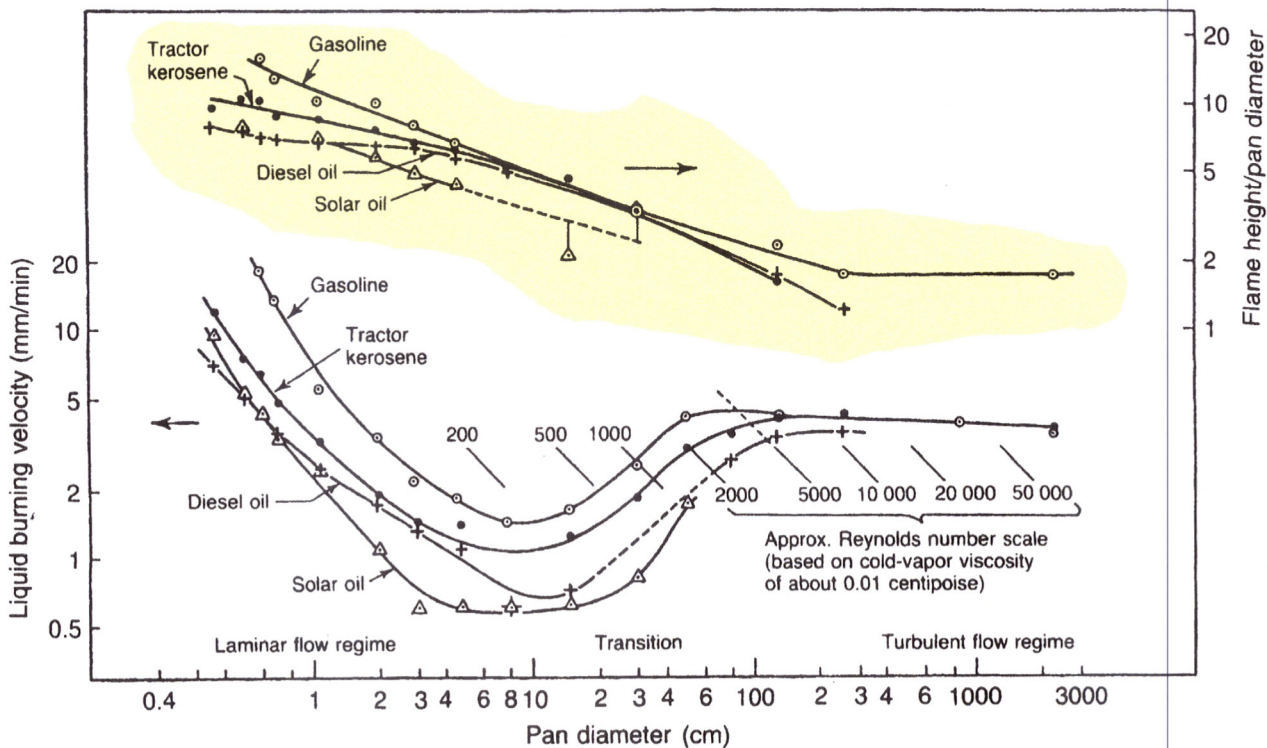
Ausbreitungsradius $r(t)$ und Restvolumen $V_{\text{f,rm}}(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t

Kriterium für eine vorliegende Freisetzungssituation (spill-situation): τ_{cr} , d.h. Umschlagszeit von momentan auf conti, ist schwierig zu bestimmen; Raj (1979)

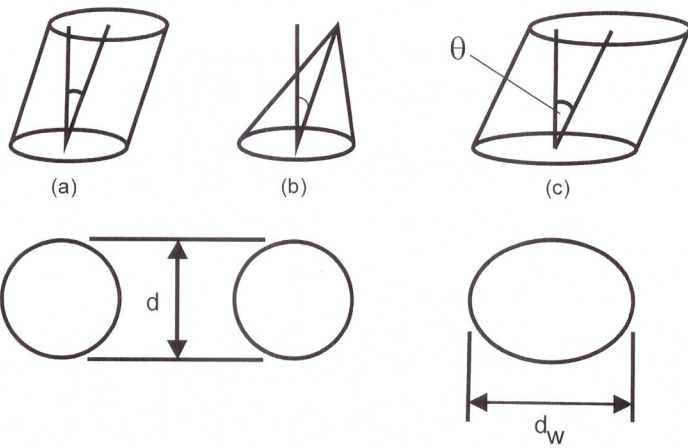


Max. Ausbreitungsradius in Abhängigkeit der Freisetzungsdauer

Einflussgrößen: Sichtbare Flammenlänge, Flammenneigung und Flammendrag



Abbrandgeschwindigkeiten v_a und Flammenlängen H/d als $f(d)$



- a)(geneigte) zylindrische Flamme,
- b)(geneigte)konische Flamme,
- c)(geneigte) zylindrische Flamme mit verlängertem Flammenbasisdurchmesser d_w

Die Definition der *sichtbaren* Flammenlänge ist insbesondere bei *rußenden* und instationären (Lachen-)Feuern nicht einfach. Zur Ermittlung der Flammenlänge *nicht* rußender Flammen kann z.B. das *Intermittenz-Kriterium* [Zukoski] herangezogen werden.

Definitionen zur Geometrie von Feuern (bei Windeinfluss)

$$\bar{H} / d = a Fr_f^b \bar{u}_w^{*c} \quad \text{und} \quad (H/d)_{\max} = a Fr_f^b \bar{u}_w^{*c}$$

für a,b,c : s. Abb.30/56 – 31/56

Skalierte Windgeschwindigkeit: $\bar{u}_w^* = \bar{u}_w / \bar{u}_c$ oder

$$\bar{u}_w^*(10) \equiv \bar{u}_w(10 \text{ m}) / \bar{u}_c$$

Charakteristische
Windgeschwindigkeit:

$$\bar{u}_c = \left(g \bar{m}_f'' d / \rho_v \right)^{1/3} \approx \left(g \bar{m}_f'' d / \rho_a \right)^{1/3}$$

Brennstoff-Froude-Zahl:

$$Fr_f \equiv \frac{\bar{m}_f''}{\rho_a \sqrt{gd}}$$

$$0,003 < Fr_f < 0,05$$

Flammenlängen \bar{H} / d und $(H/d)_{\max}$

Einflussgrößen: Sichtbare Flammenlänge, Flammenneigung und Flammendrag

Name der Korrelation	a	b	c	Bemerkungen
<i>Thomas 1</i>	42	0.61	0	gemessen an Holzgitterfeuern; \bar{H}/d kein Windeinfluss
<i>Thomas 2</i>	55	0.67	-0.21	gemessen an Holzgitterfeuern; $(H/d)_{\max}$; mit Windeinfluss
<i>Moorhouse 1</i>	6.2	0.254	-0.044	gemessen an großen zylindrischen LNG- Poolfeuern; $(H/d)_{\max}$; $\bar{u}_w^* = \bar{u}_w^*(10)$
<i>Moorhouse 2</i>	4.7	0.21	-0.114	gemessen an großen konischen LNG- Poolfeuern; $(H/d)_{\max}$; $\bar{u}_w^* = \bar{u}_w^*(10)$
AGA	1.0	-0.19	0.06	gemessen an LNG-Poolfeuern
<i>Mangialavori</i> und <i>Rubino</i>	31.6	0.58	0	gemessen an Heptan-, Hexan- und Isobuten-Poolfeuer; kein Windeinfluss $(H/d)_{\max}$; $1 \text{ m} < d < 6 \text{ m}$

