

BEMESSUNG VON STÜTZEN IM FALLE EINES LOKALEN BRANDES





SCI (The Steel Construction Institute) ist der führende unabhängige Anbieter von technischem Fachwissen sowie Multiplikator für optimale Verfahren im Stahlbausektor. Wir arbeiten partnerschaftlich mit Klienten, Mitgliedern und Kollegen aus der Branche zusammen, um den Aufbau von Unternehmen zu unterstützen und einen Wettbewerbsvorteil durch die kommerzielle Nutzung unseres Fachwissens anzubieten. Wir setzen uns für nachhaltige und umweltbewusste Lösungen ein.

Unser Leistungsspektrum umfasst folgende Gebiete:

Mitgliedschaft

Einzel- & Firmenmitgliedschaft

Rat

Beratungsdienst für Mitglieder

Information

Veröffentlichungen

Ausbildung

Veranstaltungen & Lehrgänge

Beratung

Entwicklung

Produktentwicklung

Ingenieurtechnische Unterstützung

Nachhaltigkeit

Bewertung

SCI Bewertung

Spezifikationen

Websites

Engineering-Software

Impressum

© 2018 SCI. Alle Rechte vorbehalten.

Publication Number: **SCI P423**

ISBN

Herausgeber:

SCI, Silwood Park, Ascot,
Berkshire. SL5 7QN, UK

T: +44 (0)1344 636525

F: +44 (0)1344 636570

E: reception@steel-sci.com

www.steel-sci.com

Eventuelle Fehler bitte melden an:

publications@steel-sci.com

Titelbild

Ein an der Universität von Ulster durchgeführter Vollbrand.

Mit Ausnahme der durch das Gesetz „Copyright Designs and Patents Act“ aus dem Jahre 1988 erlaubten angemessenen Anwendung zum Zweck der Forschung, des Selbststudiums, der Kritik oder der Besprechung darf diese Publikation weder vervielfältigt, gespeichert oder in irgendeiner anderen Form oder auf irgendeine andere Art und Weise ohne vorherige schriftliche Zustimmung des Herausgebers übertragen werden, oder im Falle einer reprographischen Vervielfältigung nur gemäß der Bedingungen der von der UK Copyright Licensing Agency erteilten Lizenzen oder außerhalb des Vereinigten Königreiches gemäß der Bedingungen der von der zuständigen Organisation für Vervielfältigungsrecht. Für Anfragen hinsichtlich der Vervielfältigung außerhalb der hier genannten Bedingungen wenden Sie sich bitte an den Herausgeber.

Obwohl wir größtmögliche Sorgfalt haben walten lassen, dass alle hier enthaltenen Daten und Informationen nach bestem Wissen und Gewissen insoweit korrekt sind, als sie sich entweder auf Tatsachen oder allgemein anerkannte Praktiken oder Auffassungen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung beziehen, übernehmen SCI, die Autoren und die fachlichen Prüfer keine Verantwortung für Fehler bzw. falsche Darstellung der Daten bzw. Informationen oder für Verluste oder Schäden, die sich aus deren Verwendung entstehen.

Mitglieder des Instituts, die Exemplare dieser Publikation zum verbilligten Preis erhalten, dürfen sie nicht wieder-verkaufen.

British Library Cataloguing in Publication-Daten
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei der British Library erhältlich.

Bildnachweise:

Sofern nicht anders vermerkt wurden die Fotos von Mitgliedern des LOCAFI-Konsortiums bereitgestellt

Dieser Bemessungsleitfaden wurde von Bauforumstahl e.V. ins Deutsche übersetzt.

VORWORT

Diese Druckschrift wurde im Rahmen des Projektes *Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localised fire – Valorisation (LOCAFI-plus) (contract 754072)* des Forschungsfonds für Kohle und Stahl der Europäischen Union hergestellt.

Die Teilnehmer des LOCAFI-plus-Projektes waren:

Arcelormittal Belval & Differdange SA Luxemburg	Tallinna Tehnikaulikool Estland
Centre Technique Industriel de la Construction Métallique Frankreich	Univerza V Ljubljani Slowenien
Universitatea Politehnica Timisoara Rumänien	Instytut Techniki Budowlanej Polen
Universite de Liège Belgien	Universitat Politecnica de Valencia Spanien
University of Ulster Vereinigtes Königreich	Technicka Univerzita V Kosiciach Slowakei
Universita Degli Studi Di Trento Italien	Staalinfocentrum – Infosteel Belgien
Ceske Vysoke Uceni Technicke V Praze Tschechien	Miskolci Egyetem Ungarn
Stichting Bouwen met Staal Die Niederlande	Tampere University of Technology Finnland
Universidade de Aveiro Portugal	The Steel Construction Institute Vereinigtes Königreich
Bauforumstahl e.V. Deutschland	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB Schweden

Folgende Personen leisteten einen wesentlichen Beitrag zur Erstellung dieser Publikation:

- Phil Francis, SCI
- Nancy Baddoo, SCI
- Francois Hanus, ArcelorMittal
- Christophe Thauvoye, CTICM

Die Konturdiagramme wurden von CTICM entwickelt.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung des Forschungsfonds für Kohle und Stahl.

Inhalt

	Seite.
VORWORT	ii
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Geltungsbereich dieses Bemessungsleitfadens	1
1.2 Die Eurocodes	1
1.3 „Nationale Vorschriften hinsichtlich des Brandschutzes auf leistungsabhängiger Basis	2
2 EINFÜHRUNG IN DEM BRANDSCHUTZ	3
2.1 Einsturzvermeidung und Bereitstellung vom Brandschutz	3
2.2 Bemessung nach den Eurocodes	4
3 LOKALE BRÄNDE	8
3.1 Bisherige Untersuchungen und Einfügung im Eurocode	8
3.2 Versuche und Kalibrierung	9
4 NEUES MODELL FÜR DIE BRAND-BEANSPRUCHUNG VON STÜTZEN IN LOKALEN BRÄNDE	20
4.1 Grundsätze und Anwendungsbereiche	20
4.2 Designwerkzeuge zur Modellierung der Wärmeströme lokaler Brände	22
4.3 Bestimmung der Temperatur eines Stützensegments	28
5 BEMESSUNG DER STÜTZE	32
5.1 Nachweis	32
5.2 Lastniveau	32
5.3 Beanspruchbarkeit	33
5.4 Berechnung der Tragfähigkeit im Brandfall mittels FE-Analyse	37
6 REFERENCES	38
Anhang A MODELL ZUR BERECHNUNG DER BRANDLAST VON STÜTZEN IN LOKALEN BRÄNDE	39
A.1 Überblick	39
A.2 Stütze außerhalb der Brandfläche	40
A.3 Stütze innerhalb der Brandfläche	50
A.4 Die vom Stützensegment empfangene Gesamt-Wärmestromdichte	51
Anhang B ANWENDUNG BEI EINER STÜTZE AUSSERHALB DER BRANDFLÄCHE	52
Anhang C KONTURDIAGRAMME	61
Anhang D BEMESSUNGSBEISPIELE	86
D.1 Industrielles Gebäude	86
D.2 Bürogebäude	89
D.3 Offenes Parkhaus	97

1 EINFÜHRUNG

1.1 Geltungsbereich dieses Bemessungsleitfadens

Dieser Bemessungsleitfaden bietet einen Ansatz zur Feststellung der Temperatur einer Stütze infolge eines lokalen Brandes. Der Ansatz richtet sich nach den Eurocodes. Er beinhaltet auch Hinweise zur Feststellung der Beanspruchbarkeit einer Stahlstütze bei erhöhten Temperaturen. Die Anwendung dieses auf leistungsabhängigen Festlegungen beruhenden Ansatzes zur Bemessung der Tragfähigkeit im Brandfall führt in der Regel zu einer Reduzierung der Brandschutzkosten im Vergleich zu den erforderlichen Kosten eines präskriptiven Ansatzes.

Der Leitfaden umfasst folgende Themen:

- eine allgemeine Einführung in Brandschutz, einschließlich der Auswahl der Modellierungsszenarien und Berechnungsmethoden,
- spezifische Hinweise hinsichtlich der Bemessung eines lokalen Brandes, einschließlich einer Zusammenfassung der als Teil des europäischen LOCAFI-Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen,
- ein neues Bemessungsmodell für lokale Brände,
- eine Beschreibung der vorhandenen Bemessungswerkzeuge zur Modellierung von lokalen Bränden, von vereinfachten Analysen mittels Konturdiagramme bis hin zu ausgeklügelten Finite-Elemente-Modellen,
- eine Zusammenfassung des Modells zur Ermittlung des Bemessungswertes der Beanspruchbarkeit von Stahlstützen im Brandfall nach Eurocode 3; dieses Modell darf zur Analyse der Temperatur verwendet werden, um die Tragfähigkeit der Stütze zu ermitteln,
- Ausführungsbeispiele der Anwendung des Modells in realistischen Bemessungsszenarien.

