LOCAFI+

Bewertung der Temperaturen eines einem lokalen Brand (LOCAl FIRe) ausgesetzten vertikalen Bauteiles: Verbreitung der Ergebnisse

Fördervereinbarung Nr. 754072

4. Analysenmethode und Validierung

4. Analysenmethode und Validierung

4.1. Das Konzept einer virtuellen soliden Flamme

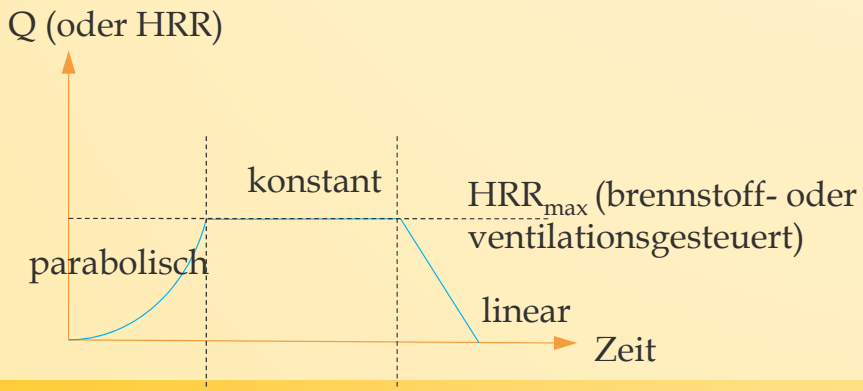
Modellierung der Flamme

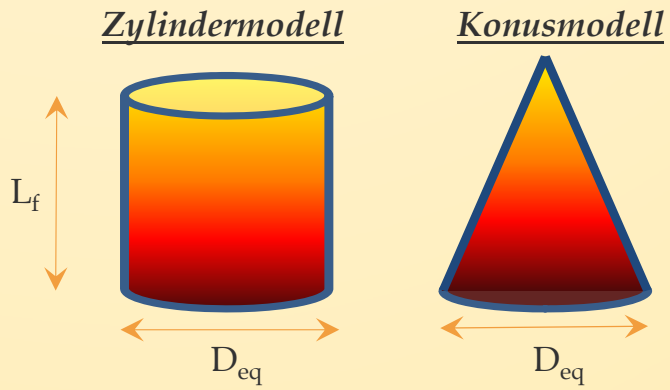
Schritt 1: Umwandlung der Oberfläche des Brandes in einer äquivalenten Scheibe $D_{fire} = \sqrt{\frac{4.S}{\pi}}$

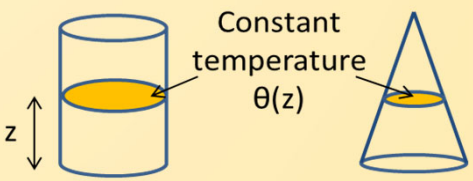
Schritt 2: Berechnung der Wärmefreisetzungsrate nach EN 1991-1-2 Anhang E (Wachstumsphase, Plateau, Abklingphase)

Schritt 3: Berechnung der Flammenlänge L_f nach EN 1991-1-2 Anhang C: $L_f(t) = -1.02\, D_{fire} + 0.0148\, Q(t)^{0.4}$

Schritt 4: Darstellung des Brandes als virtuelle solide Flamme, konisch oder zylindrisch, definiert durch D_{eq} und L_f





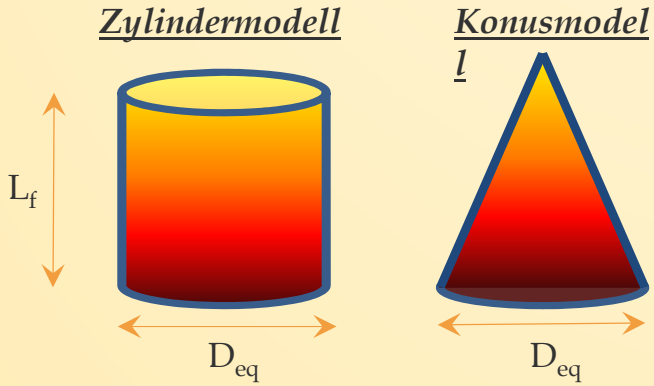


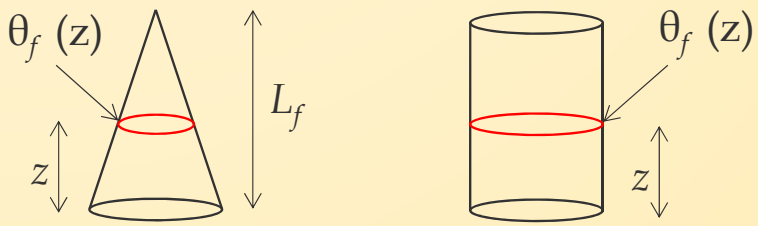
4. Analysenmethode und Validierung

4.1. Das Konzept einer virtuellen soliden Flamme

Modellierung der Flamme

Wenn die Flamme die Decke nicht berührt ($L_f < H_{ceiling}$ oder keine Decke)





$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25\left(0.8Q(t)\right)^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524\, Q(t)^{0.4}$$

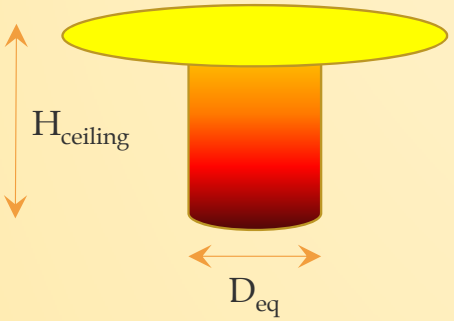
4. Analysenmethode und Validierung

4.1. Das Konzept einer virtuellen soliden Flamme

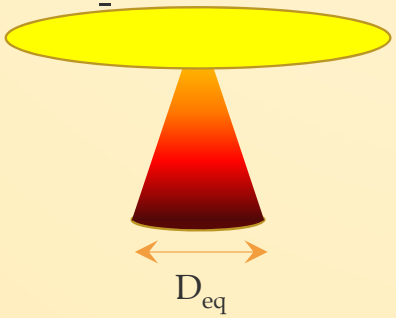
Modellierung der Flamme

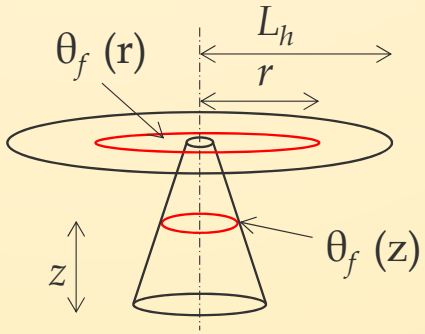
Wenn die Flamme die Decke nicht berührt ($L_f > H_{ceiling}$)