Empirische Korrelationen für \bar{H}/d und $(H/d)_{\max}$

Einflussgrößen: Sichtbare Flammenlänge, Flammenneigung und Flammendrag

Name der Korrelation	a	b	c	Bemerkungen
<i>Pritchard</i> und <i>Binding</i>	10.615	0.305	-0.03	gemessen an KW-Poolfeuern, insbes. LNG; $(H/d)_{\max}$; $6 \text{ m} < d < 22 \text{ m}$
<i>Muñoz</i>	8.44	0.298	-0.126	gemessen an Benzin- und Diesel- Poolfeuern; $(H/d)_{\max}$; $d \text{ [m]} = 1.5, 3, 4, 5 \text{ und } 6$
<i>Muñoz</i>	7.74	0.375	-0.096	gemessen an Benzin- und Diesel- Poolfeuern; \bar{H}/d ; $d \text{ [m]} = 1.5, 3, 4, 5 \text{ und } 6$
<i>Muñoz</i>	11.76	0.375	-0.096	gemessen an Benzin- und Diesel- Poolfeuern; $(H/d)_{\max}$ und $(H/d)_{\max} = 1.52 \bar{H}/d$

Empirische Korrelationen für \bar{H}/d und $(H/d)_{\max}$

Im Rahmen von OSRAMO II gilt:

$$\bar{H}_{cl}^{II} / d \approx 1.39 \cdot 10^{-3} \bar{f}_{rad,cl}^{II} (d) \bar{m}_{f,max}'' (-\Delta h_c):$$

relative Höhe der klaren Verbrennungszone (*clear flame zone*);
ist für große Feuer dominant bezüglich thermischer Strahlung

$$\bar{f}_{rad,cl}^{II} (d) \equiv \bar{f}_{rad,cl}^{II} (d) \approx \frac{(1 + 4 \bar{H} / d) \overline{SEP}_{cl}^{ma}}{3.24 \cdot 10^3 T_{f,b} \sqrt{d}} \quad : \quad \text{Strahlungsanteil}$$

$$\overline{SEP}_{cl}^{ma} \equiv \overline{SEP}_{cl}^{II} = 180 \text{ kW / m}^2$$

Für ein *Benzin*-Poolfeuer resultiert: $\bar{H}_{cl}^{II} / d \approx 1.0$ und $\bar{f}_{rad,cl}^{II} = 0.2$

Relative Länge \bar{H}_{cl}^{II} / d der heißen, klaren Verbrennungszone

Zur Abschätzung von zeitlich gemittelten Flammenneigungswinkeln $\bar{\theta}$, existieren die folgenden *zwei* Typen *empirischer* Korrelationen:

$$\cos \bar{\theta} = a_1 (\bar{u}_w^*)^{b_1} \quad , \quad \text{für } \bar{u}_w^* \geq 1$$

$$\cos \bar{\theta} = 1 \quad (\text{vertikale Flamme}) \quad , \quad \text{für } \bar{u}_w^* < 1$$

sowie
$$\frac{\tan \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta}} = c_1 Fr_w^{d_1} Re_w^{e_1}$$

für a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 : s. Abb. 34/56

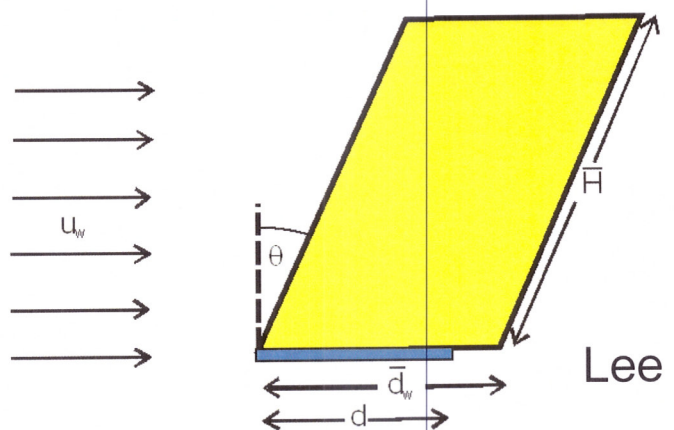
(Wind-)Reynolds-Zahl: $Re_w \equiv \frac{u_w d}{\nu_a}$ (Wind-)Froude-Zahl: $Fr_w \equiv \frac{u_w}{\sqrt{gd}}$

Flammenneigungswinkel bei Windeinfluss

Name der Korrelation	a ₁	b ₁	c ₁	d ₁	e ₁	Bemerkungen
AGA	1	-0.5				gemessen an LNG Poolfeuern
Thomas	0.7	-0.49				gemessen an Holzgitterfeuern
Moorhouse	0.86	-0.25				gemessen an großen zylindrischen LNG-Poolfeuern;
Muñoz	0.96	-0.26				gemessen an Benzin- und Diesel-Poolfeuern
Johnson			0.7	0.428	0.109	
Pritchard und Binding			0.666	0.333	0.177	
Rew und Hulbert			3.13	0.431	0	wird für kleine Fr _w überschätzt, da für Fr _w → 0 bzw. u _w → 0 die unphysikalische Bedingung (dsinθ / dFr _w) → ∞ vorliegt
Moorhouse	0.05		1.9	0.339	0.05	gemessen an zylindrischen LNG-Poolfeuern

Empirische Korrelationen für Θ

Unter Windeinfluss nähert sich die Flammenoberfläche den leewärts benachbarten Objekten ($\bar{d}_w > d$) unter Zunahme des übertragenen Wärmestroms.



$$\frac{\bar{d}_w}{d} = 1.5 Fr_w^{0.069}, \quad \bar{d}_w > d$$

Bei größeren Windgeschwindigkeiten kann es auch zum *Aufprallen* der Flamme auf z. B. einen Nachbartank kommen.

Flammendrag infolge Windeinfluss

Für Feuer-Plumbezonen im Falle von Einzelfeuern bei normalen atmosphärischen Bedingungen und typischen Brennstoffen gelten die folgenden *Entrainment*-Massenströme $\dot{m}_{ent}(x)$ [kg/s]:

für $x > \bar{H}$

$$\bar{m}_{ent}(x) = 0.071 \bar{Q}_{conv}^{1/3} (x - x_0)^{5/3} \left[1 + 0.0027 \bar{Q}_{conv}^{2/3} (x - x_0)^{-5/3} \right]$$

mit $0.16 \text{ m} \leq |x_0| \leq 2.4 \text{ m}$

x_0 : Höhe des virtuellen Ursprunges

für $x = \bar{H}$

$$\bar{m}_{ent}(x = \bar{H}) = 0.0056 \bar{Q}_{conv}$$

näherungsweise: $\bar{Q}_{conv} / \dot{Q}_c \lesssim 0.7$

für $x < \bar{H}$

$$\bar{m}_{ent}(x) = 0.0056 \bar{Q}_{conv} x / \bar{H}$$

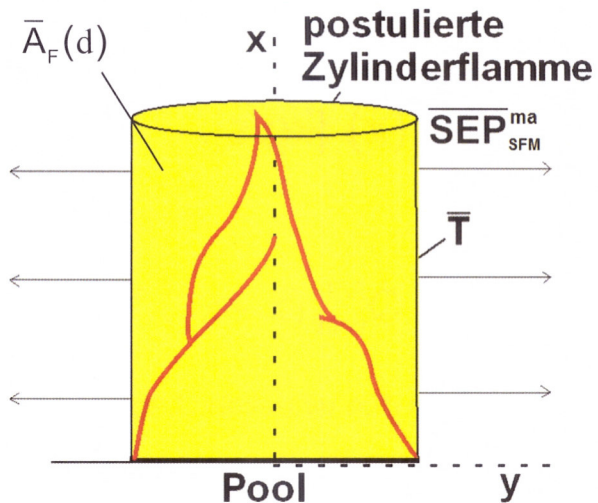
[Heskestad]

Entrainment-Formeln in Abhängigkeit der axialen Koordinate x

Einflussgrößen: Spezifische Ausstrahlung (SEP)