1.2 Die Eurocodes

Die Eurocodes sind eine Reihe von zehn europäischen Normen, nämlich EN 1990 bis EN 1999, die einen gemeinsamen Ansatz zur Bemessung von Gebäuden und anderen Ingenieurbauwerken und Bauprodukten bieten. Folgende Eurocodes sind relevant beim Berücksichtigen der Tragfähigkeit im Brandfall eines Bauteils aus Stahl oder aus einem Stahl-Beton-Verbund:

- EN 1990 Eurocode 0. Grundlagen der Tragwerksplanung ^[1],
- EN 1991-1-2 Eurocode 1. Einwirkungen auf Tragwerke. Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke ^[2],
- EN 1993-1-2 Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Allgemeine Regeln. Tragwerksbemessung für den Brandfall ^[3],
- EN 1994-1-2 Eurocode 4. Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton. Allgemeine Regeln. Tragwerksbemessung für den Brandfall ^[4].

Zu jedem dieser Eurocodes gehört ein Nationaler Anhang, der gegebenenfalls:

- den Wert eines Faktors (eines sogenannten national festgelegten Parameters) spezifizieren wird,

- das anzuwendende Bemessungsverfahren spezifizieren wird,
- festlegen wird, ob ein informativer Anhang verwendet werden darf.

Ferner weist der Nationale Anhang auf Veröffentlichungen hin, die ergänzenden nicht widersprechenden Angaben (NCI) beinhalten, die dem Konstrukteur helfen werden.

Die Hinweise aus dem Nationalen Anhang gelten für Tragwerke, die im jeweiligen Land konstruiert werden. Es ist zu erwarten, dass sich die Nationalen Anhänge innerhalb Europas zwischen den Ländern unterscheiden werden.

1.3 ,Nationale Vorschriften hinsichtlich des Brandschutzes auf leistungsabhängiger Basis

Das Wissen über die Vorteile und Beschränkungen des Brandschutzes auf leistungsabhängiger Basis hat sich in den letzten Jahren verbessert. Nichtsdestotrotz gibt es hinsichtlich des Brandschutzes erhebliche Variationen bei den nationalen Bauvorschriften in ganz Europa. Aus diesem Grunde ist es daher äußerst wichtig, dass der Konstrukteur die einschlägige Gesetzgebung in dem Land wo das Bauwerk entstehen wird kennt und sich mit der relevanten Prüf- und Genehmigungsbehörde zum geeigneten Zeitpunkt des Gestaltungsprozesses beschäftigt hat.

Um hierbei behilflich zu sein, bietet die Website www.locafi.eu Hinweise über die erforderlichen Schritte, um eine Genehmigung für die Anwendung von auf leistungsabhängigen Brandschutz basierten Methoden in den verschiedenen europäischen Ländern zu erhalten.

2 EINFÜHRUNG IN DEM BRANDSCHUTZ

Brand bedeutet eine ernstzunehmende Bedrohung für das Menschenleben. Es ist äußerst wichtig, dass Gebäude so konzipiert und konstruiert werden, dass sie im Brandfall stabil bleiben bis die Evakuierung der Gebäudenutzer und die Einleitung von Maßnahmen zur Verhinderung der Brandausbreitung vollzogen worden sind. Brandschutz ist die Anwendung wissenschaftlicher Prinzipien, um Tragwerke so zu konzipieren, dass sie bei allen sinnvollen Szenarien die Sicherheit der Gebäudenutzer gewährleisten.

Brandschutz umfasst ein breites Spektrum von Themen, wie:

- das Minimieren des Risikos eines Brandausbruchs,
- die Eingrenzung des Brandes an der Brandausbruchsstelle, d.h. die Vermeidung einer Verbreitung des Brandes zu anderen Gebäudeteilen oder anderen Tragwerken,
- die Bereitstellung von Brandbekämpfungsmaßnahmen, z.B. Sprinkleranlagen,
- die Berücksichtigung von Brandschutzmaßnahmen am Tragwerk, so dass einen Einsturz vermieden wird,
- eine Einsicht ins menschlichen Verhalten im Brandfall, z.B. die Reaktion auf Alarmanlagen, die Fähigkeit, sichere Fluchtwege zu finden, usw.

Die Bereitstellung von Maßnahmen zur Minimierung der Brandeinwirkungen kann einen beträchtlichen Anteil der Kosten des Tragwerkes ausmachen. Überspezifizierung der Brandschutzmaßnahmen kann zu unwirtschaftlichen Tragwerken führen. Eine ausgewogene Lösung ist erforderlich, die ausreichenden Schutz in den verschiedenen Bemessungsbrandfällen zu minimalen Kosten für den Auftraggeber bietet.

Für weitere Information über Brandschutz werden folgende Veröffentlichungen empfohlen ^[5,6,7,8].

Dieser Bemessungsleitfaden beinhaltet eine Methode zur Abschätzung des Temperaturanstieges in einer Stütze während eines lokalen Brandes. Ist die Temperatur bekannt, kann die Beständigkeit der Stütze dann ermittelt werden. Wie unter Abschnitt 2.2 erläutert, kann im Vergleich zu einem Ansatz mit festgelegten Vorgaben dieser auf leistungsabhängigen Festlegungen beruhende Brandschutzansatz zu einer erheblichen Verringerung des Brandschutzes und infolgedessen der Kosten führen.

2.1 Einsturzvermeidung und Bereitstellung vom Brandschutz

Das Vermeiden eines Einsturzes ist ein wesentliches Ziel des Brandschutzes. Bei einer Konstruktion bedeutet ein Einsturz einen plötzlichen und katastrophalen Stabilitätsverlust und wird in der Regel zum Tode jeder Person führen, die sich zu diesem Zeitpunkt im Gebäude aufhält, ob Gebäudenutzer oder Feuerwehrpersonal.

Der Einsturz eines Gebäudes wird in der Regel durch das Schützen von Bauteilen vermieden. Normalerweise kann der Brandschutz eine von zwei Formen annehmen: passiver (z.B. Bretter und Sprühmittel) oder reaktiver Brandschutz (Intumeszenzbeschichtungen). Brandschutz unter Mithilfe von Brettern isoliert den Brand durch die Anwendung von hochwärmedämmenden zementgebundenen

Spanplatten von hoher Dichte und niedriger Wärmeleitfähigkeit. Zementartige Partikel können auch durch Sprühen angebracht werden.

Intumeszenzbeschichtungen sind lackartige Werkstoffe, die bei niedrigen Temperaturen reaktionsträge sind, die aber infolge einer komplexen chemischen Reaktion bei höheren Temperaturen, typischerweise bei etwa 200-250 °C den Bauteil isolieren. Die Eigenschaften des Stahls werden bei solchen Temperaturen nicht beeinträchtigt. In Folge dieser Reaktion, quellen die Beschichtungen auf und bilden eine aufgeschäumte Schicht von verkohlten Material niedriger Leitfähigkeit.

Die Isolierwirkung eines Brandschutzsystems, welches durch die Anwendung von Brettern, Sprühen oder Lackieren entsteht, ist tendenziell abhängig von der Dicke des angebrachten Materials. Die Anwendung von mehr Brandschutzmaßnahmen als erforderlich ist daher konservativ. Sie erhöht jedoch die Kosten. Anstatt eines kleineren geschützten Bauteils ist es manchmal wirtschaftlicher, ein größeres ungeschütztes Bauteil zu spezifizieren, weil dadurch die Kosten des Brandschutzes wegfallen.

In vielen Fällen kann bewiesen werden, dass die Konstruktion ohne zusätzlichen Brandschutz funktionsfähig bleibt.

Die Auswahl der Dicke des Brandschutzmaterials erfordert die Berücksichtigung folgender Faktoren:

- (a) die Schwere des Brandes, und der zu erwartenden Temperaturanstieg im Bauteil;
- (b) die Eigenschaften des Brandschutzmaterials;
- (c) die sogenannte ‚kritische Temperatur‘, d.h. die Temperatur, die das geschützte Bauteil erreichen darf bevor ein Einsturz stattfindet.

Die Regeln für die Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit einer Konstruktion sind in den Eurocodes (Abschnitt 5) angegeben

2.2 Bemessung nach den Eurocodes

Eine vollständige Tragwerksbemessung im Brandfall benötigt die kombinierte Anwendung einiger Eurocodes. Absatz 2.1 der EN 1991-1-2 listet die vier Hauptschritte bei solch einer Tragwerksbemessung auf:

- die Auswahl der maßgebenden Brandszenarien für die Bemessung,
- die Bestimmung der entsprechenden Bemessungsbrände,
- die Berechnung der Temperaturentwicklung in den Bauteilen,
- die Berechnung des Tragverhaltens des Tragwerks unter Brandbeanspruchung mit Hilfe von EN 1993-1-2 für Stahlkonstruktionen.

2.2.1 Bemessungsbrandfälle

Absatz 2.2 der EN 1991-1-2 beschreibt wie einen Bemessungsbrandfall ausgewählt wird.

Beim Brandschutz führt ein Ansatz mit festgelegten Vorgaben oft zur Anwendung der Einheits-Temperaturzeitkurve. Diese ist eine der drei in der Eurocode gegebenen nominellen Temperaturzeitkurven und soll den Temperaturanstieg bei einem voll entwickelten Vollbrand modellieren (Abschnitt 2.2.2 dieses Dokuments).