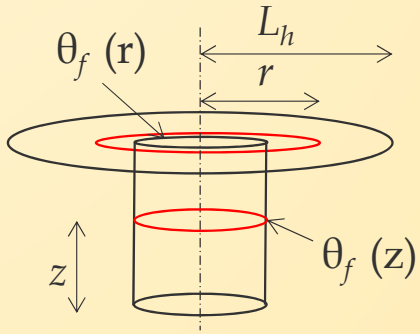
Zylindermodell



Konusmodell







$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25\left(0.8Q(t)\right)^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524\, Q(t)^{0.4}$$

$$L_h(t) = H\left(2.9Q(t)_H^{0.33} - 1\right)$$

$\dot{h}(r)$ *berechnet nach Hasemi*

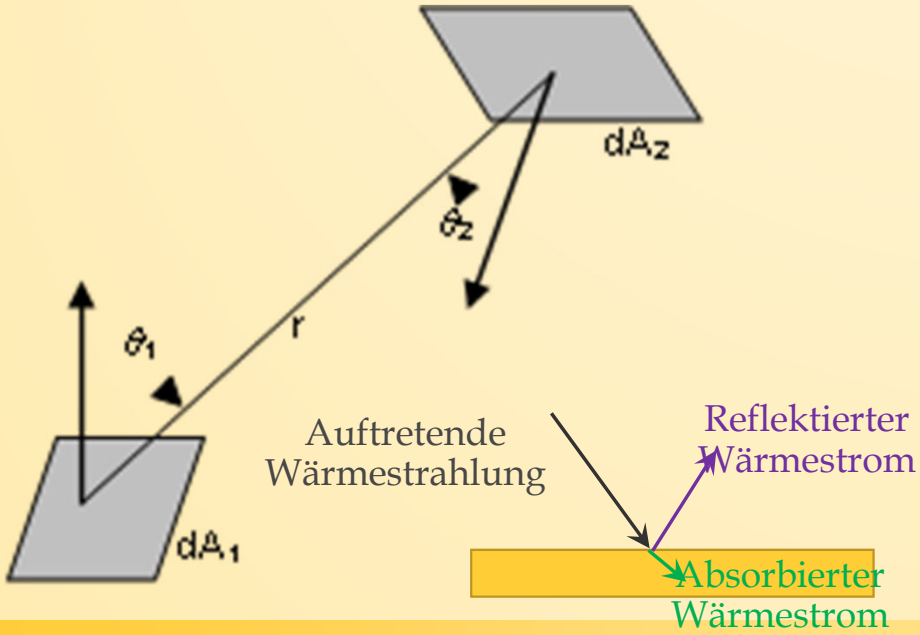
$\theta_f(r)$ *entspricht* $\dot{h}(r) = \sigma\left(\left(\theta_f(r) + 273\right)^4 - 293^4\right) + 35\left(\theta_f(r) - 20\right)$

4. Analysenmethode und Validierung

4.2 Geometrische Methode für den Austausch von Wärmeströmen

Bewertung des Wärmestroms durch Strahlung

Die Wärmestrahlung von der Abstrahlungsfläche dA_1 auf der Oberfläche dA_2 ist:



$$\emptyset_{dA_1 \to dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma . T^4 \frac{cos(\theta_1) cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- Es wird angenommen, dass die Emissivität ε_1 (der emittierenden Oberfläche) ist gleich 1 für Flammen.
- Die Absorption α_2 hängt von den Eigenschaften der empfangenden Oberfläche ab.
- Kirchhoffsches Gesetz: Wärmespeichervermögen (α) = Emissivität (ε)
- Für Stahl, $\varepsilon = \alpha = 0.7$

4. Analysenmethode und Validierung

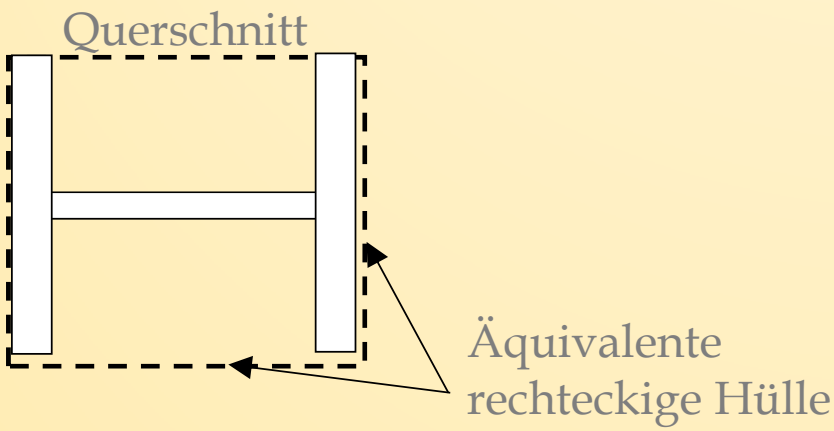
4.2. Geometrische Methode für den Austausch von Wärmeströmen

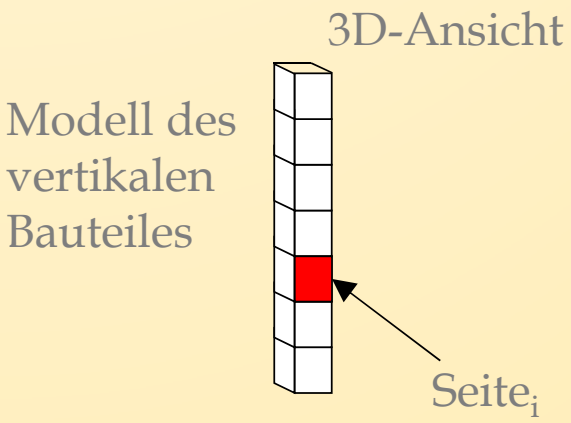
Modellieren eines vertikalen Bauteils

Konkave Querschnitte deuten auf einen **Abschattungseffekt** hin → zur Vereinfachung werden Wärmeströme auf einen konvexen Umfang berechnet.

Bei I- oder H-Profilen wird das Bauteil in einem rechteckigen Rohrquerschnitt (gemäß EN 1991-1-2 Anhang G) umgewandelt.

Der Umfang ist dann in Seiten untergeteilt.