<i>Point Source</i> thermal radiation Model (PSM)	<i>API 521</i> (1969)
<i>Surface emitter</i> radiation models	
Solid Flame Radiation Model (SFM)	<i>Seeger</i> (1971)
Modified Solid Flame Radiation Model (MSFM)	<i>Yellow Book</i> (1997)
Luminous Spots - Soot Zone model	<i>Mudan</i> (84,95) <i>Beyler</i> (2002)
OSRAMO II, OSRAMO III (Organized Structures Radiation Models)	<i>Schönbucher et al.</i> (since 1985)
Radiation Model (<i>SEP(x)</i>)	<i>Raj</i> (2007)
Radiation Model (<i>SEP(x)</i>)	<i>Fay</i> (2006)
Transient Modeling: CFD-Simulations (z.B. <i>SEP(x,y,t)</i> , <i>T(x,y,z,t)</i>)	<i>Schönbucher et al.</i> (since 2000)

SFM, konventionelles Zylinderflammen-Strahlungsmodell



$$\overline{SEP}_{SFM}^{ma} = \bar{\epsilon}_F \sigma (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4)$$

conventional

$$\bar{\epsilon}_F = 0.95 \text{ (gray flame)}$$

$$\bar{T} = 1173 \text{ K (900 } ^\circ\text{C)}$$

$$\overline{SEP}_{SFM}^{ma} = 100 \text{ kW/m}^2$$

$$\neq f(d, \text{fuel})$$

$$\overline{SEP} = (A_F(d), \text{Brennstoff}) \equiv \frac{\dot{Q}_{a,rad}}{\bar{A}_F}$$

$$\bar{A}_F(d) = \pi d \bar{H}(d) + \pi d^2 / 4$$

(experimentell) *falsifiziert*

Einflussgrößen: Spezifische Ausstrahlung (SEP)

Strahlungsmodell OSRAMO II

$$\overline{SEP}_{act}^{II}(d) = \bar{a}_{hs}(d) \overline{SEP}_{hs}^{ma}(d) + \bar{a}_{sp}(d) \overline{SEP}_{sp}(d)$$

$$\overline{SEP}_i(d) = (1 - \bar{\tau}_i(d)) \sigma (\bar{T}_i^4 - \bar{T}_a^4) + \bar{\tau}_i(d) (1 - \bar{\tau}_{re}(d)) \sigma (\bar{T}_{re}^4 - \bar{T}_a^4) \quad i = hs, sp$$

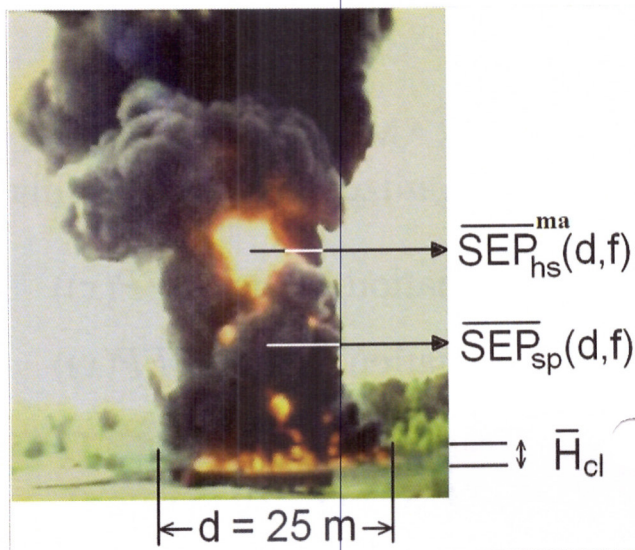
für $i = re, hs, sp$:

$$1 - \bar{\tau}_i(d) = \bar{\epsilon}_{eff,i}(d) = 1 - \exp(-\hat{a}_{eff,i}(d))$$

$$\bar{\epsilon}_{eff,i}(T) = \bar{a}_{eff,i}(T) b_i = 1.81 \cdot 10^3 \bar{f}_V b_i T_i \approx 1.12 \cdot 10^{-3} b_i \bar{T}_i$$

$$b_i \equiv \bar{l}_i(d) / d$$

$$\bar{a}_{hs}(d) = 1 - \bar{a}_{sp}(d) = 1 - \exp[-(d_o/d)^{a_3}]$$



Strahlungsmodell OSRAMO II

Eine multiple, nichtlineare Regression für den Brennstoff JP-4 ergab:

Temperaturen der organisierten Strukturen

modifizierte, effektive Absorptionskoeffizienten

$$\bar{T}_{re} = 1413 \text{ K}$$

$$\bar{\hat{\alpha}}_{eff, re} = 0.380 \text{ m}^{-1}$$

$$\bar{T}_{hs} = 1329 \text{ K}$$

$$\bar{\hat{\alpha}}_{eff, hs} = 0.404 \text{ m}^{-1}$$

$$\bar{T}_{sp} = 632 \text{ K}$$

$$\bar{\hat{\alpha}}_{eff, sp} = 1.035 \text{ m}^{-1}$$

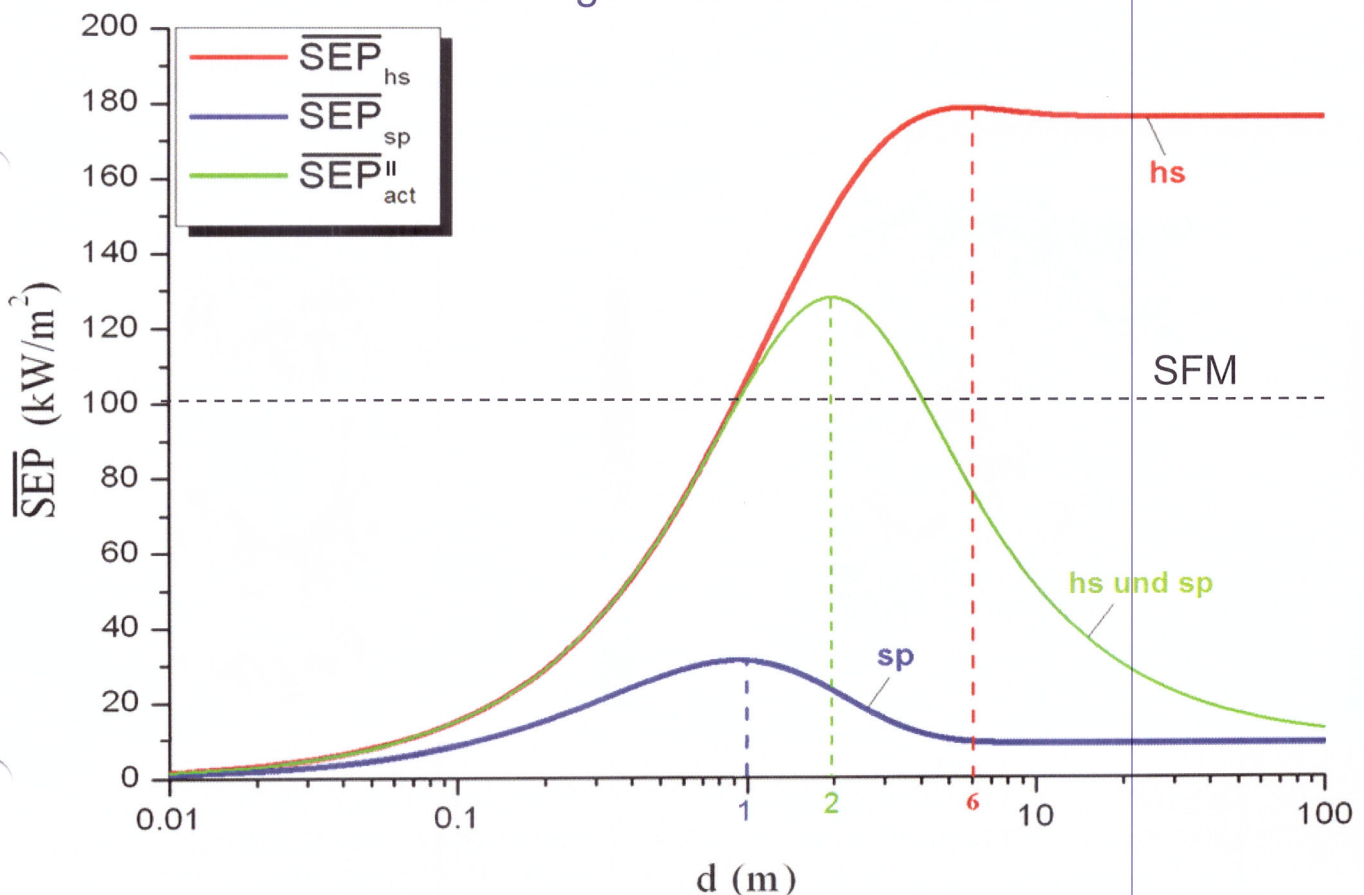
empirische Parameter

$$d_o = 3.260 \text{ m}$$

$$a_3 = 1.104$$

Einflussgrößen: Spezifische Ausstrahlung (SEP)