Die meisten Bürogebäude-Konstruktionen besitzen eine ungefähre Standardgröße und -form und beim Brandschutz wird ein Ansatz mit festgelegten Vorgaben als

ausreichend befunden. Die Dicke des Brandschutzmaterials wird unter der Annahme bestimmt, dass die Bauteile den Flammen direkt ausgesetzt werden und der Brand die Einheits-Temperaturzeitkurve verfolgt; sie ist abhängig von den Abmessungen des Querschnitts und der erforderlichen Tragfähigkeit im Brandfall.

Für bestimmte Arten von Konstruktionen, wie Flughäfen und andere große, offene Gebäude, ist die Anwendung der Einheits-Temperaturzeitkurve jedoch nicht immer angebracht; eine Bemessung auf der Basis der Eigenschaften des aktuellen Brandes ist zu präziseren und wird in der Regel zu wirtschaftlicheren Bemessungen führen. Solch ein Ansatz nennt man einen auf leistungsabhängigen Festlegungen beruhende Ansatz und er benötigt eine Einsicht sowohl in das Material, das zu einem Brand führen kann, als auch in die Größe und Belüftungscharakteristika des Abschnittes, in dem der Brand eingegrenzt wird. Die Auswahl des passenden Bemessungsbrandfalles sowie der Modellierungstechniken sind wichtig, um die Eignung der Bemessung zu gewährleisten.

2.2.2 Vollbrand

Ein voll entwickelter Vollbrand entsteht, wenn das ganze brennbare Material in einem Abschnitt sich gleichzeitig entzündet; dies passiert am Punkt des Feuerüberschlags. Man kann mit gutem Grund davon ausgehen, dass die Temperatur innerhalb des Abschnittes über den gesamten Abschnitt gleichmäßig ist. Bild 2.1 zeigt ein Beispiel eines Vollbrandes.



Foto: Czech Technical University in Prague

Bild 2.1 Ein Vollbrand

2.2.2.1 Einheits-Temperaturzeitkurve

Die Einheits-Temperaturzeitkurve aus EN 1991-1-2 kann verwendet werden, um innerhalb des Brandabschnittes die Temperaturschwankung mit der Zeit zu beschreiben. Die Kurve dient lediglich als Referenzkurve und hat nicht die Bestimmung, ein spezifisches Brandszenario darzustellen. In den meisten Fällen ist sie sehr konservativ im Vergleich zu erfassten Daten. Der Temperaturverlust, nach dem das brennbare Material aufgebraucht ist, wird nicht berücksichtigt.

Die Einheits-Temperaturzeitkurve wird ausgedruckt als:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

Dabei ist:

θ_g die Gastemperatur im Brandabschnitt

t die Zeit in Minuten.

Bild 2.2 zeigt die durch die Zeit-Temperaturabhängigkeit definierte Standard-Brandkurve.

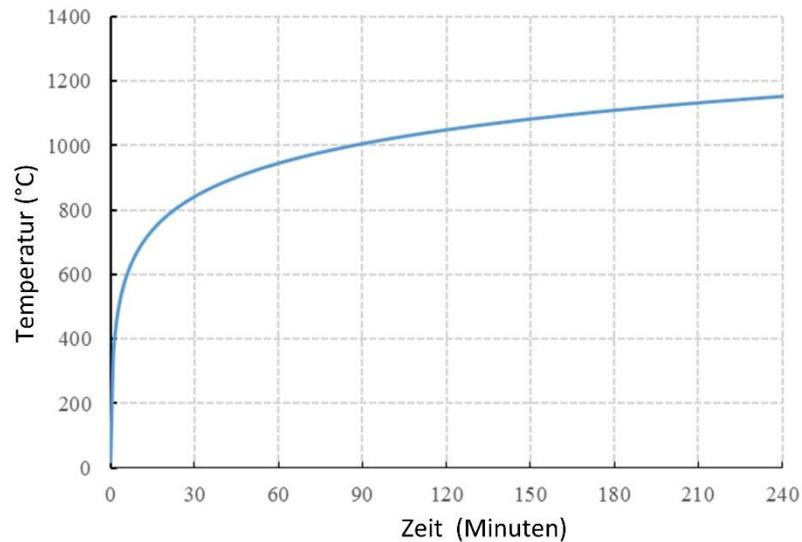


Bild 2.2 Einheits-Temperaturzeitkurve

2.2.2.2 Andere Ansätze zur Brandschutzbemessung

Die Anwendung der Einheits-Temperaturzeitkurve führt tendenziell zur Bereitstellung von Brandschutz, der für die meisten normalen Konstruktionen wirtschaftlich vertretbar ist. Für manche Bemessungen könnten detailliertere und realistischere Analysen eventuell verlangt werden, die zu niedrigeren Auslegungstemperaturen führen könnte.

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Schwere eines Vollbrandes, darunter:

- die Art, Dichte und Verteilung des brennbaren Stoffes,
- die Größe und Geometrie des Brandabschnittes, und
- die Ventilation und Luftströmung.

Alternativ kann die Temperaturzeitkurve des Brandabschnittes unter Anwendung von Naturbrandmodellen, wie dem parametrischen Temperatur-Zeit-Modell (gemäß EN 1991-1-2 Anhang A), einem Zonen-Modell (gemäß EN 1991-1-2 Anhang D) oder dem numerischen Strömungsmechanik (CFD) Modell (siehe Abschnitt 2.2.4 für weitere Details) ermittelt werden. Diese Modelle erlauben eine Berechnung der Gastemperatur im Brandabschnitt als Funktion der Brandabschnittsgeometrie, der Ventilationsbedingungen, der thermischen Eigenschaften der Grenzen des Brandabschnittes, der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der Brandlastdichte. Es ist zu beachten, dass in den Nationalen Anhängen mancher Länder die Anwendung von EN 1991-1-2 Anhang A nicht erlaubt ist.

2.2.3 Lokaler Brand (kein Vollbrand)

Das Vollbrand-Szenario geht von einem gleichmäßigen Anstieg der Brandabschnitt-Temperatur aus. Dies ist realistisch, wenn die Brandabschnitte einigermaßen klein sind und die Brandlast gleichmäßig verteilt ist. Aber mit zunehmender Größe des Brandabschnittes oder im Falle, dass die Brandlast sich in einem relativ kleinen Bereich befindet, wird diese Annahme tendenziell zunehmend konservativ. In solchen Fällen führt ein Ansatz, der die Variation der Temperatur mit Position berücksichtigt, zu deutlich weniger konservativen Ergebnissen, allerdings ist die zur Erstellung des Temperaturprofils erforderliche Analyse eine deutlich komplexere.

Abschnitt 3 umfasst Analysen, die Modelle für lokale Brände anwenden.

2.2.4 Numerische Strömungsmechanik (CFD)

Ein Brand stellt eine komplexe Mischung aus physikalischen Erscheinungen dar und dies bedeutet, dass einfache Ansätze nicht immer verwendet werden können, um die mit dem Bemessungsbrandfall verbundenen Temperaturen genau zu reproduzieren. In solchen Fällen können ausgeklügelte Software-Modelle auf der Basis der numerischen Strömungsmechanik (CFD) dem Konstrukteur die beste verfügbare Darstellung des Brandes bieten. CFD kann verwendet werden, um alle vorstellbaren Brandszenarien, einschließlich voll entwickelter Brände, lokaler Brände, Brände außerhalb von Gebäuden, usw. zu modellieren.

Die Nachahmung der physikalischen Erscheinungen, die für die genaue Darstellung eines Brandes erforderlich sind, ist äußerst schwierig. Insbesondere kann man die Turbulenz bei einer beliebigen Größe nicht genau berechnen; stattdessen werden in der Regel eine Anzahl von semi-empirischen Modellen verwendet, um die Gesamtauswirkungen anzunähern. Die Palette potentieller Modelle ist groß und es ist erforderlich, das geeignetste Modell für eine bestimmte Situation sorgfältig auszuwählen. Aus diesem Grund wird CFD typischerweise nur von Experten verwendet.

Eine hilfreiche Einführung in die Anwendung von CFD-Techniken zur Brandmodellierung ist zu finden in *Guide to the advanced fire safety engineering of structures* ^[9].

3 LOKALE BRÄNDE

Wie schon in Abschnitt 2 erwähnt, nehmen die Regeln für die Anwendung von festgelegten Vorgaben bei der Brandbemessung typischerweise an, dass es sich um einen voll von Flammen eingeschlossenen Brandabschnitt mit gleichmäßiger Temperatur überall im Raum handelt. Solch eine Annahme neigt dazu, bei großen Brandabschnitten besonders beschwerlich zu sein. Der auf Leistung basierte Brandschutz ermöglicht dem Nutzer das tatsächliche Verhalten von echten Bränden, die oft räumlich eng begrenzt sind, zu berücksichtigen. In solchen Fällen ist es äußerst wichtig zu verstehen, wie Brände sich verhalten und wie sie sich auf anderen Bereiche des Brandabschnittes auswirken.