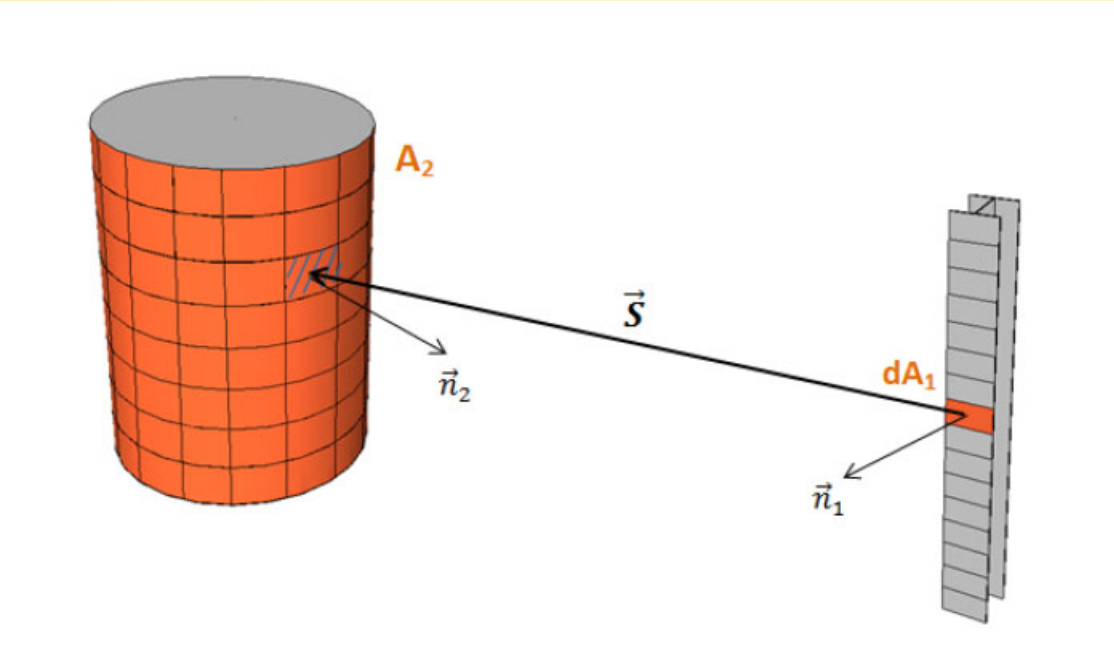




4. Analysenmethode und Validierung

4.2. Geometrische Methode für den Austausch von Wärmeströmen

Numerische Integration



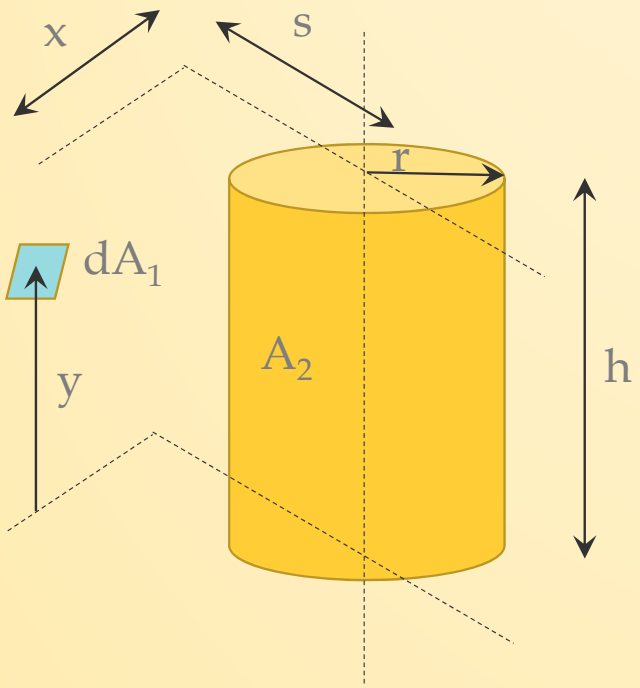
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S}.\vec{n_1})(\vec{S}.\vec{n_2})}{S^4} \Delta A_i$$

- Jeder „einzelne“ Wärmeaustausch durch Strahlung wird berechnet (für jeden Zeitschritt).
- Benötigt ein Programm für reale Anwendungen.
- Ermöglicht die Anwendung von ungleichmäßigen Bedingungen (Wärmeströme durch Strahlungen) am Umfang des Schnittes.

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Sichtfaktor für Strahlungsaustausch zwischen einer infinitesimalen Oberfläche und einem Zylinder



$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi}\left\{\begin{array}{l} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1}\right) + cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1}\right) \\ -Y\left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A-1)^2 + 4Y^2}} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)}\right)\right] \\ -\sqrt{C}\frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)}\right) \\ +H cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{B}}\right) \end{array}\right\}$$

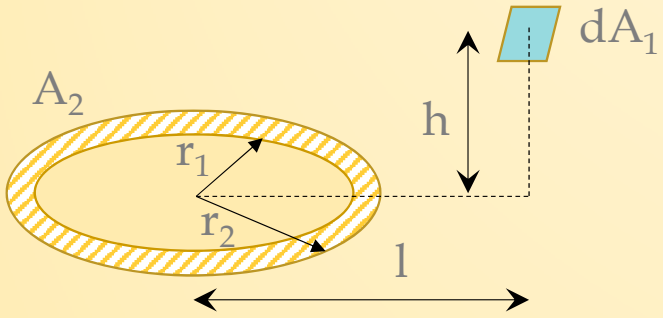
$$S = s/r$$
$$X = x/r$$
$$H = h/r$$
$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$
$$B = S^2 + X^2$$
$$C = (H - Y)^2$$

Nur gültig wenn die durch dA_1 definierte Ebene das Zylinder nicht durchschneidet!

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Sichtfaktor für Strahlungsaustausch zwischen einer infinitesimalen Oberfläche und einem Ring



$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{H}{2}\left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}}\right)$$

$$H = h/l$$
$$R = r/l$$

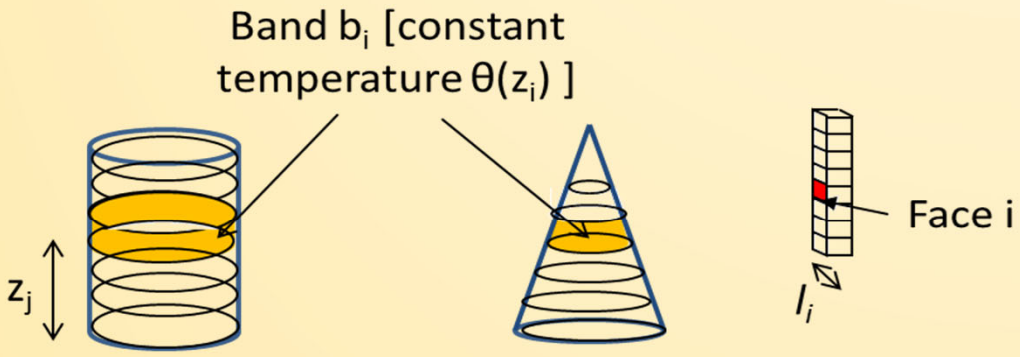
Nur gültig wenn $l > r_2$!