Strahlungsmodell OSRAMO II



Erhaltungs-Gleichungen

Masse
Impuls
Energie
Spezies

Solver

Coupled - CFX
Segregated/
Coupled - FLUENT

Verbrennungsmodelle

Mehrschritt-Chemie über
Assumed PDF-Ansätze mit laminaren flamelets
(112 Spezies, 800 Reaktionen) für JP-4
(20 Spezies, 42 Reaktionen) für Methan

Turbulenzmodelle

- LES Large-Eddy-Simulation - FLUENT mit dynamischen Smagorinsky-Lilly-Submodell
- Scale Adaptive Simulation (SAS) - CFX

Strahlungsmodelle

- Monte Carlo Methode - CFX
- Discrete Ordinates Methode - FLUENT
- Modellierung Absorptionskoeffizient

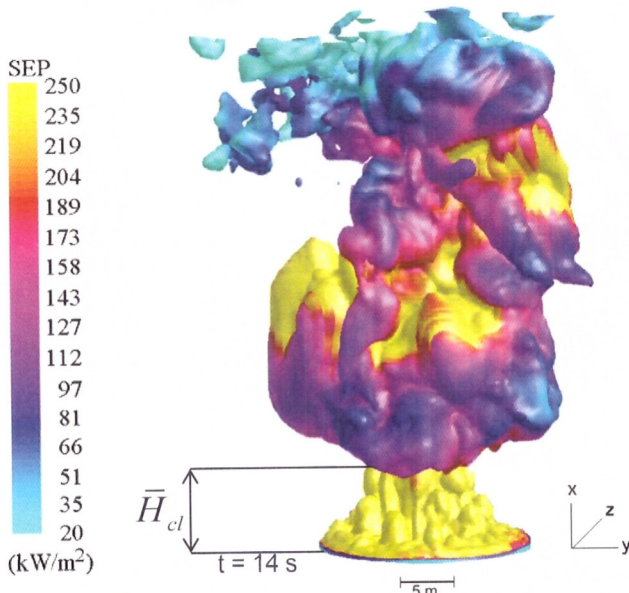
Rußmodelle

- Magnussen - CFX
- Lindstedt - CFX
- Tesner - FLUENT
- Moos-Brookes - FLUENT

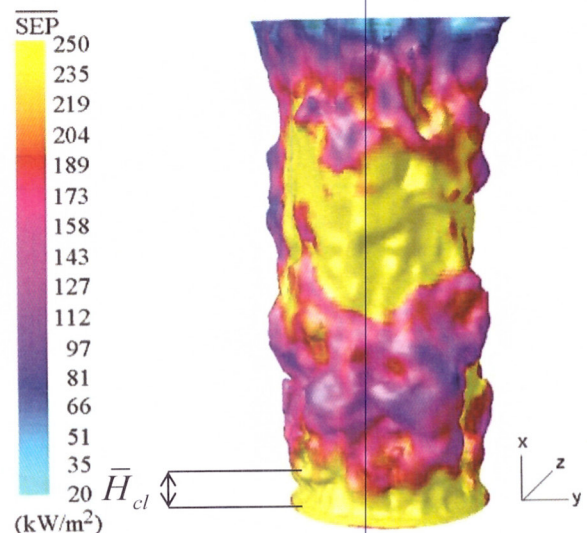
Einflussgrößen: Berechnung mit CFD-Simulation

CFD Simulation ermöglicht Vorhersage der folgenden transienten Größen:

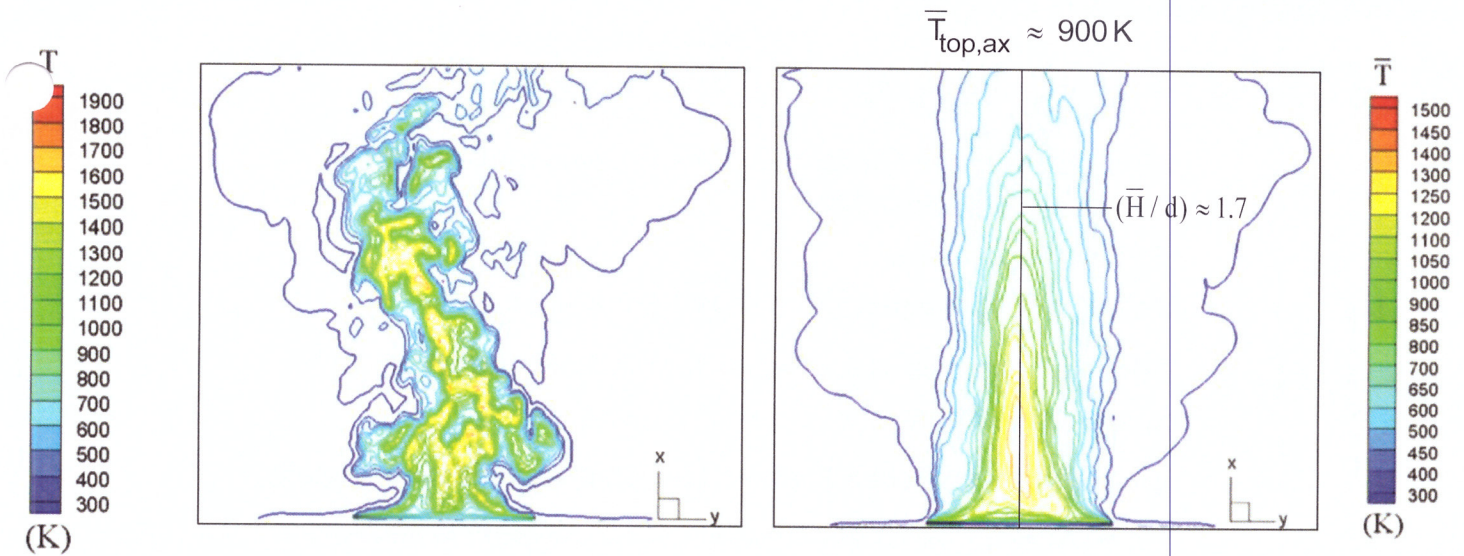
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Spezieskonzentrationen
- Emissionstemperaturen
- Spezifische Ausstrahlung (SEP)
- Bestrahlungsstärke (E)
jeweils ohne oder mit Windeinfluss



Momentanes SEP(x,y,t)-Feld auf einer Isofläche der Temperatur $T = 400 \text{ K}$ für ein JP-4 Poolfeuer ($d = 16 \text{ m}$)