Bild 3.1 Laborversuch an einer Stütze innerhalb eines lokalen Brandes

3.1 Bisherige Untersuchungen und Einfügung im Eurocode

EN 1991-1-2 Anhang C ^[2] umfasst leistungsabhängiger Brandschutz unter Anwendung von lokalen Bränden. Er beinhaltet eine Methode zur Berechnung der Flammenlänge und der Temperaturen in der Plume eines lokalen Brandes. Sie beruht auf Arbeiten von Heskestad^[10] und Hasemi^[11], die eine Korrelation zwischen der Brandgröße (bestimmt durch die Wärmefreisetzungsrate und den Durchmesser) und anderen Parameter, einschließlich der Höhe der Flamme und der Temperatur des Brandes, bieten.

Brände, die auf die Decke aufprallen, neigen zu einer radialen Ausbreitung. Beim Berechnen der Temperaturverteilung innerhalb des Brandabschnittes wird dies vom Modell berücksichtigt. Bild 3.2 zeigt die beiden Situationen.

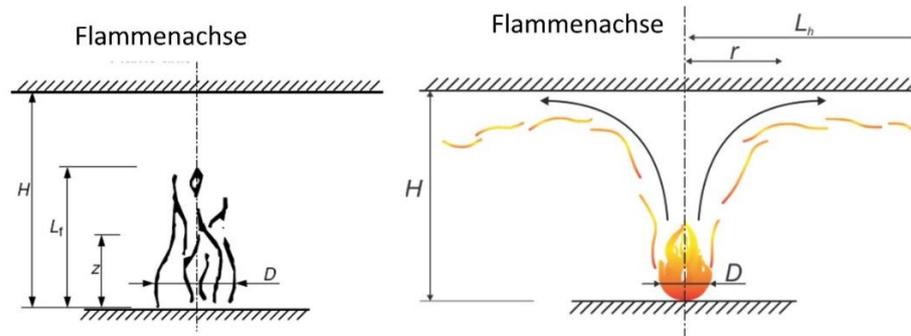


Bild 3.2 Schlüsselparameter beim Beschreiben eines lokalen Brandes (rechts erreicht der Brand die Decke, links nicht)

EN 1991-1-2 Anhang C beinhaltet keine Methode zur Feststellung der Temperatur oder der empfangenen Wärmestromdichte eines Bauteils in einem bestimmten Abstand zur Brandquelle. Ferner benutzt die Methode in diesem Anhang eine Emissivität der Flamme von 1,0, was im Vergleich zu den Ergebnissen aus Versuche tendenziell zu konservativeren Werten führt. Im Rahmen des LOCAFI-Projektes des „Research Fund for Coal and Steel (RFCS)“ der Europäischen Union wurde an einer Verbesserung der Methodik für die lokalen Brände aus Anhang C gearbeitet. Mithilfe einer Reihe von Versuchen und anschließender numerischen und analytischen Arbeiten wurden Verbesserungen der Methodik vorgeschlagen, die sich mit diesen Beschränkungen befassen.

Das verbesserte Modell wird in Abschnitt 4 vorgestellt und ist im Anhang A dieses Dokumentes detailliert dargestellt. Abschnitt 3.2 beschreibt die für die Kalibrierung und Verifizierung des Modells durchgeführten Versuche.

3.2 Versuche und Kalibrierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Versuche, die unternommen wurden, um ein verbessertes thermisches Modell für lokale Brände zu entwickeln. Die kompletten Details sind den im Text erwähnten „Deliverables“ (Arbeitsergebnisse) des LOCAFI-Projektes zu entnehmen.

3.2.1 Versuche an der Universität von Lüttich

Die ersten Versuche, die im Rahmen des LOCAFI-Projektes unternommen wurden, sind an der Universität von Lüttich durchgeführt worden. Insgesamt wurden 24 Einzelbecken-Versuche durchgeführt. Die kompletten Details sind dem Deliverable 6 des LOCAFI-Projektes ^[12] zu entnehmen

Zwei verschiedene brennbare Flüssigkeiten wurden verwendet, und die Versuche wurden so ausgeführt, dass die gleiche Wärmefreisetzungsrate (HRR) erreicht wurde. Die verwendeten Flüssigkeiten waren n-Heptan und Diesel.

Es wurden Versuche mit und ohne einer Stütze in der Mitte des Brand-Pools durchgeführt. Das Vorhandensein der Stütze schien keinen wesentlichen Einfluss auf die HRR zu haben.



Bild 3.3 2-m-Versuchspfanne mit einem Mechanismus zur Brennstoffzuführung (aus LOCAFI Deliverable 15 15^[13])

Becken mit fünf verschiedenen Durchmessern, von 600 mm bis 2200 mm, wurden mit einem flüssigen Brennstoff beaufschlagt. Jeder Durchmesser wurde sowohl mit n-Heptan als auch mit Diesel unter Anwendung identischer Konfigurationen untersucht. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Versuchen wurde der Brennstoff mit einer festen Lieferrate dem Becken zugeführt, anstatt den Versuch mit dem kompletten Brennstoffvolumen in dem Becken anzufangen. Dieser Kontrollmechanismus ermöglicht es, die HRR bei etwa 500 kW/m² konstant zu halten.

Die HRR für die Lüttich-Versuche wurde mit Hilfe Gleichung (3.1) errechnet, wobei 675 die Dichte des Brennstoffs (in kg/m³) ist und 44000 die Verbrennungsenthalpie (in kJ/kg) ist. Diese Formel ist in LOCAFI Deliverable D8 ^[16] dargestellt:

$$HRR = \frac{Flow}{60} \times \frac{675}{1000} \times 44000 \quad (3.1)$$

Tabelle 3.1 zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten Versuche.

Tabelle 3.1 Zusammenfassung der von der Universität von Lüttich durchgeführten Versuche

Versuchsnummer	Durchmesser (m)	Brennstoff	Gemessener HRR (kW)
1	0,6	Diesel	185
2	0,6	Heptan	173
3	0,6	Diesel	154
4	0,6	Heptan	149
5	1,0	Diesel	505
6	1,0	Heptan	485
7	1,0	Diesel	474
8	1,0	Heptan	455
9	1,4	Diesel	979
10	1,4	Heptan	950
11	1,4	Diesel	955
12	1,4	Heptan	921
13	1,4	Diesel	979
14	1,4	Heptan	950
15	1,8	Diesel	1620
16	1,8	Heptan	1569
17	1,8	Diesel	1565
18	1,8	Heptan	1515
19	2,2	Diesel	2421
20	2,2	Heptan	2341
21	2,2	Diesel	2365
22	2,2	Heptan	2292
23	Holz		
24	Holz		

3.2.2 Versuche bei FireSERT (Universität von Ulster)

Insgesamt wurden 52 Versuche bei FireSERT (Universität von Ulster) durchgeführt und sie umfasste eine große Bandbreite an Brandgrößen und -positionen. Die Versuche wurden in zwei Phasen aufgeteilt: Versuche ohne Decke (Tabelle 3.2) und mit Decke (Tabelle 3.3).

Alle Einzelheiten der Versuche sind Deliverable 7 des LOCAFI-Projektes zu entnehmen ^[14].

3.2.2.1 Brandversuche ohne Decke

Als Teil der ersten Arbeitsphase wurden 31 Versuche durchgeführt (Tabelle 3.2). Der Abstand zwischen der Stütze und dem Brand wurde variiert, um verschiedene Brandlast- und Positionsszenarien zu untersuchen. Die Brennstofflasten wurden nach Brennstofftyp (Diesel, Kerosin und Holzgestelle), gesamter Brandfläche (Anzahl und Größe der Becken) und -position variiert. Mehrere unterschiedliche Stahlstützen wurden auch verwendet und ermöglichten das Messen der Wirkungen von Variationen in der Stahlform bzw. -größe auf die Temperaturen und Wärmeströme. Die HRR mit verschiedenen Brennstoffen wurde auch gemessen, um EN 1992-1-2 Anhang C zu verbessern und erweitern.