4. Analysenmethode und Validierung

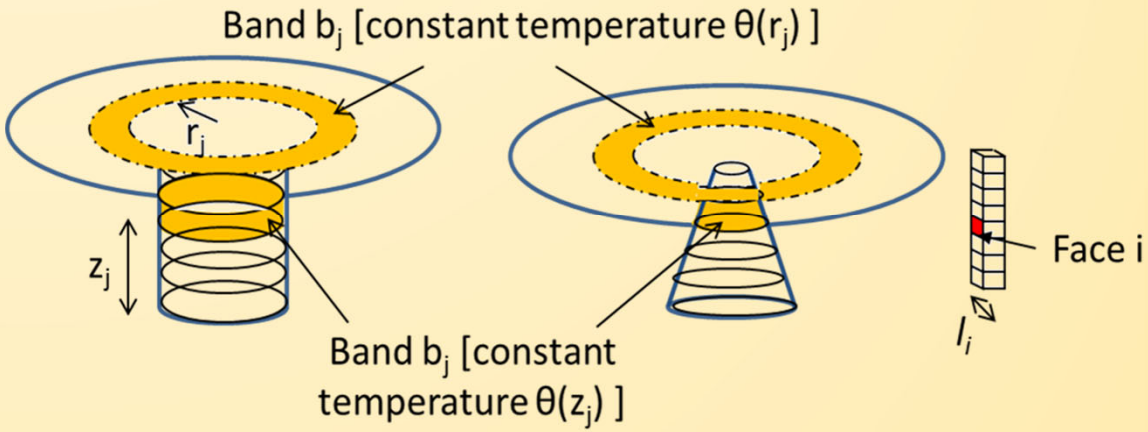
4.3. Vereinfachtes Modell

Unterteilung der Flamme in Zylinder und Ringe

Wenn die Flamme die Decke nicht berührt (L_f < $H_{ceiling}$ oder es gibt keine Decke)



Wenn die Flamme die Decke nicht berührt(L_f > $H_{ceiling}$)

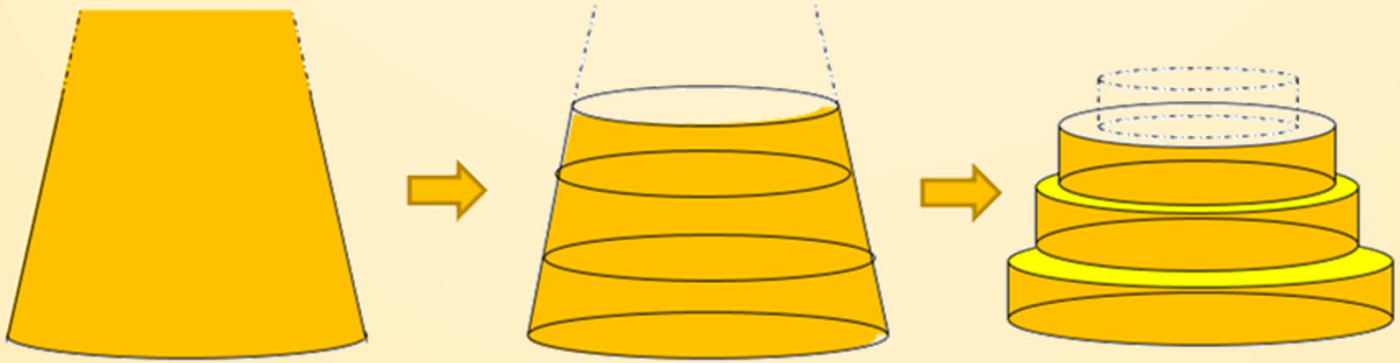


Anmerkung: der Beitrag des Ringes ist sehr gering, außer wenn das Bauteil sich im Ring befindet.

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Unterteilung der Flamme in Zylinder und Ringe (Adaptation 1)



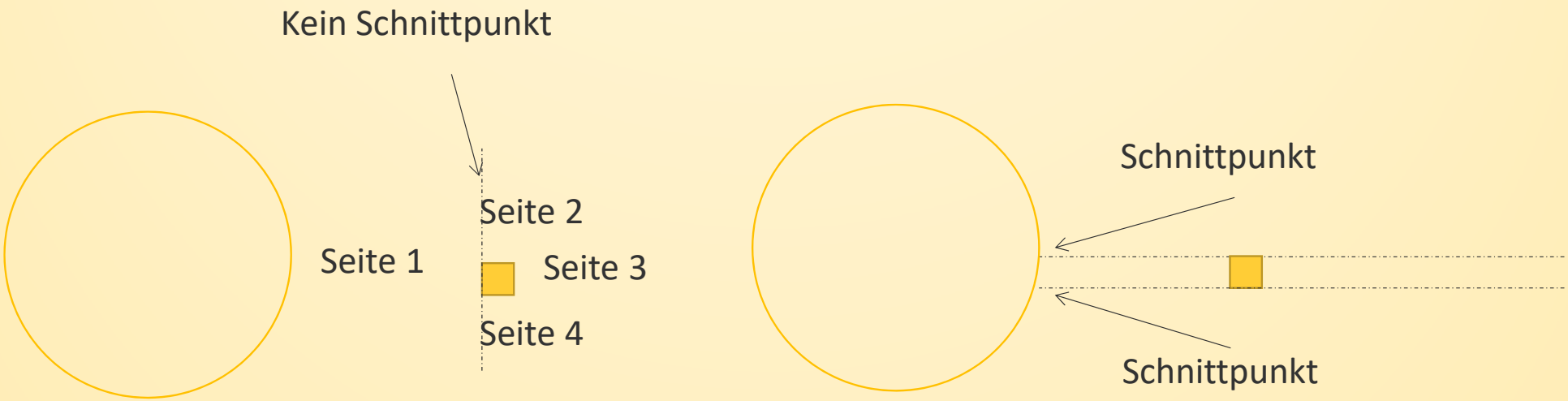
Konische solide Flamme | Kegelstümpfe | Zylinder und Ringe

Durch das Ignorieren des Beitrages der Ringe unterschätzen wir die empfangene Wärmestromdichte und könnten sogar eine empfangene Wärmestromdichte gleich 0 oberhalb des Brandes erhalten!

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Unterteilung der Flamme in Zylinder und Ringe (Adaptation 2)