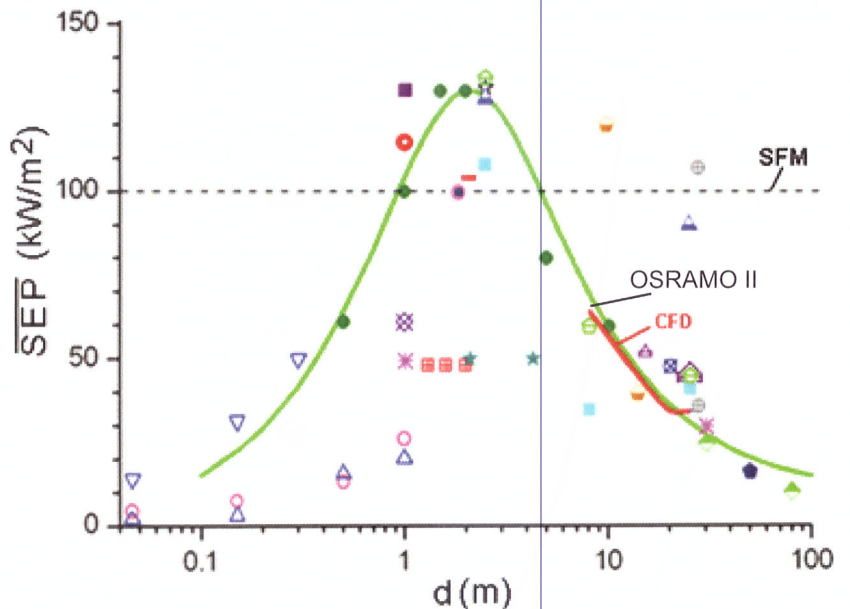
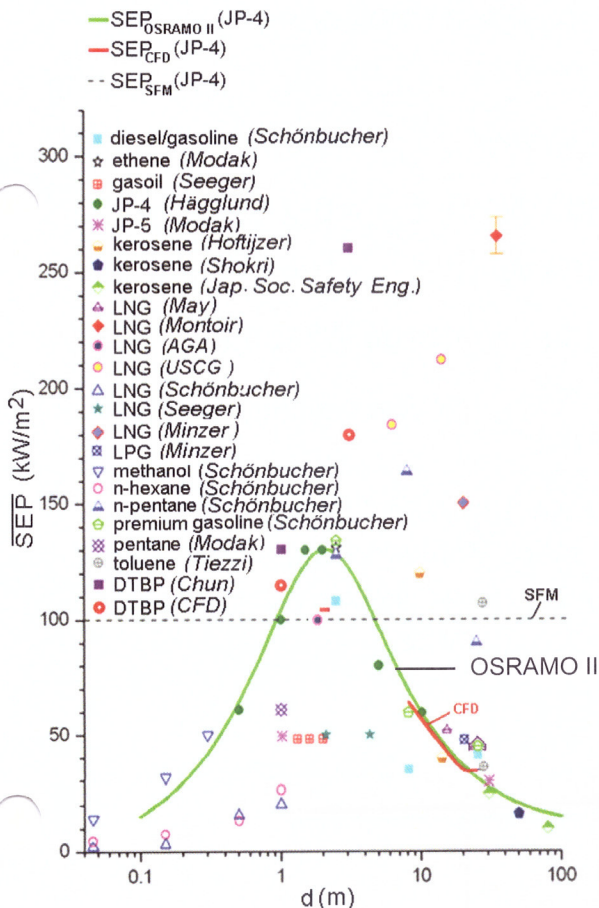
Zeitlich gemittelt $\overline{SEP}(x,y)$ -Feld auf einer Isofläche der Temperatur $\bar{T} = 400 \text{ K}$ für ein JP-4 Poolfeuer ($d = 16 \text{ m}$)



Momentane Isothermen $T(x,y,0,t) = \text{const.}$ für ein JP-4 Poolfeuer ($d = 16 \text{ m}$)

Zeitlich gemittelte Isothermen $\bar{T}(x,y,0) = \text{const.}$ für ein JP-4 Poolfeuer ($d = 16 \text{ m}$)

Einflussgrößen: Berechnung mit CFD-Simulation – Validierung



Validierung der CFD- und der OSRAMO II-Vorhersagen mit gemessenen SEP(d)-Werten für verschiedene Brennstoffe

Bestrahlungsstärken $\bar{E}(\Delta y/d)$

$$\bar{E}_{act,j}(\Delta y/d) = \tau_a \alpha_E \varphi_{EF}(\Delta y/d) \overline{SEP}_{act,j}(d)$$

τ_a [-] atmosphärischer Transmissionsgrad zwischen Flamme und benachbartem Objekt;

$$\tau_a = 1 - \alpha_{H_2O} - \alpha_{CO_2}$$

α_E [-] Absorptionsgrad des Empfängerflächenelements

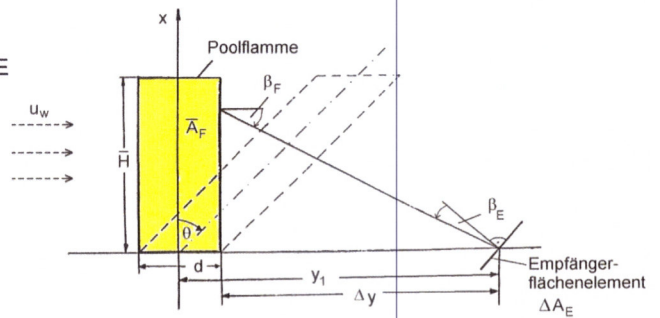
$\alpha_{H_2O}, \alpha_{CO_2}$ [-] Absorptionsgrade von Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid zwischen Flamme und Objekt

φ_{EF} [-] Einstrahlzahl zwischen Flamme und Empfängerflächenelement

j SFM, MSFM, Strahlungsmodelle nach *Mudan*, OSRAMO II, OSRAMO III

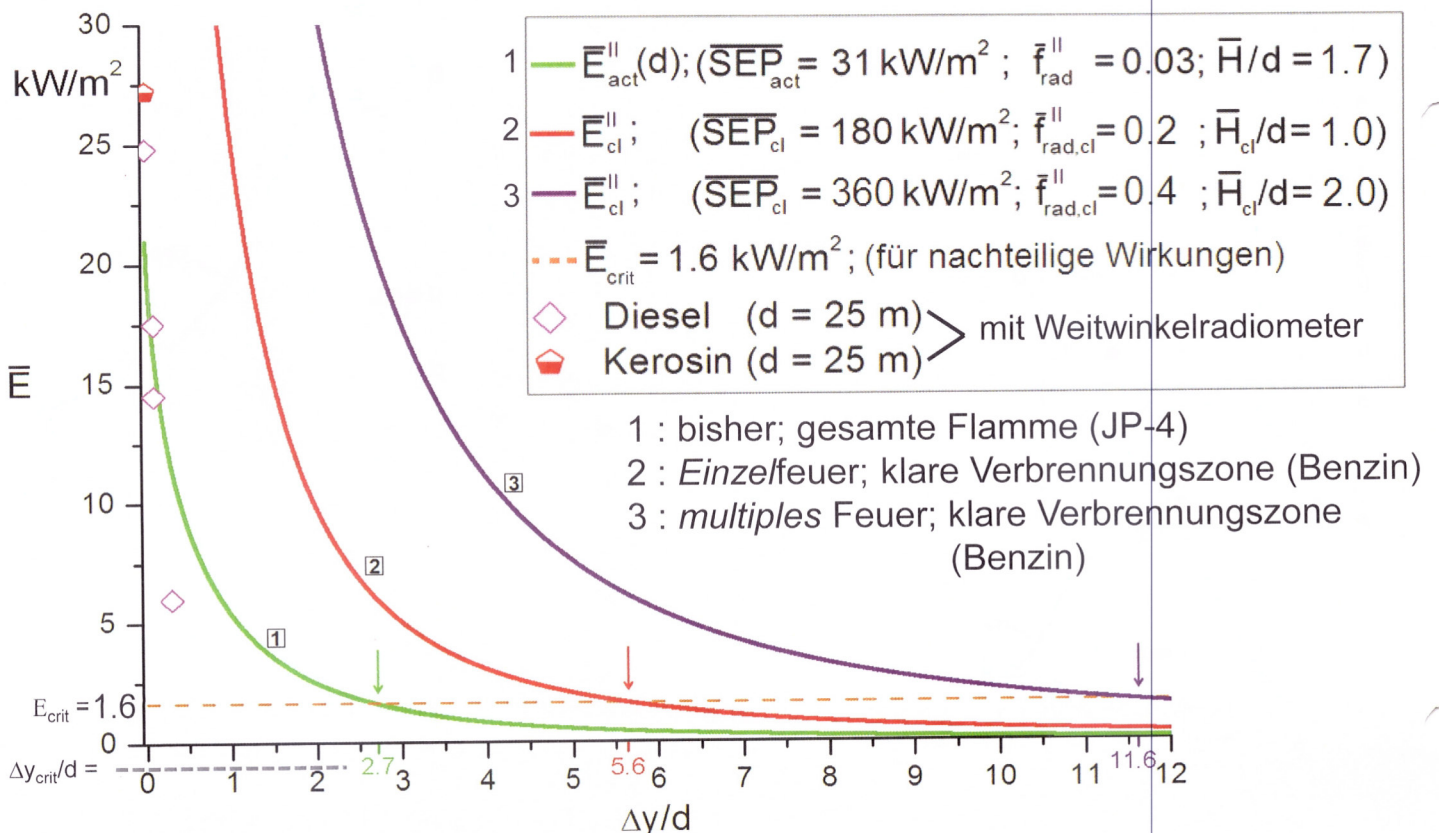
$\varphi_{E,F} = f(\bar{A}_F, \Delta y/d, \text{relative Orientierung } \beta_F, \beta_E)$