Wie im LOCAFI Deliverable 8-9^[16] erwähnt, wurde eine Diskrepanz zwischen den gemessenen Werte der Wärmefreisetzung und der aus der Kombination der Brandgröße und dem brennbaren Material zu erwartenden Wärmefreisetzung festgestellt. Eine Korrektur der Messwerte wurde zum Zwecke der numerischen Modellierung verwendet. Sowohl die ursprünglichen Messungen als auch die korrigierten Werte sind in Tabelle 3.2 bzw. Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.2 Zusammenfassung der von FireSERT durchgeführten Versuche, ohne Decke

Versuchs- Nummer	Brennstoff	Durchmesser und Anzahl der Behälter	HRR (kW)	
			Gemessen	Korrigiert
Stütze O2 - O1	Kerosin	0,7 m	783	503
Stütze O2 - O2	Kerosin	0,7 m	728	515
Stütze O2 - O3	Diesel	0,7 m	640	468
Stütze O2 - O4	Diesel	0,7 m	543	442
Stütze O2 - O5	Diesel	0,7 m	485	388
Stütze O2 - O6	Diesel	0,7 m	640	441
Stütze O2 - O7	Kerosin	0,7 m	658	493
Stütze O2 - O8	Kerosin	1,6 m	4378	3492
Stütze O2 - O9	Kerosin	0,7 m × 4	3388	2665
Stütze O2 - O10	Diesel	1,6 m	3617	2725
Stütze O2 - O11	Diesel	0,7 m × 4	2601	2015
Stütze O2 - O12	Kerosin	1,6 m	3713	2648
Stütze O2 - O13	Diesel & Kerosin	0,7 m × 2	2899	2428
Stütze O2 - O14	Holz	0,5 m, würfelförmig	1944	1433
Stütze I2 - I1	Kerosin	0,7 m	737	529
Stütze I2 - I2	Kerosin	0,7 m	663	484
Stütze I2 - I3	Kerosin	0,7 m	692	559
Stütze I2 - I4	Kerosin	0,7 m	806	637
Stütze I2 - I5	Diesel	0,7 m	688	578
Stütze I2 - I6	Diesel	0,7 m	658	513
Stütze I2 - I7	Diesel	0,7 m	547	466
Stütze I2 - I8	Diesel	0,7 m	676	484
Stütze I2 - I9	Kerosin	1,6 m	4762	3750
Stütze I2 - I10	Kerosin	1,6 m	3894	3200
Stütze I2 - I11	Kerosin	0,7 m × 3	2255	1873
Stütze I2 - I12	Kerosin	0,7 m × 2	1439	1192
Stütze I3 - I13	Kerosin	0,7 m	736	570
Stütze I3 - I14	Kerosin	0,7 m	708	525
Stütze I3 - I15	Kerosin	0,7 m	617	520
Stütze I3 - I16	Kerosin	0,7 m × 2	1335	1114
Stütze H2 - H1	Kerosin	0,7 m	641	438
Stütze H2 - H2	Kerosin	0,7 m	610	514
Stütze H2 - H3	Kerosin	0,7 m	628	458
Stütze H2 - H4	Kerosin	0,7 m	630	484
Stütze H2 - H5	Kerosin	0,7 m × 2	1425	1106
Stütze H2 - H6	Kerosin	0,7 m × 3	2402	1771
Stütze H2 - H7	Kerosin	1,6 m	3828	2955

Bild 3.4 zeigt zwei der Versuche. Das Foto links zeigt die Behälter für den flüssigen Brennstoff, die den Branddurchmesser einschränken.



Bild 3.4 Versuchsaufbau zur Untersuchung lokaler Brände bei FireSERT (links: Behälter für die flüssigen Brennstoffe, rechts: Holzgestelle)

3.2.2.2 Brandversuche mit Decke

In der zweiten Phase wurden weitere 21 Fälle untersucht. Wie bei der ersten Phase wurde die Größe des Brandes und seine Position innerhalb des Brandabschnittes variiert. Diese Versuchsreihe ist in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3 Zusammenfassung der von FireSERT durchgeführten Versuche, mit Decke

Versuchs- Nummer	Brennstoff	Durchmesser	HRR (kW)	
			Gemessen	Korrigiert
Decke - O21	Kerosin	0,7 m	739	563
Decke - O22	Kerosin	0,7 m	759	575
Decke - O23	Kerosin	0,7 m	814	511
Decke - O24	Kerosin	0,7 m	763	607
Decke - O25	Kerosin	0,7 m	476	512
Decke - O26	Kerosin	1,6 m	3653	2885
Decke - O27	Diesel	0,7 m	515	496
Decke - O28	Diesel	0,7 m	397	468
Decke - O29	Diesel	0,7 m	633	490
Decke - O30	Diesel	0,7 m	614	472
Decke - O31	Kerosin	0,7 m × 2	1420	1074
Decke - O32	Diesel	0,7 m × 2	1185	952
Decke - O33	Holz	0,5 m, würfelförmig	440	295
Decke - O34	Holz	0,5 m, würfelförmig	400	273
Decke - O35	Holz	0,5 m, würfelförmig × 2	702	666
Decke - O36	Holz	1 × 1 × 0,5 m	1410	1870
Decke - O37	Kerosin	0,7 m × 4	3215	2506
Decke - O38	Holz	1 × 1 × 0,5 m	1788	2253
Decke - O39	Diesel	1,6 m	■	■
Decke - O40	Kerosin	0,7 m	■	■
Decke - O41	Holz	1 × 1 × 0,5 m	■	■

Bild 3.5 zeigt eine Flamme aus dem Versuch ‘Decke - O38’; die Flammeneinwirkung auf die Decke ist deutlich sichtbar.



Bild 3.5 Ein Brand, der auf die Decke aufprallt

3.2.3 Numerische Modellierung

Eine ausführliche numerische Studie wurde zur Unterstützung der Brandversuche durchgeführt. Das Hauptziel dieser Arbeit war die Ableitung der Daten aus der Versuchsdatenbank zur Situationen außerhalb des Rahmens der Versuche, einschließlich Brände von größerem Durchmesser, bei denen die Versuchsdurchführung gefährlich gewesen wäre.

Die „Fire Dynamics Simulator (FDS)“^[15] Software, die die Wärmeübertragung von einem Brand auf der Basis von CFD simuliert, wurde für die numerischen Arbeiten verwendet. In Bild 3.6 wird ein Foto einer echten Flamme während eines Versuchs mit einer mittels der FDS-Software vorausgesagten Flamme verglichen.

Ein Brand ist ein dynamisches und unbeständiges Phänomen, welches rechnerisch sehr schwer vorauszusagen ist. Daher benötigt die FDS-Software einige Eingabeparameter, von denen viele abhängig von den besonderen Gegebenheiten des Versuchs sind. Zu den Modellparametern gehören der Feuerungswirkungsgrad, die Rußausbeute, der anteilige Strahlungsverlust, das Turbulenzmodell, die Turbulenzparameter und die Anzahl der Abstrahlwinkel. Die wichtigsten Eingabeparameter sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

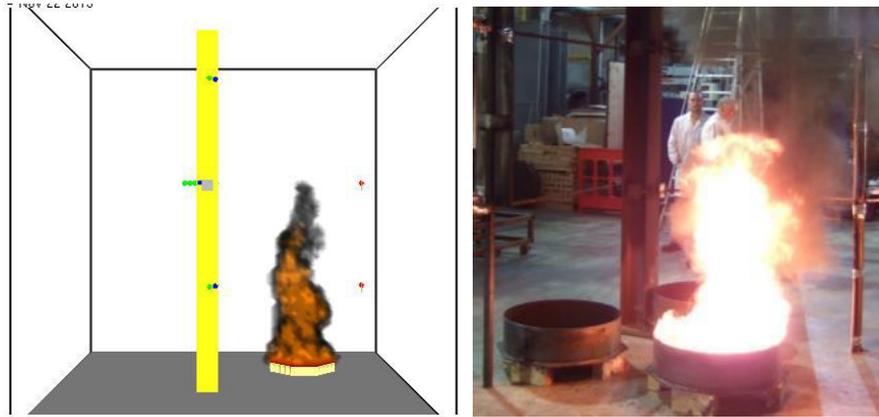


Bild 3.6 Vergleich zwischen der Form einer mittels FDS vorausgesetzten Flamme und einem Foto des Versuchs (FireSERT Versuchsstütze I2 - I11 ^[16])

3.2.3.1 Turbulenzmodell

Die korrekte Wiedergabe von Turbulenz (chaotische Änderungen hinsichtlich Druck und Strömungsgeschwindigkeit) ist ein fundamental wichtiger Bestandteil der meisten CFD-Probleme. Bei einem Brand neigt die Turbulenz zu Änderungen der Flammenhöhe und der Position im Laufe der Zeit. Aktuell ist kein Rechenmodell in der Lage die zur Turbulenz beitragenden physikalischen Vorgänge wiederzugeben. Stattdessen verwenden Programme wie FDS Approximationsalgorithmen, von denen je nach Rahmenbedingungen des Problems jeden unterschiedlichen Vor- und Nachteil in den verschiedenen Situationen haben kann. FDS 5 verwendet das relativ alte aber bewährte „Smagorinsky“-Modell, während FDS 6 die Anwendung einiger anderen Turbulenzmodelle ermöglicht, einschließlich des „dynamischen Smagorinsky“-Modells, des „Vreman“-Modells und des „Deardoff“-Modells ^[17] (welches als das Default-Modell ausgewählt ist).

Einige parametrische Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Temperaturunterschiede bei der Anwendung der verschiedenen Modelle festzustellen. Die Wirkung von Änderungen der Parameter, die das Verhalten innerhalb jedes der modell-bildenden Algorithmen bestimmen, wurde auch untersucht. Am Ende kamen die Untersuchungen zum Ergebnis, dass das „Constant Smagorinsky“-Modell mit einer Smagorinsky-Konstante von 0,1 die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen gab.