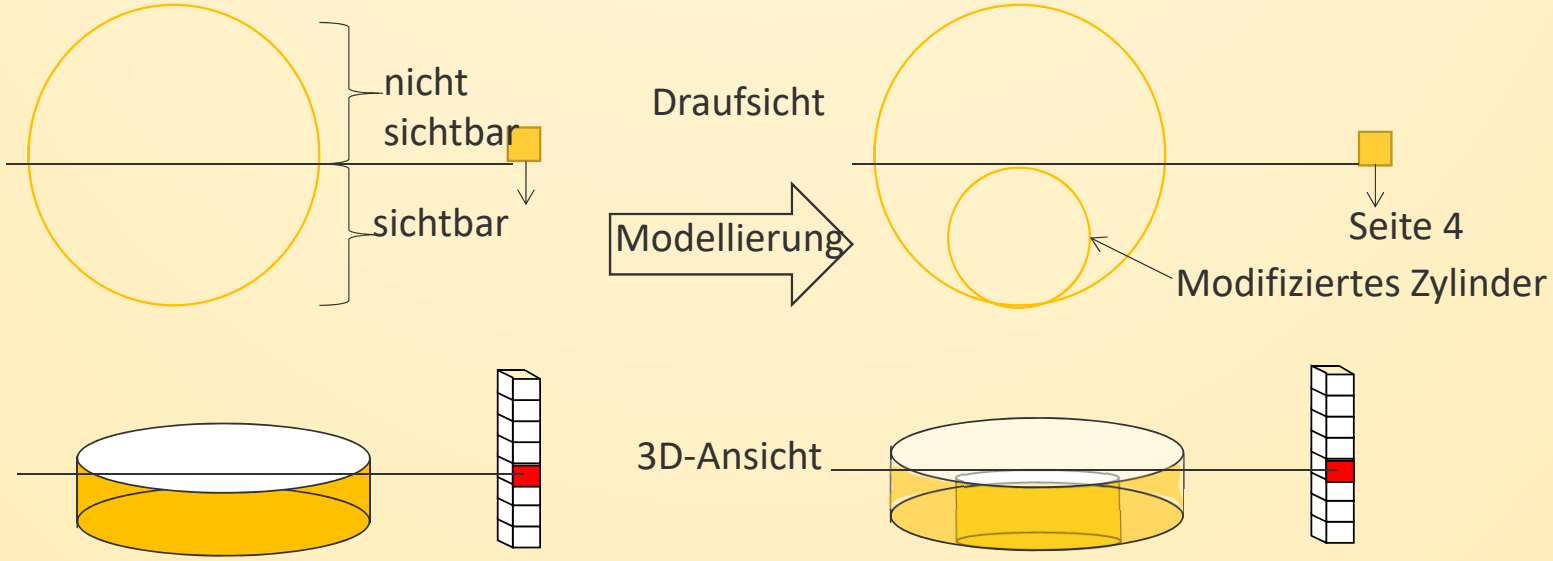


Die Formel für Zylinder ist nicht gültig wenn die empfangende Oberfläche den Zylinder nicht durchschneidet!

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Unterteilung der Flamme in Zylinder und Ringe (Adaptation 2)

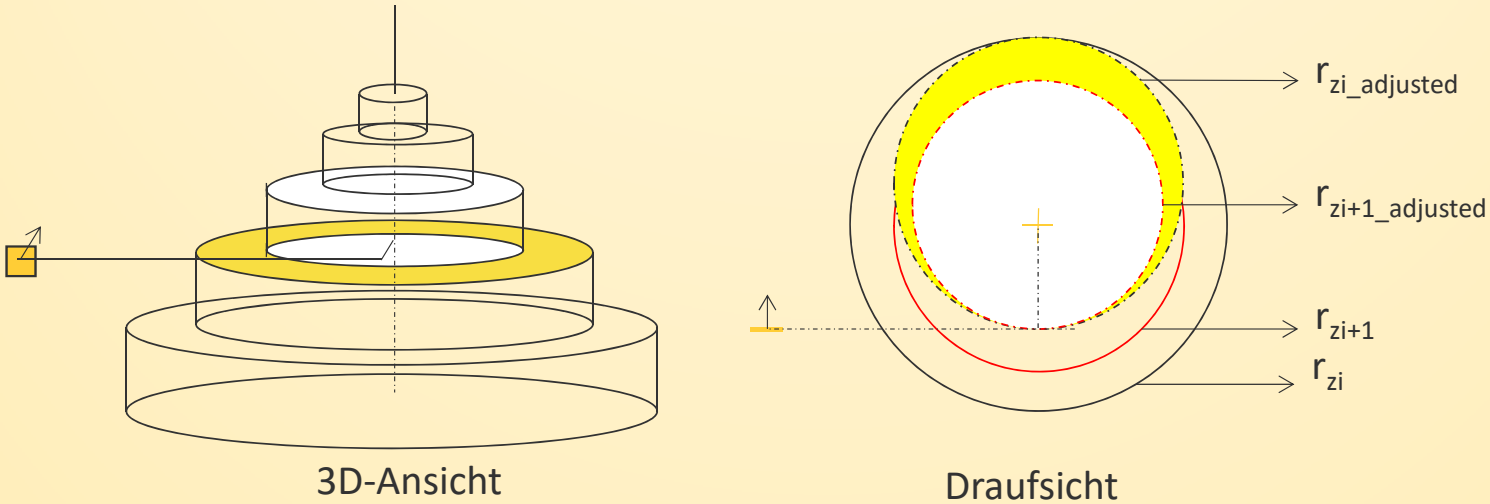


In diesem Falle wird das Ausgangszylinder in einem modifizierten Zylinder in der sichtbaren Zone umgewandelt.

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Unterteilung der Flamme in Zylinder und Ringe (Adaptation 3)



Ein der Ringe ist «versteckt» durch das Zylinder oberhalb → über eine reduzierte Zone sollte nachgedacht werden (ignorieren diese Reduzierung, um sicher zu gehen)

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Zusätzliche Bemerkungen

- Die empfohlene Breite des Zylinders ist 50 cm.
- Für Elemente positioniert unterhalb der Decke, Konvektion sollte auch berücksichtigt werden → Hasemi
- Für mehrere Brände müssen die Wärmeströme von jedem Brand summiert werden: $\dot{h}_{tot} = min\left(\dot{h}_{rad_section} + \dot{h}_{conv}; 100000\right)$ [W.m^{-2}]. Der maximale empfangene Wärmestromdichte beträgt 100 kW/m^2.
- Die Temperatur des Bauteils wird durch die thermische Bilanz berechnet:

$$\rho C_p(T)\frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V}\left[\dot{h}_{z_j} + \alpha_c(20-\theta) + \varepsilon\left(\sigma(293^4 - (\theta+273)^4)\right)\right] \quad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

ρ, C_p, und A_m/V sind die Dichte [kg.m^{-3}], die spezifische Wärme [J.kg^{-1}.K^{-1}] und die Massivität [m^{-1}] des Bauteils.

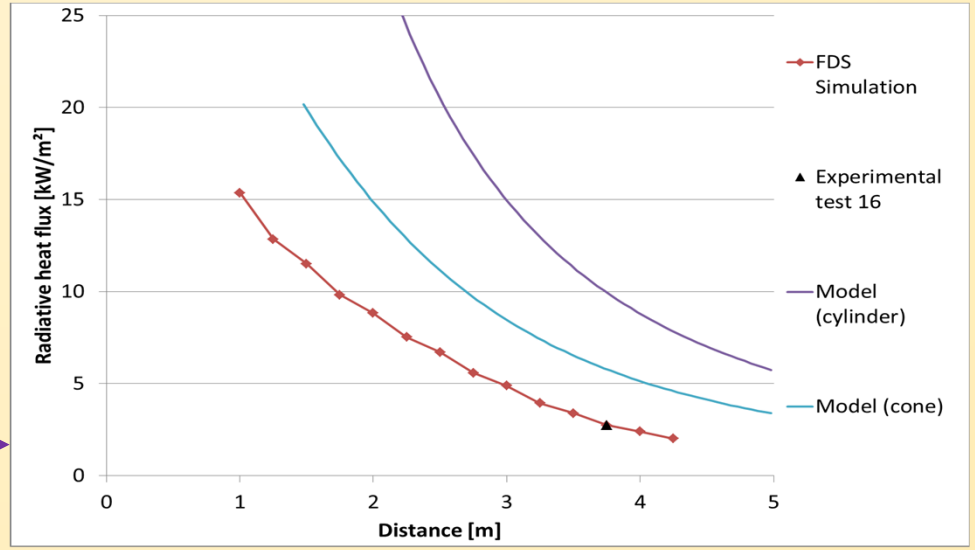
4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Modellvalidierung auf der Basis der Lüttich-Tests (und FDS-Modellierung)