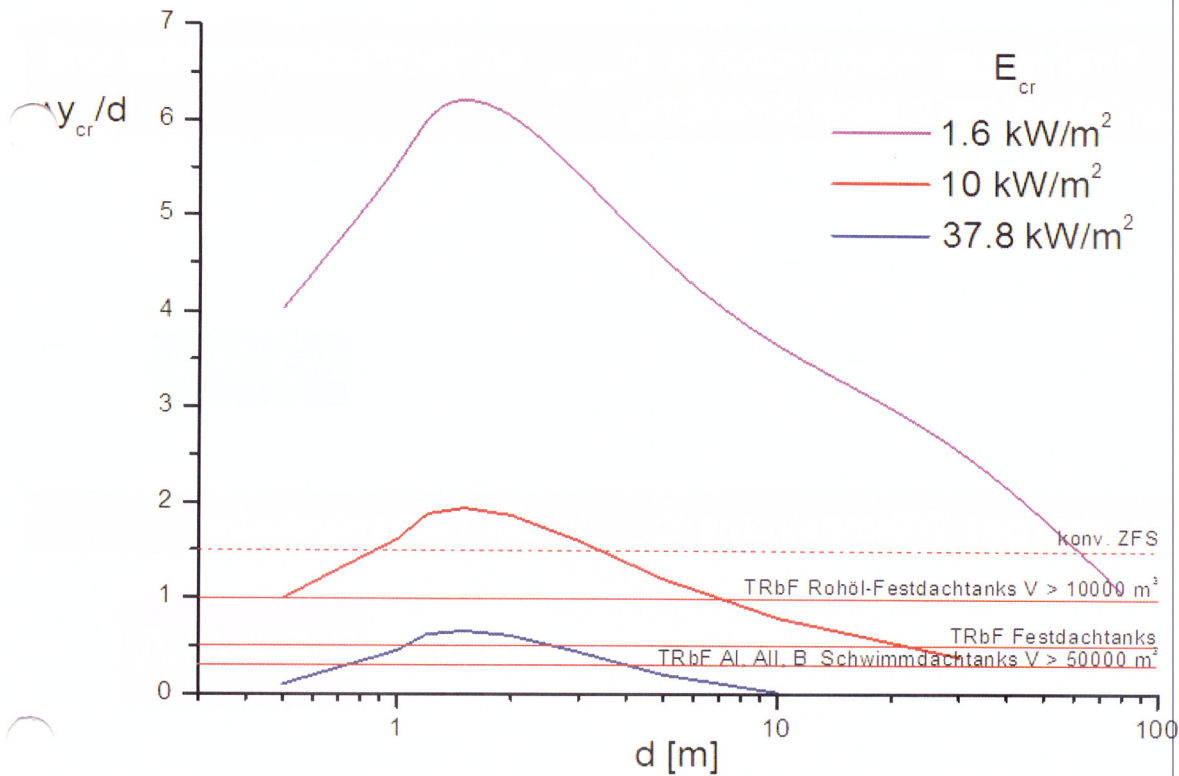
$$= \frac{1}{\pi \Delta \bar{A}_E} \int_{\bar{A}_F} \int_{\bar{A}_E} \frac{\cos \beta_F \cos \beta_E}{d^2 (\Delta y/d)^2} d \bar{A}_F d \bar{A}_E$$



Thermische Abstände von Bränden

Kritische thermische Abstände $\Delta y_{crit}/d$ bei Einzel- und multiplen Poolfeuern





Mit OSRAMO II berechnete kritische, thermische Abstände $\Delta y_{cr}/d$ für einen ungekühlten Nachbartank ($E_{cr} = 10 \text{ kW/m}^2$), für nachteilige Wirkungen ($E_{cr} = 1.6 \text{ kW/m}^2$) und für gekühlten Lagertank ($E_{cr} = 37.8 \text{ kW/m}^2$) sowie pauschale Abstände nach TRbF [Gawlowski]

Berechnungsbeispiel: Massen- und Wärmeströme in einem Benzin-Poolfeuer ($d = 20 \text{ m}$)

Benzin-Poolfeuer ($d = 20 \text{ m}$)

$$\dot{m}_f'' \approx 0.083 \text{ kg / (m}^2\text{s)} ; A_p \approx 314 \text{ m}^2 ;$$

stöchiometrische Verbrennung

$$\overline{\text{SEP}}^{\text{ma}} \approx 50 \text{ kW / m}^2 ; \bar{H} / d \approx 1.7 ;$$

senkrechte Zylinderflamme

$$-\Delta h_c \approx 43700 \text{ kJ / kg}$$

$$y_{\text{CO}_2} \approx 1800 \text{ mg / g} ; y_{\text{CO}} \approx 23 \text{ mg / g}$$

keine Absorption von $\dot{Q}_{ba,rad}$ zwischen Flamme und Brennstoffoberfläche ($\bar{\tau}_{fp} = 1$)

• Berechnung des Benzinmassenstromes \bar{m}_f

$$\bar{m}_f = \dot{m}_f'' A_p \approx (0.083 \cdot 314) \text{ kg / s} \approx 26 \text{ kg / s}$$

• Berechnung der totalen Wärmefreisetzungsrates (Brandleistung) \bar{Q}_c

$$\bar{Q}_c = \bar{q}'' A_p = (3627 \cdot 314) \text{ kW} \approx 1.1 \text{ GW}$$

Berechnung des konvektiven Wärmestroms \bar{Q}_{conv}

$$\bar{Q}_{conv} = 0.7 \bar{Q}_c \approx 0.7(1.139 \cdot 10^3) \text{ MW} \approx 0.80 \text{ GW}$$

- Berechnung des Strahlungs- Wärmestroms $\bar{Q}_{top,rad}$ an der Flammenspitze und des $\bar{Q}_{ba,rad}$ Wärmerückstroms infolge Strahlung

es gilt: $\bar{A}_{top} = \bar{e} A_p$

für $\bar{e} = 1$ folgt:

$$\bar{Q}_{top,rad} = \bar{Q}_{ba,rad} \approx A_p \overline{SEP}^{ma} \approx (314 \cdot 50) \text{ kW} \approx 15.7 \text{ MW}$$

- Berechnung gesamten des Wärmestroms \bar{Q}_{top} an der Flammenspitze

$$\bar{Q}_{top} = \bar{Q}_{conv} + \bar{Q}_{top,rad} \approx (800 + 15.7) \text{ MW} \approx 0.82 \text{ GW}$$