Konstrukteure, die CFD-Lösungen verwenden wollen, sollten sich bewusst sein, dass die Auswahl des Turbulenzmodells die numerischen Ergebnisse erheblich beeinflussen kann.

3.2.3.2 Strahlungsanteil

Der Strahlungsanteil ist der Teil der Energie, der vom Brand in Form von thermischer Strahlung abgegeben wird, im Gegensatz zu der durch Konvektion freigesetzten Energie. Wie in Abschnitt 13.1.1 des Handbuches *FDS User Guide* ^[15] erläutert, ist der tatsächliche Anteil der freigesetzten Strahlung eine Funktion der Flammentemperatur und der chemischen Zusammensetzung, und das Programm kann keiner dieser beiden Parameter mit der notwendigen hohen Auflösung berechnen, um ein präzises Ergebnis zu erzielen. Stattdessen verwendet es einen global kalibrierten Wert.

Standardmäßig verwendet FDS einen Wert von 0,35, d.h. 35 % der Wärmeübertragung ist durch Strahlung und 65 % durch Konvektion. Andere Werte für den Strahlungsanteil wurden untersucht und dies führt zu einer anderen

Gewichtung zwischen der Konvektions- und der Strahlungswärme. Die beste Übereinstimmung wurde mit dem Default-Wert erzielt.

3.2.3.3 Seitenwinde

Numerische Simulationen basieren normalerweise auf einem absolut stillen Brandabschnitt. Dies bedeutet, dass die Luft vertikal nach oben steigt und dass die Flammen vertikal sind. Unter realen Bedingungen ist diese Annahme selten der Fall, da sogar die geringste Luftbewegung oft zum „Kippen“ der Flamme führt. Viele der in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Versuche zeigten deutliches Kippen, ein Beispiel zeigt Bild 3.7.



Bild 3.7 Versuch O36, der Flammenkippen beweist

Obwohl während der Versuche nicht systematisch gemessen wurde, war das Flammenkippen klar sichtbar. Deshalb wurde die Einbeziehung des Windes äußerst wichtig, um eine hohe Genauigkeit beim Kalibrieren des Modells zu erreichen.

3.2.4 Schlüsselergebnis

Die LOCAFI-Versuche haben eine große Datenmenge über Konfigurationen geliefert, die zurzeit nicht von EN 1991-1-2 Anhang C erfasst sind.

Die Versuche an der Universität von Lüttich fokussierten auf die Konfigurationen mit einer Stütze, die vollständig von Flammen eingeschlossen war. Der Einfluss der Stütze auf die Höhe und Temperatur der Flamme in unterschiedlichen Höhen wurde untersucht und die Ergebnisse zeigten, dass das Vorhandensein einer Stütze zu einer höheren Flamme führt. Dennoch bleiben die durch EN 1991-1-2 vorausgesagten Höhen und Temperaturen der Flamme entlang der vertikalen Achse auf der sicheren Seite, egal ob es mit oder ohne Stütze in der Flamme (brennende Zone) oder der Plume (nicht-brennende Zone) handelt.

Die Versuche an der Universität von Ulster fokussierten auf Konfigurationen mit der Stütze außerhalb des Brandes. Diese Versuche zeigten, dass die durch EN 1991-1-2 vorausgesagten Höhen und Temperaturen der Flamme entlang der vertikalen Achse der Brandquelle auf der sicheren Seite lagen. Ferner lieferten diese Versuche eine große Menge Daten zur Kalibrierung einer Methode zum Voraussagen der empfangenen Wärmestromdichte bei einer außerhalb der Brandes positionierten Stütze. Die Versuche wurden mit und ohne Decke durchgeführt und haben gezeigt, dass der Wind einen großen Einfluss auf die in der Nähe der Brandquelle gemessenen Temperaturen und Wärmeströme hat, während man feststellte, dass abseits des Brandes die Wärmestromdichte weitgehend unverändert blieb.

4 NEUES MODELL FÜR DIE BRANDBEANSPRUCHUNG VON STÜTZEN IN LOKALEN BRÄNDEN

4.1 Grundsätze und Anwendungsbereiche

Infolge der Ergebnisse des in Abschnitt 3 beschriebenen Versuchsprogramms wurde ein neues Modell für die Brandbeanspruchung von Stützen in lokalen Bränden entwickelt. Das neue Modell wurde mittels der Wärmestrommessungen aus dem Versuchsprogramm verifiziert und es hat sich herausgestellt, dass es in allen Fällen annehmbar konservative Ergebnisse liefert.

Das Schlüsselkonzept ist die Diskretisierung des Brandes in einer virtuellen soliden Flamme; in ihrer einfachsten Form besteht die Flamme aus Zylinder und Ringe, bei fortgeschrittener Modellierung aus glatten Formen (Bild 4.1).

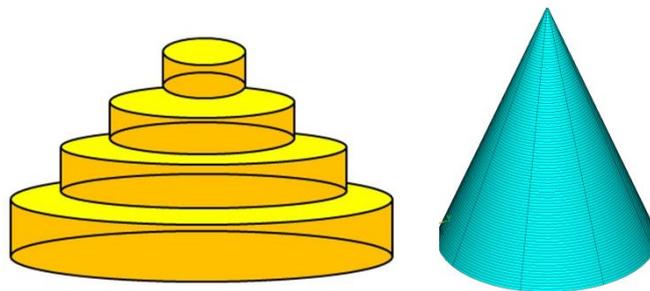


Bild 4.1 Modellierung eines lokalen Brandes mittels zylindrischer oder konischer Diskretisierung

Standard Modellierungstechniken für Wärmeübertragung durch Strahlung können verwendet werden, um den Strahlungsanteil des Wärmestromes von einer virtuellen soliden Flamme an einem beliebigen Punkt im Raum zu berechnen. Ist die Wärmestromdichte bekannt, kann die Temperatur einer Stahlstütze an einer beliebigen Position im Brandabschnitt bestimmt werden.

Ist die Stütze innerhalb der Flamme, wird die Temperatur hauptsächlich von Wärmeübertragung durch Konvektion bestimmt, wenn sie sich jedoch außerhalb der Flamme befindet (Bild 4.2) wird die Temperatur hauptsächlich von Wärmeübertragung durch Strahlung bestimmt.

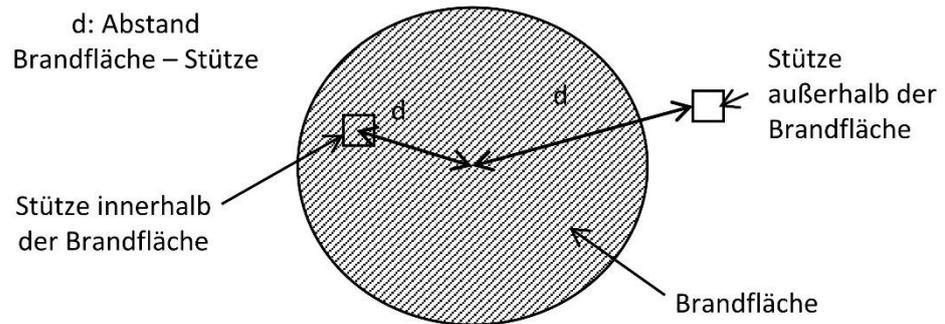


Bild 4.2 Relative Position des Brandes zur Stütze

Bei diesem Modell wird angenommen, dass die Form des Brandes am Boden kreisförmig ist; der vorgesehene Anwendungsbereich des Modells umfasst lokale Brände mit einem maximalen Durchmesser von 10 m und einer maximalen HRR von 50 MW.

Die Höhe des von einer Stütze empfangenen Wärmestroms hängt davon ab, in welcher der folgenden vier Zonen sie sich befindet:

- 1) außerhalb des Brandes,
- 2) innerhalb des Brandes,
- 3) innerhalb des Brandes, in der Rauchschrift,
- 4) außerhalb des Brandes, in der Rauchschrift.

Die vier Zonen sind in Bild 4.3 dargestellt.

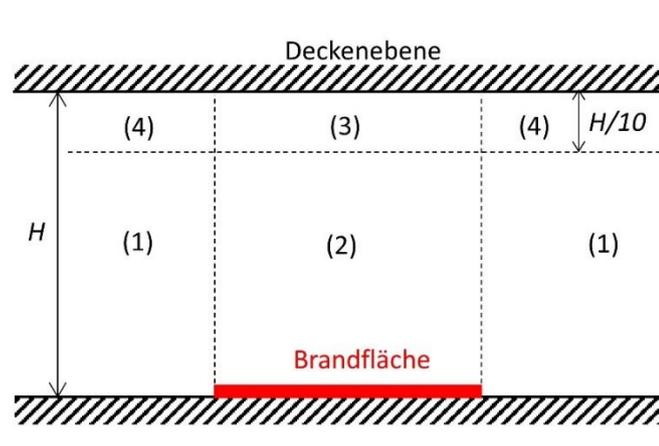


Bild 4.3 Zonen zur Modellierung der Auswirkungen lokaler Brände

Vor dem LOCAFI-Projekt existierten schon einige Modelle für Zonen 2, 3 und 4 aber kein Modell für Zone 1.