- Messgerät positioniert 3,75 m von der Brandquelle (Höhe: 1.75 m)
- Orientierung des Messgerätes: senkrecht zur Brand-Messgerät-Achse

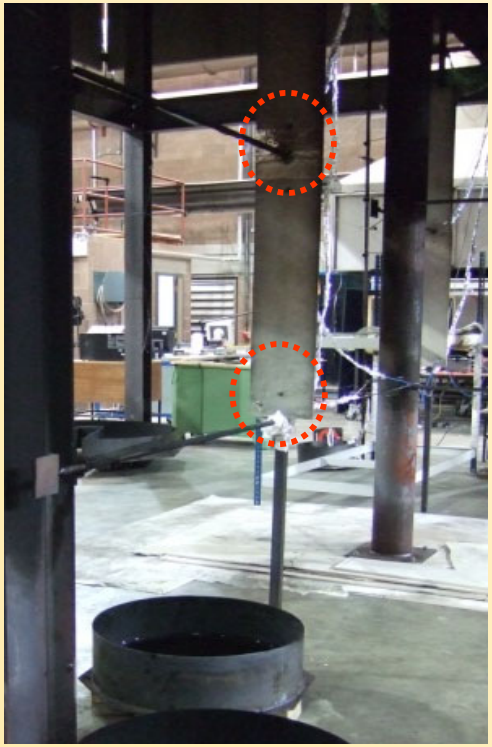
Durch-messer	Versuchs-Mittelwert	Tests	Zylindrische Flamme	Konische Flamme
[m]	[kW/m²]	[-]	[kW/m²]	[kW/m²]
0,60	0,31	1 bis 4	1,20	0,74
1,00	0,73	5 bis 8	3,23	1.95
1,40	1,36	9 bis 14	6,19	3,67
1,80	2,12	15 bis 18	9,95	5,78
2,20	3,39	19 bis 22	14,55	8,30

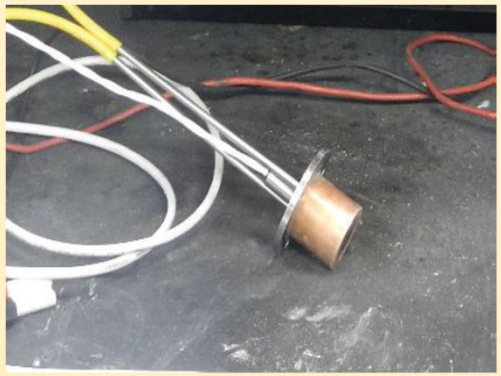


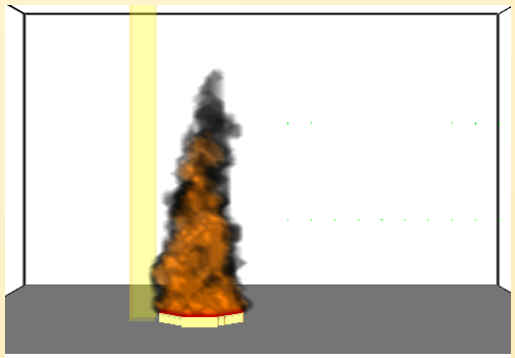
4. Analysenmethode und Validierung

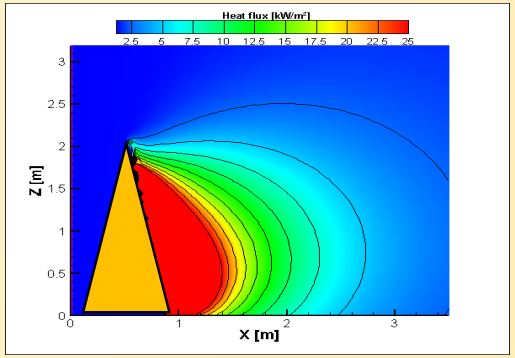
4.3. Vereinfachtes Modell

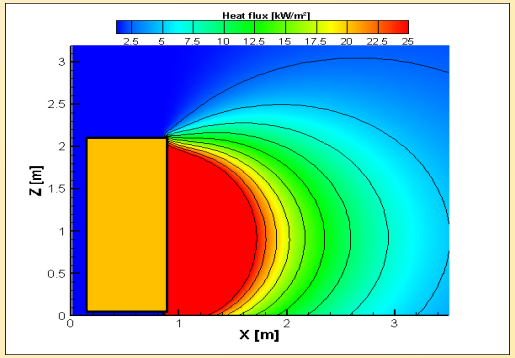
Modellvalidierung auf der Basis der Lüttich-Tests (und FDS-Modellierung)







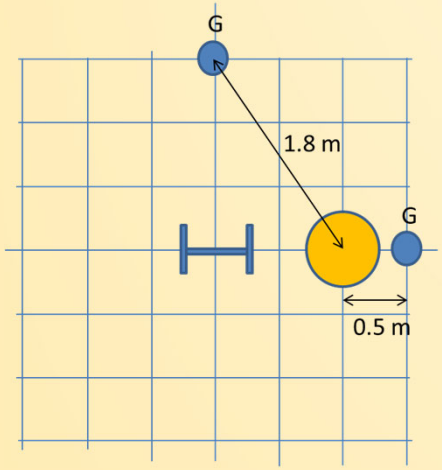




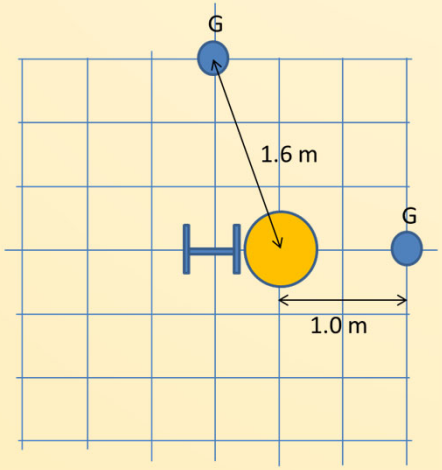
4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Modellvalidierung auf der Basis der Ulster-Tests (und FDS-Modellierung)