- Näherungsweise Berechnung der Flammenoberfläche \bar{A}_F

$$\begin{aligned} \bar{A}_F &\approx \pi d \bar{H} + \pi d^2 / 4 = \pi d^2 \bar{H} / d + \pi d^2 / 4 \\ &\approx ((\pi \cdot 400 \cdot 1.7 \text{ m}^2) + 314) \text{ m}^2 \approx 2450 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Berechnung des Strahlungswärmestroms \bar{Q}_{rad} von der Flammenoberfläche an die Umgebung

$$\bar{Q}_{a,rad} = \overline{SEP}^{ma} \bar{A}_F \approx 50 \cdot 2450 \text{ kW} \approx 123 \text{ MW}$$

- Bilanz, totale Wärmefreisetzungsrate \bar{Q}_c

$$\bar{Q}_c \approx \bar{Q}_{top} + \bar{Q}_{a,rad} + \bar{Q}_{ba,rad} \approx (820 + 123 + 15.7) \text{ MW} \approx 1 \text{ GW}$$

• Berechnung der *Produktmassenströme*

$$\bar{m}_{\text{CO}_2} = y_{\text{CO}_2} \bar{Q}_c / (-\Delta h_c) \approx 1.8 \cdot 1.1 \cdot 19^9 / 4.37 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s} \approx 45 \text{ kg/s}$$

$$\bar{m}_{\text{CO}} = y_{\text{CO}} \bar{Q}_c / (-\Delta h_c) \approx 2.3 \cdot 10^{-2} \cdot 1.1 \cdot 19^9 / 4.37 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s} \approx 0.6 \text{ kg/s}$$

Zusammenfassung

• Berechnung von Quelltermen

- Brennstoffmassenstrom $\bar{m}_f(d)$
- Massenstrom (Bildungsrate) $\bar{m}_p(y_p, \bar{Q}_c)$ der Brandprodukte
- Wärmeströme $\bar{Q}_{\text{top}}(\bar{Q}_{\text{conv}}, \overline{\text{SEP}})$

• Physikalische Vorgänge, Energiebilanz

• Ermittlung von Einflussgrößen zur Berechnung von Quelltermen

- Lachen-, Pooldurchmesser d bzw. Brandflächen A_L, A_P
- Sichtbare Flammenlänge (H/d), -neigung (θ), -drag (\bar{d}_w / d)
- Luftentrainment-Massenströme $\bar{m}_{\text{ent}}(\bar{Q}_{\text{conv}}); \bar{m}_{\text{pl}} = \bar{m}_{\text{ent}} + \bar{m}_p(y_p, \bar{Q}_c)$

• Thermische Abstände

• Bereitstellung handhabbarer Formeln

• Berechnungsbeispiel: Benzin-Poolfeuer (d = 20 m)

- Brennstoffmassenstrom
- Wärmeströme $\bar{Q}_c, \bar{Q}_{\text{conv}}, \bar{Q}_{\text{ba,rad}}, \bar{Q}_{\text{top}}, \bar{Q}_{\text{a,rad}}$
- Massenström (Bildungsraten) $\bar{m}_{\text{CO}_2}, \bar{m}_{\text{CO}}$

- American Petroleum Institute, Report API 521; Guide for pressure relief and depressuring systems, (1969)
- V. Babrauskas, Fire Technol. 19 (1983) 251
- Ch. Balluff, W. Brötz, D. Göck, N Schieß, A. Schönbacher, Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) 823
- W. Brötz, A. Schönbacher, Chem.-Ing.-Tech. 50 (1978) 573
- V. I. Blinov, G.N. Khudiakov, Academia Nauk, SSSR Doklady (1957) 1094
- D. S. Burgess, M.G. Zabetakis, Fire and Explosion Hazards Associated with LNG, US Bureau of Mines Report 6099 (1962)
- J. A. Fay, J. Hazard. Mater. B 136 (2006) 219
- R. Fiala, D. Göck, X. Zhang, A. Schönbacher, Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) 760; vollständiges Manuskript als MS 1966/91
- R. Fiala, D. Göck, X. Zhang, A. Schönbacher, TÜ 33 (1992) 137 (Teil 1)
- R. Fiala, D. Göck, X. Zhang, A. Schönbacher, TÜ 33 (1992) 219 (Teil 2)
- M. Gawlowski, M. Hailwood, I. Vela, A. Schönbacher, Chem. Eng. Technol. 32 (2009) 182

Literatur

- M. Hailwood, M. Gawlowski, B. Schalau, A. Schönbacher, Conclusions drawn from the Buncefield and Naples incidents regarding the utilisation of consequence models, Chem. Eng. Technol. 32 (2009) 207-231
- M. Hertzberg, Combust. Flame 21 (1973) 195
- G. Heskestad, in: P.J. DiNenno et al. (Eds.), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 2, chap. 1, 2-1 bis 2-31, 3. Aufl. (2002)
- H. C. Hottel, Fire Res. Abstr. Rev. 1 (1959) 41
- H. Koseki, Y. Iwata, Fire Technol. 36 (2000) 24
- S. Mannan, Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 1-3, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 3. Aufl. (2005)
- Methods for the calculation of physical effects ("Yellow Book"), CPR 14E (Part 2, chap. 6: Heat flux from fires, 6.1 - 6.130), 3. Aufl. (1997) Methods für calculation of the physical effects („Yellow Book“), Netherlands organisation for applied scientific research (TNO), (1980)
- K. S. Mudan, Prog. Energy Combust. Sci. 10 (1984) 59; K.S. Mudan, P.A. Croce, in: P.J. DiNenno et al. (Eds.), SFPE Handbook of Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3, chap. 11, 3-197 bis 3-240, 2. Aufl. (1995)

- M. Muñoz, J. Arnaldos, J. Casal, E. Planas, Combust. Flame 139 (2004) 263
- K.-D. Paul, A. Schönbacher, in: Praxis der Sicherheitstechnik 7, 175, DECHEMA, Frankfurt (2006)
- S. E. Petty, Fire Safety J. 5 (1983) 123
- P. K. Raj, J. Hazard. Mater. 140 (2007) 280
- P. K. Raj, Combust. Sci. Technol. 19 (1979) 251
- P. G. Seeger, Z. VFDB 20 (1971) 74
- R. Siegel, J.R. Howell: Thermal Radiation Heat Transfer, Mc Graw-Hill, N.Y. (1972)
- I. Vela, H. Chun, K.B. Mishra, M. Gawlowski, P. Sudhoff, M. Rudolph, K.-D. Wehrstedt, A. Schönbacher, Vorhersage der thermischen Strahlung großer Kohlenwasserstoff- und Peroxidfeuer mit CFD-Simulation, Forsch. Ingenieurwes. 73 (2009) 87-97
- E. E. Zukoski, B. M. Cetegen, T. Kubota, Visible structure of buoyant diffusion flames. Proc. Combust. Inst., 20 (1985) 361.
- Statuspapier, *Quelltermberechnung* bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie – Methodenübersicht und industrielle Anwendung, ProcessNet-Fachgemeinschaft "Anlagen- und Prozesssicherheit", Frankfurt am Main, 2012; e-book, ISBN: 978-3-89746-135-2
- Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, Editors: C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, The Hague, 3rd ed. (1997), ISBN: 9012084970

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

A	[m ²]	(Querschnitts-)Fläche; A kann z.B. A _p oder A _L sein
A _f	[--]	flüssiger Brennstoff, als Reaktionskomponente
A _F	[m ²]	Flammenoberfläche
A _p	[m ²]	Querschnittsfläche (Brennstoffoberfläche bzw. Brandfläche) des Pools oder Tanks
A _{top}	[m ²]	Flammenquerschnittsfläche an der Flammenspitze (Zylinderflamme)
A _L	[m ²]	Querschnittsfläche (Brennstoffoberfläche bzw. Brandfläche) der Lache
a _i	[-]	Flächenanteile der Strukturelementen i = hs, sp, re, fp
b _i	[-]	dimensionsloser Längen-Parameter der fluiddynamischen Strukturelemente i ; b _i = l _i / d
c _p	[J/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser eines Lachen-, Pool- oder Tankfeuers bzw. Lachen-, Pool- oder Tankdurchmesser
d _w	[m]	vergrößerter Pooldurchmesser in Windrichtung, infolge des Flammendrags
d'	[m]	Durchmesser bei dem $\bar{m}''_{f,max} = \text{const.}$ erreicht wird