Das neue Modell deckt alle Situationen ab, mit besonderer Aufmerksamkeit auf Zone 1; es wird im Anhang A dieses Dokumentes detailliert dargelegt. Abschnitt A.2 beschreibt das Modell für Stützen außerhalb der Brandfläche d.h. Zonen 1 und 4. Abschnitt A.3 beschreibt das Modell für Stützen innerhalb der Brandfläche, nämlich Zonen 2 und 3.

Die meisten Brände haben eine konische Form. Der Mittelpunkt des Konus kann sich aber infolge des Windes bewegen. Aus diesem Grund werden die Zonen 2 und 3 als Zylinder angenähert, mit Seiten die parallel zum Rand des Brandes verlaufen.

Der empfohlene Wert für die Höhe der Zonen 3 und 4 ist $H/10$, aber dieser kann wie im Anhang A erklärt angepasst werden.

Die Methode wird in zwei globale Schritte geteilt: die Berechnung der beim Stützensegment einfallenden Wärmestromdichte und dann die Berechnung der Temperatur des Segmentes.

4.2 Designwerkzeuge zur Modellierung der Wärmeströme lokaler Brände

Das analytische Modell zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Stahlstützen in einem lokalen Brand ist ziemlich komplex und nicht für den Gebrauch im Konstruktionsbüro geeignet. Dieser Abschnitt beschreibt vier Designwerkzeuge, die das Modell im Anhang A dieses Dokumentes umsetzen.

4.2.1 Konturdiagramme

4.2.1.1 Einführung

Dieser Abschnitt beschreibt eine schnelle Methode zur Berechnung von Wärmestromdichten auf der Basis von Konturdiagrammen. Die Diagramme werden mit Hilfe des im Anhang A beschriebenen Modells erzeugt und ermöglichen die Berechnung der Wärmestromdichte jener Stelle, die für den Nutzer von Interesse ist, ohne jedoch detaillierte Berechnungen durchführen zu müssen.

Die Konturdiagramme zeigen die Wärmestromdichte in festen Abständen in der vertikalen und in der horizontalen Richtung vom Brand entfernt (spezifiziert durch seinen Durchmesser und seine HRR).

Wärmestromdichten für Zone 2 werden nach dem Modell von Heskestad berechnet (wie in Abschnitt A.3 beschrieben) und auch im Diagramm dargestellt.

Konturdiagramme für einige anderen Fälle sind im Anhang C zu finden.

4.2.1.2 Anwendung von Konturdiagrammen bei der Bemessung

Um ein Konturdiagramm zu verwenden, muss der Konstrukteur den Bemessungsbrandfall wie folgt vereinfachen:

Schritt a) Die Form des Brandes wird als eine äquivalente kreisförmige Fläche dargestellt.

Schritt b) Die Stütze wird als ein äquivalentes rechteckiges Profil modelliert (EN 1991-1-2 Anhang G^[2]).

Schritt c) Die Stütze wird so rotiert, dass die breiteste Seite des Rechtecks senkrecht zum Brand steht.

Schritt a)

Wenn bei einem lokalen Brand der Haupt-Brennstoff nicht kreisförmig ist, sollte er als einen Kreis mit einem nach Gleichung (4.1) berechneten Durchmesser modelliert werden:

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad \text{m} \quad (4.1)$$

Dabei ist:

- D_{fire} der äquivalente Durchmesser (m)
 S die Fläche des lokalen Brandes (m^2).

Für komplexe Formen oder Formen mit einem Querschnittsverhältnis (Länge/Breite) größer als 2 wird empfohlen, die Brandfläche in kleineren Bränden aufzuteilen, die sich leichter in kreisförmigen Bereichen annähern lassen. Die Wärmestromdichten der vielen kleineren Brände können zusammenaddiert werden, wie in Abschnitt A.4 behandelt.

Schritt b)

Unabhängig von ihrem Originalquerschnitt wird eine rechteckige Umhüllung um den Querschnitt der Stütze gezeichnet (Bild 4.4). Dieser Ansatz ist im Einklang mit den Annahmen in Anhang G der EN 1991-1-2. Die Vereinfachung der Querschnittsgeometrie vermeidet die Notwendigkeit, komplexe Phänomene wie dem Abschirmeffekt (wobei ein Teil des Querschnitts andere Teile vor einfallender Strahlung „beschattet“) zu berücksichtigen.

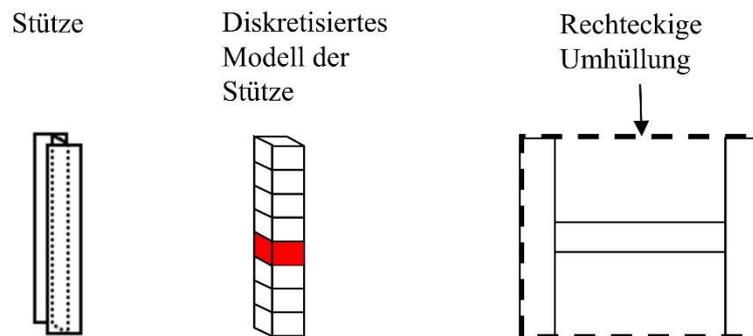


Bild 4.4 Modellierung einer H-Stütze und detaillierte Modellierung eines Stützensegments

Schritt c)

Die Orientierung wird definiert in Bezug auf eine Linie, die die Stütze mit der Mittellinie der Brandquelle verbindet (Bild 4.5).

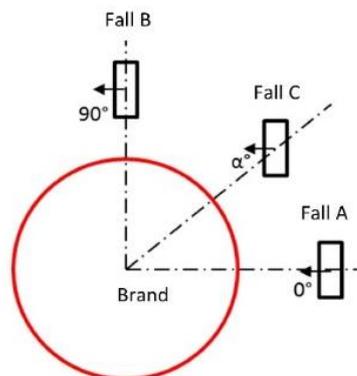


Bild 4.5 Mögliche Orientierungen der Stütze

Zu Bemessungszwecken sollte die Stütze so rotiert werden, dass die breiteste Seite der rechteckigen Umhüllung senkrecht zur Mittellinie steht, welche die

konservativste Annahme darstellt (Fall A in Bild 4.5). Der Berechnungspunkt aller Seiten wird konservativ als der Mittelpunkt der zum Brand senkrecht liegende Seite angenommen; dieses wird in Abschnitt B.1.2 behandelt.

Der Abstand entlang der x-Achse wird als die Länge zwischen dem Mittelpunkt der Stützenseite und dem Mittelpunkt des Brandes angenommen.

Wahrscheinlich existiert kein Konturdiagramm mit den exakten Eigenschaften des äquivalenten Brandes. In diesem Fall sollte das Konturdiagramm mit der nächsthöheren HRR und Durchmesser gewählt werden. Dies ergibt ein konservatives Ergebnis.

Nachdem die Wärmestromwerte vom Konturdiagramm abgelesen worden sind, kann mit Hilfe Gleichung (4.2) die mittlere vom Abschnitt durch Strahlung empfangene Wärmestromdichte berechnet werden. Die Werte sind gemäß der Breiten der Seiten gewichtet.

$$\dot{h}_{m,r} = \frac{l_1 \dot{h}_{r,1} + 2l_2 \dot{h}_{r,2}}{2l_1 + 2l_2} \quad (4.2)$$

Dabei ist:

- $\dot{h}_{m,r}$ die mittlere vom Abschnitt durch Strahlung empfangene Wärmestromdichte,
- $\dot{h}_{r,1}$ die von Seite 1 des Abschnittes empfangene Wärmestromdichte, abgelesen vom entsprechenden Konturdiagramm,
- $\dot{h}_{r,2}$ die von Seite 2 des Abschnittes empfangene Wärmestromdichte, abgelesen vom entsprechenden Konturdiagramm.

Als konservative Vereinfachung kann die Wärmestromdichte der 90°-Seiten als 50 % der empfangenen Wärmestromdichte der 0°-Seite angenommen werden.

Für Stützen mit Seiten, die nicht senkrecht zum Brand orientiert sind, wie Fall C in Bild 4.5, ist es erforderlich, die Seitenbreiten wie in Bild 4.6 dargestellt zu ändern, bevor die Konturdiagramme verwendet werden können.