Fall 1a
1 Pfanne
D = 0,7 m
Messgeräte bei 0,5/1,8 m



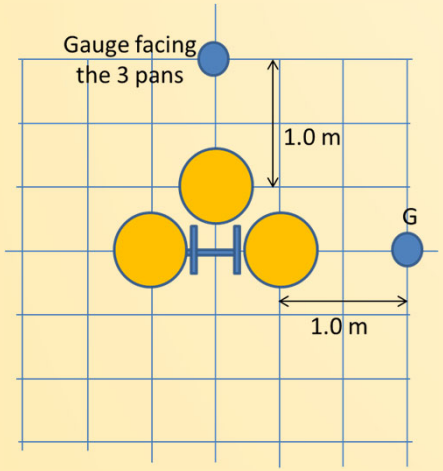
Fall 1b
1 Pfanne
D = 0,7 m
Messgeräte bei 1,0/1,6 m

Position des Messgeräts		Versuchs-Mittelwert	FDS Simulation	Zylindrische Flamme	Conische Flamme
Höhe	Abstand				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1,0	0,5	30,6	28,5	74,0	39,0
1,0	1,0	13,8	12,9	33,2	17,9
1,0	1,6	5,9	5,5	15,5	8,5
1,0	1,8	4,2	3,8	10,8	6,0
2,0	0,5	6,2	11,2	22,0	5,9
2,0	1,0	4,5	5,9	14,1	5,5
2,0	1,6	3,0	3,7	8,8	4,1
2,0	1,8	2,3	2,6	6,7	3,3

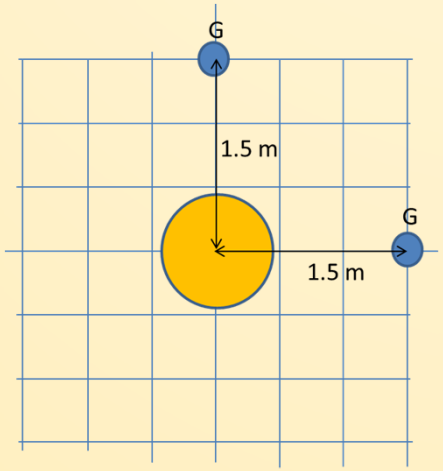
4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Modellvalidierung auf der Basis der Ulster-Tests (und FDS-Modellierung)



Fall 3
3 Pfannen
D = 0,7 m
Messgeräte bei 1,0 m



Fall 5
1 Pfanne
D = 1,6 m
Messgeräte bei 1,5 m

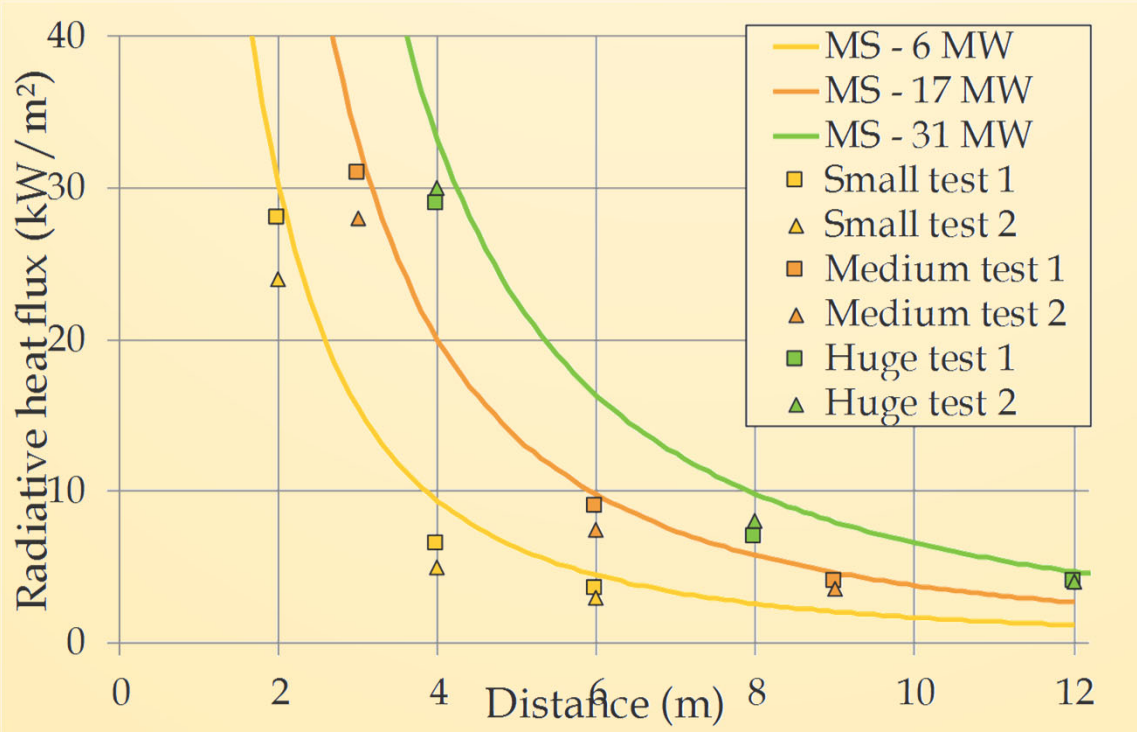
Position des Messgeräts		Versuchs-Mittelwert	Simulations-Mittelwert	Zylindrische Flamme	Konische Flamme
Höhe	Abstand				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1,0	1,0	31,0	26,6	66,3	37,4
1,0	1,0	24,3	21,6	62,0	34,6
2,0	1,0	15,0	17,7	40,9	16,2
2,0	1,0	13,0	13,6	38,5	15,9

Position des Messgeräts		Versuchs-Mittelwert	Simulations-Mittelwert	Zylindrische Flamme	Konische Flamme
Höhe	Abstand				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1,0	1,5	37,6	33,6	53,9	38,9
2,0	1,5	26,5	24,5	55,2	29,7

4. Analysenmethode und Validierung

4.3. Vereinfachtes Modell

Modellvalidierung für große Durchmesser (LCPP-Tests)