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

E_{crit}	[kW/m ²]	kritische Bestrahlungsstärke, deren Überschreitung zu einer Gefährdung führt
g_{eff}	[m/s ²]	effektive Erdbeschleunigung
$(-\Delta h_{c,i})$	[kJ/kg]	spezifische Verbrennungsenthalpie (unterer Heizwert) der Komponente i
$\Delta h_{v,i}$	[kJ/kg]	spezifische Verdampfungsenthalpie bei $T_{f,bp}$ der Komponente i
H	[m]	momentane, sichtbare Flammenlänge
H_{max}	[m]	momentane, maximale sichtbare Flammenlänge
\bar{H}	[m]	zeitlich gemittelte Flammenlänge
\bar{H}_{cl}	[m]	zeitlich gemittelte Länge (Höhe) der klaren Verbrennungszone (clear burning zone), <i>nicht</i> mit schwarzem Ruß bedeckt
l_i	[m]	charakteristische Längen der fluiddynamischen Strukturelemente i
\dot{m}_{ent}	[kg/s]	Massenstrom infolge Luftentrainment
\dot{m}_f''	[kg/s m ²]	Massenabbrandrate des Brennstoffs
\dot{m}_{pl}	[kg/s]	gesamter Massenstrom im Bereich der Plumezone,
\dot{Q}	[kW]	Wärmestrom

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

\dot{q}_f''	[kW/m ²]	Wärmefreisetzungsrate pro Poolfläche; $\dot{q}_f'' = \dot{m}_{f,max}'' (-\Delta h_{c,i})$
\dot{Q}_c	[kW]	totale Wärmefreisetzungsrate (Brandleistung) des Feuers bzw. totaler Wärmestrom infolge der spezifischen Verbrennungsenthalpie $(-\Delta h_{c,i})$
\dot{Q}_{conv}	[kW]	<i>konvektiver</i> Wärmestrom (infolge Auftrieb und Luftentrainment) in der Plumezone
\dot{Q}_{sens}	[kW]	Wärmestrom für die Enthalpiezunahme der Flammengase von T_{bp} auf Flammentemperatur T
\dot{Q}_{top}	[kW]	gesamter Wärmestrom an der Flammenspitze infolge von Konvektion und thermischer Strahlung
$\dot{Q}_{\Delta T}$	[kW]	Wärmestrom zur Erwärmung der brennbaren Flüssigkeit; $\dot{Q}_{\Delta T} = \dot{m}_f'' A_P c_{p,f} (T_{f,pb} - T_{f,a})$
\dot{Q}_v	[kW]	Wärmestrom zur Verdampfung der brennbaren Flüssigkeit; $\dot{Q}_v = \dot{m}_f'' A_P \Delta h_v$
r_{pl}	[m]	Radius zum Rand der Plumezone
SEP	[kW/m ²]	spezifische Ausstrahlung (Surface Emissive Power) der Flamme
SEP _{act}	[kW/m ²]	<i>aktuelle</i> SEP mit Berücksichtigung einer teilweisen Bedeckung der Flamme mit schwarzem Ruß

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

SEP^{ma}	[kW/m ²]	<i>maximale</i> SEP einer klaren Flamme bzw. von leuchtenden spots, d.h. jeweils <i>ohne</i> Bedeckung schwarzem Ruß
SEP_{max}	[kW/m ²]	<i>maximale</i> SEP bei der Temperatur T_{cl} im Bereich der Flammenbasis bzw. innerhalb der Höhe H_{cl}
T	[K]	(Flammen-) Temperatur
t	[s]	Zeit
t_{cr}	[s]	Umschlagszeit von momentan → kontinuierlich (s. τ_{cr})
t_s	[s]	Freisetzungsdauer bzw. Dauer der Verschüttung
u_{ax}	[m/s]	axiale Strömungsgeschwindigkeit des gesamten Flammengasgemisches (inklusive Luftentrainment) im Bereich der Plumezone
u_w	[m/s]	Windgeschwindigkeit
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
v_a	[m/s]	Abbrandgeschwindigkeit
x	[m]	Koordinate in axialer Strömungsrichtung der Flamme
y, z	[m]	Koordinaten in horizontaler Richtung
y_p	[kg/kg]	Ausbeute eines Reaktionsproduktes in Masse Brandprodukt (P) bezogen auf die umgesetzte Masse Brandgut (Edukt)

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

$\Delta \dot{h}$	[kW/m ³]	Absorptionsrate der latenten Wärmeleistung je Volumeneinheit des (flüssigen) Brennstoffes
\dot{q}	[kW/m ³]	Wärmestrom je Volumeneinheit der Flamme (Verbrennungs-Quellenfunktion)

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient von Substrat auf Brennstoff
α_i	[1/m]	Absorptionskoeffizienten der <i>Strukturelemente</i> i
ε_F	[-]	Emissionsgrad der Flamme in die Umgebung
$\varepsilon_{F,f}$	[-]	Emissionsgrad zwischen Flamme und Brennstoffoberfläche
λ	[W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante; $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
τ_{cr}	[s]	dimensionlose Zeit für Übergang momentane \rightarrow kontinuierliche Freisetzung (Verschüttung); dimensionslose Umschlagszeit (crossover time)
τ_i	[-]	Durchlass- bzw. Transmissionsgrade der fluidodynamischen Strukturelemente i = hs, sp, re, fp
ν_p	[-]	stöchiometrischer Faktor des Reaktionsproduktes P
ν	[m ² /s]	kinematische Zähigkeit von Luft

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

$(\bar{\quad})$	zeitlicher Mittelwert
$(\hat{\quad})$	modifizierte Größe
$(^{II})$	berechnete Größe aus OSRAMO II
(a'')	auf die Flächeneinheit bezogene Größe a
f	Brennstoff (fuel) bzw. brennbare Flüssigkeit
KW	Kohlenwasserstoffe
MSFM	Modifiziertes SFM (<i>Modified Solid Flame Model</i>)
OSRAMO	Organisiertes Strukturen-Strahlungsmodell (<i>Organized Structure Radiation Model</i>)
SFM	Konventionelles Zylinderflammen-Strahlungsmodell (<i>Solid Flame Model</i>)
B	Überschuss-Komponente der Reaktion $A+B \rightarrow \nu_p P$
AGA	American Gas Association

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

Indizes

a	Umgebung
ax	axial
ba	Rückstrom von Flamme zu Brennstoffoberfläche
bp	Siedepunkt (boiling point)
c	Verbrennung (combustion)
cl	klare Verbrennungszone
conv	konvektiv
ent	entrainment
exp	experimentelle Größe
f	Brennstoff (fuel) bzw. brennbare Flüssigkeit
fp	Brennstoffballen (fuel parcel)
F	Flamme
ges	gesamt
hs	hot spots

In den Folien nicht erklärte Formelzeichen

max	maximal
pl	Plumezone
pul	Pulsationszone
P	Pool; Brandprodukte, z.B. Ruß, CO ₂ , CO
rad	thermische Strahlung
re	Reaktions- bzw. Flammenzone
rf	freigesetzte (verschüttete) brennbare Flüssigkeit
sp	schwarze Rußballen (soot/smoke parcels)
top	Flammenspitze
v	Verdampfung der brennbaren Flüssigkeit
verl	Verluste
tot	total
w	Wind
wa	Tank-/Poolwand