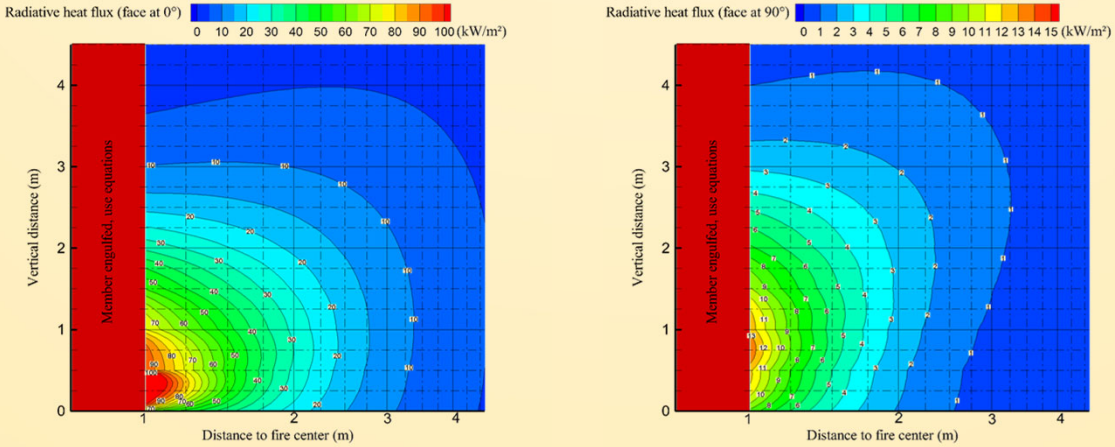


20

4. Analysenmethode und Validierung

4.4. Konturdiagramme

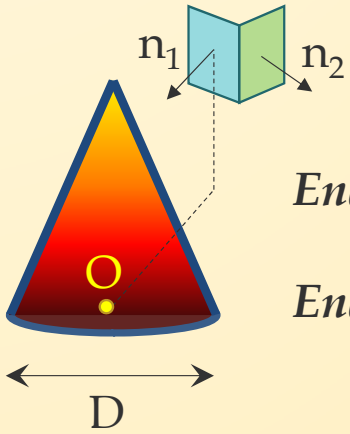
- Liefern neue Ergebnisse für die Validierung von SAFIR- und OZone- Implementierungen.
- Liefern schnelle und sichere Ergebnisse für ein breites Spektrum von Konfigurationen (Vorauslegung) sowie eine Interpolationsmethode, um es für ein viel breiteres Spektrum von Konfigurationen anzuwenden.
- Liefern ein Satz Referenzergebnisse zur Validierung des Implementierens der analytischen Methoden durch Fachleute liefern (Tabellenkalkulationen oder Software).



D = 2m, RHR = 500 kW/m², θ = 0° (links) oder θ = 90° (rechts)

4. Analysenmethode und Validierung

4.4. Konturdiagramme



Endliche Oberfläche 1: $\theta = 0°$

Endliche Oberfläche 2: $\theta = 90°$

- Jedes Nomogramm wird gekennzeichnet durch:
  - der Branddurchmesser (m)
  - die Wärmefreisetzungsrate (kW/m^2)
  - die Orientierung der empfangenden Oberfläche (°)

- Nomogramme berücksichtigen nur die Strahlung. Nicht verwendet werden:
  - Innerhalb des Brandes → HESKESTAD
  - In der Höhe der Gecke → HASEMI

- Es wird angenommen, dass die Emissivität der Flamme 1,0 beträgt.

4. Analysenmethode und Validierung

4.4. Konturdiagramme

Fall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (m)	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
RHR (kW/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Leistung (MW)	0,8	1,6	3,1	4,7	1,8	3,5	7,1	10,6	3,1	6,3	12,6	18,8

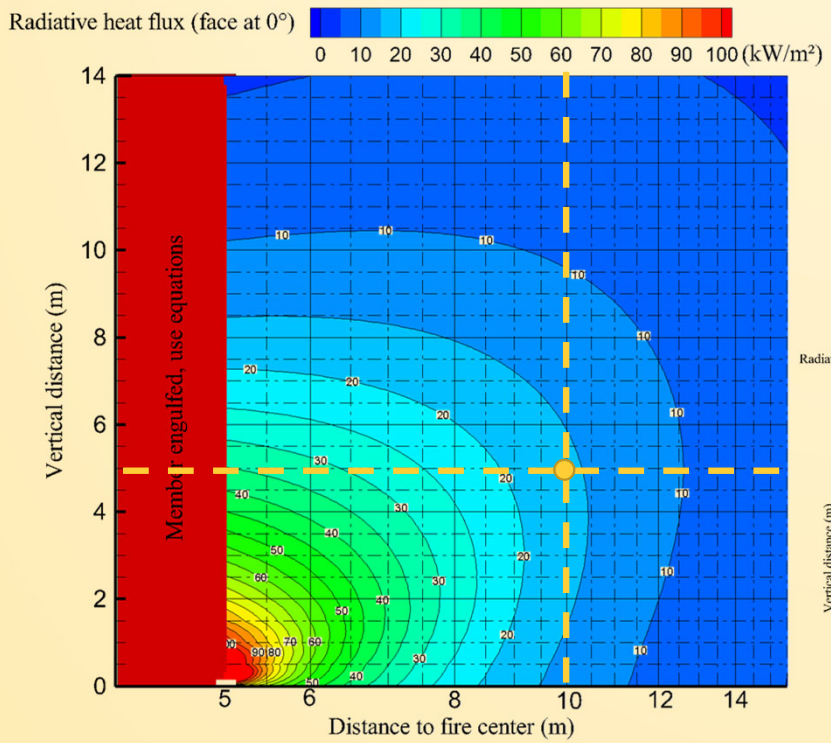
Fall	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
RHR (kW/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Leistung (MW)	7,1	14,1	28,3	42,4	12,6	25,1	50,3	47,7	15,9	31,8	19,6	39,3

Anwendungsbereich der Methode (wie Anhang C der EN 1991-1-2): D ≤ 10 m ; Q ≤ 50 MW

→ die gewählten Konfigurationen decken den Anwendungsbereich der Berechnungsmethode ab.

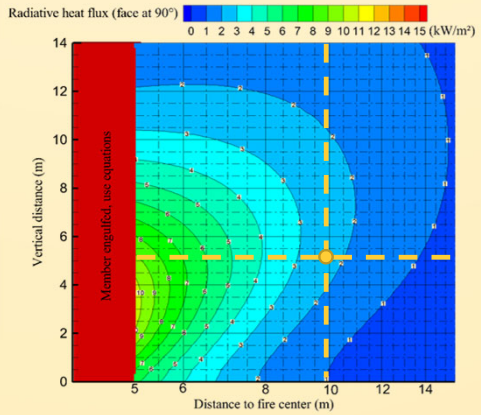
4. Analysenmethode und Validierung

4.4. Konturdiagramme



- Kenndaten des lokalen Brandes:
  - D = 10 m
  - RHR: 500 kW/m²
- Zielposition
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Orientierung: 0°

Empfangener Wärmestrom = 16 kW/m²



- Zielposition
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Orientierung: 90°

Empfangener Wärmestrom = 2.4 kW/m²

4. Analysenmethode und Validierung

4.5. Schlussfolgerungen

- Das LOCAFI-Projekt präsentiert ein neues Konzept: die virtuelle solide Flamme.
- Die Temperaturverteilung am Umfang der virtuellen soliden Flamme basiert auf existierende Gleichungen der EN 1991-1-2 Anhang C (Heskestad, Hasemi).
- Der Wärmeaustausch durch Strahlungen basiert auf den Konfigurationsfaktor der EN 1991-1-2 Anhang G.
- Das vereinfachte Modell basiert auf mathematische Gleichungen, die den Wärmestrom durch Strahlung liefern, die von einer Oberfläche aus unendlich kleine Zylinder und Ringe empfangen wird.
- Die konvektiv ausgetauschten Wärme muss separat berechnet werden. Aber die konvektiv ausgetauschte Wärme führt nur zu einer nennenswerten Auswirkung bei den Konfigurationen, die schon in EN 1991-1-2 Anhang C erwähnt sind (Bauteile vollständig von Flammen eingeschlossen oder im Deckenbereich).