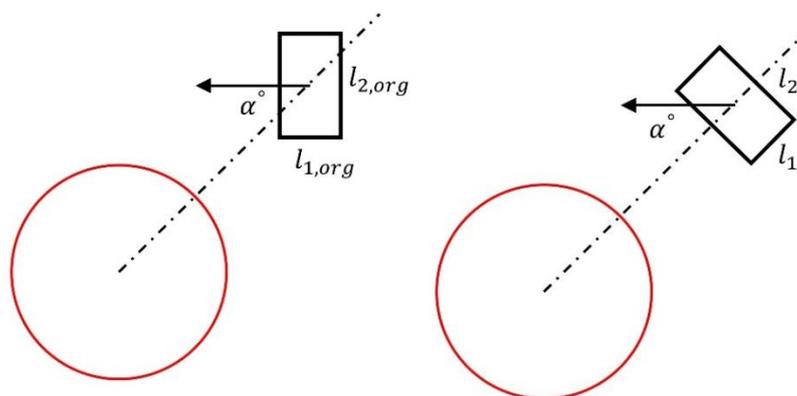


Bild 4.6 Korrektur bei Stützen, die nicht senkrecht zum Brand orientiert sind

Die Originalbreiten sind $l_{1,org}$ und $l_{2,org}$. Die veränderten Breiten ergeben sich aus

$$l_2 = l_{1,org} \times \sin \alpha + l_{2,org} \times \cos \alpha \quad (4.3)$$

$$l_1 = (l_{1,org} + l_{2,org}) - l_2 \quad (4.4)$$

Die Wärmestromdichte wird dann nach Gleichung (4.2) berechnet.

Die Konturdiagramme gehen davon aus, dass die Flamme nicht auf die Decke einwirkt. Falls durch Anwendung Gleichung (A.2) festgestellt wird, dass solch eine Einwirkung auf die Decke stattfindet, soll der Konstrukteur die „heiße Zone“ (Zone 4 in Bild 4.3) zusätzlich berücksichtigen. Die Wärmestromdichte in dieser Zone sollte mittels Gleichung (A.21) berechnet werden. In den meisten Fällen wird die Wärmestromdichte in Zone 4 höher als in Zone 1 liegen (abgedeckt durch die Konturdiagramme). Daher wird die höchste Stütztemperatur, welche in Abschnitt 5 zur Berechnung der Tragfähigkeit im Brandfall verwendet werden sollte, in Zone 4 liegen.

4.2.2 Werkzeuge für Tabellenkalkulationen

Man kann erhöhte Genauigkeit erreichen, wenn man die Berechnung unter Anwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms mit Hilfe des Modells in den Anhängen A und B dieses Dokumentes durchführt. Eine Tabellenkalkulation kann den tatsächlichen Sichtfaktor zwischen dem Brand und den Seiten des Abschnittes berücksichtigen. Beispiele von Tabellenkalkulations-Berechnungen sind in Bild B.9 und Bild B.11 zu sehen.

Da Wärmeübertragung ein komplexer Vorgang ist, sind die erforderlichen Gleichungen zahlreich und lang. Nicht-Experten wird empfohlen, diese Berechnung nicht selbst umzusetzen.

4.2.3 OZone

Als Alternative zu einer Berechnung per Hand oder zur Entwicklung eines eigenen Analysewerkzeugs stehen dem Konstrukteur einige Softwarewerkzeuge zur Verfügung, die zur Implementierung des LOCAFI thermischen Modells entwickelt worden sind. OZone ist ein leicht zugängliches Werkzeug zu diesem Zweck.

OZone ist eine benutzerfreundliche Software, die die thermischen Einwirkungen eines Brandes und die Temperaturentwicklung in einem Stahlbauteil berechnet. OZone beinhaltet nominelle Brandkurven sowie zwei Arten von Naturbrandmodellen: lokale Brände und Vollbrände. Zusammen mit anderer von ArcelorMittal entwickelter brandspezifischer Software ist OZone hier zu finden:

<http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html>

Bei Vollbränden ermöglicht OZone die Anwendung von Ein- oder Zweizonenmodellen wie in EN 1991-1-2 Anhang D definiert. Die Hauptannahme bei den Zonenmodellen ist, dass die Brandabschnitte in Zonen unterteilt sind, in denen die Temperaturverteilung zu jedem Zeitpunkt gleichmäßig ist. Bei Einzonen-Modellen wird angenommen, dass die Temperatur innerhalb des gesamten Brandabschnittes gleichmäßig ist. Dieses Modell ist daher gültig für voll entwickelte Brände. Ist der Brand räumlich begrenzt, sind Zweizonen-Modelle besser geeignet. In diesem Fall stellt das Zweizonen-Modell mit einer heißen Schicht in der Nähe der Decke und einer kalten Schicht darunter die Temperaturverteilung im Brandabschnitt besser dar.

In offenen Räumen oder in großen Brandabschnitten, wo kein Feuerüberschlag stattfindet, muss das Verhalten der Konstruktion unter den Bedingungen eines lokalen Brandes analysiert werden. Bei OZone basiert die Vorgehensweise bei einem lokalen Brand auf dem LOCAFI-Modell.

Wie in Abschnitt A.2.1.1 besprochen, modelliert man die Hauptwärmeströme durch Strahlung durch die Darstellung des Brandes als eine virtuelle solide Flamme, die in alle Richtungen ausstrahlt. Die Geometrie der virtuellen soliden Flamme, die einen lokalen Brand und die Temperaturverteilung als Funktion der Zeit darstellt, wird im ersten Schritt dieser Berechnung definiert. Die Form der virtuellen soliden Flamme kann zylindrisch oder konisch sein. Eine Flamme mit einer zylindrischen Form ist das einfachere Modell, aber normalerweise überschätzt sie die Wärmeströme durch Strahlung. OZone anwendet eine konische Form für die virtuelle solide Flamme und es hat sich gezeigt, dass dies eine genauere Vorhersage der Wärmestromdichte bietet.

Für die Fälle, in denen die Flamme höher als die Deckenebene ist, muss der Zylinder oder der Konus als die Deckenhöhe genommen werden. Ein zusätzlicher strahlenförmiger Ring, der das Ausbreiten der Flamme unter der Decke darstellt, sollte außerhalb des Zylinders oder des Konus berücksichtigt werden.

Bei OZone wird die Berechnung der Strahlung ohne die Anwendung von Flächenintegralen (wie bei SAFIR verwendet, siehe Abschnitt 4.2.4). Stattdessen basiert das Modell auf zur Form des Elementes passende Konfigurationsfaktoren, wie in Gleichung (A.9) dargestellt.

Die Wärmestromdichte wird separat für die vier Seiten des Kastenumfangs des Profils berechnet und ein Mittelwert dieser Wärmestromdichten wird für den gesamten Umfang des Stahlprofils verwendet. Dies bedeutet, dass der Abschirmeffekt nicht berücksichtigt wird. Die Verkupplung eines lokalen Brandes mit einem Vollbrand ermöglicht eine Kombination der Einwirkungen der Wärmestromdichten durch Strahlung.

Die für einen lokalen Brand erforderlichen Eingabedaten beinhalten die Position, den Durchmesser und die Entwicklung der HRR über die Zeit für maximal fünf Brände.

Verschiedenen Szenarien können für Naturbrandmodelle verwendet werden. Bei Vollbränden ist es erforderlich, sowohl den Brandabschnitt als auch die Brandverhaltenseigenschaften unter Anwendung von EN 1991-1-2 Anhangs E oder eines nutzerdefinierten Brandes anzugeben.

Wird kein Brandabschnitt definiert, wird angenommen, dass ein lokaler Brand sich in einem offenen Raum entwickelt. Wird ein Brandabschnitt zusammen mit einem lokalen Brand definiert, berechnet OZone die Temperaturen der heißen und kalten Zonen im Brandabschnitt unter der automatischen Berücksichtigung der maximalen Brandfläche als die Summe der Flächen der lokalen Brände. Zur Berechnung der Temperatur schlägt OZone drei Optionen vor: die Temperatur der heißen Zone, die Temperatur des lokalen Brandes, oder der maximale Wert der beiden (in der Software als 'Maximaler Wert der beiden' genannt).

4.2.4 Finite-Elemente-Modelle

Will der Konstrukteur eine höhere Genauigkeit erreichen, kann eine Finite-Elemente (FE)-Software wie SAFIR® oder ANSYS® verwendet werden. Die Anwendung eines Finite-Elemente-Modells reduziert die Anzahl der erforderlichen Vereinfachungen und bietet folgende Vorteile:

- Anstatt einer Reihe von Zylindern und Ringen kann man eine präzisere konische Form der Annäherung der virtuellen soliden Flamme annehmen.
- Die richtige Form der Stütze einschließlich des Abschirmeffekts der Wärmübertragung durch Strahlung kann berücksichtigt werden.

- Die Sichtfaktoren zwischen jeder Seite und der strahlenden virtuellen soliden Flamme können individuell berechnet werden.
- Ein ungleichmäßiges Temperaturprofil über den gesamten Querschnitt kann berechnet werden.
- Ein zusammenhängendes thermomechanisches Verhalten kann berücksichtigt werden. Ein Beispiel hierfür ist die thermische Verkrümmung einer asymmetrisch beheizten Stütze.

Verschiedene Softwarepakete können verwendet werden, um das Modell unterschiedlich anzuwenden, insbesondere hinsichtlich des Diskretisierungsgrades. Um die Themen zu untersuchen, die für die Implementierung berücksichtigt werden müssen, wird hier eine Kurzfassung des SAFIR-Ansatzes gegeben.

SAFIR verwendet zwei Flammenformen: zylindrische und konische. Je nach seiner Präferenz hat der Benutzer die freie Wahl zwischen den beiden. Ein Beispiel einer konischen Flamme zeigt Bild 4.7.

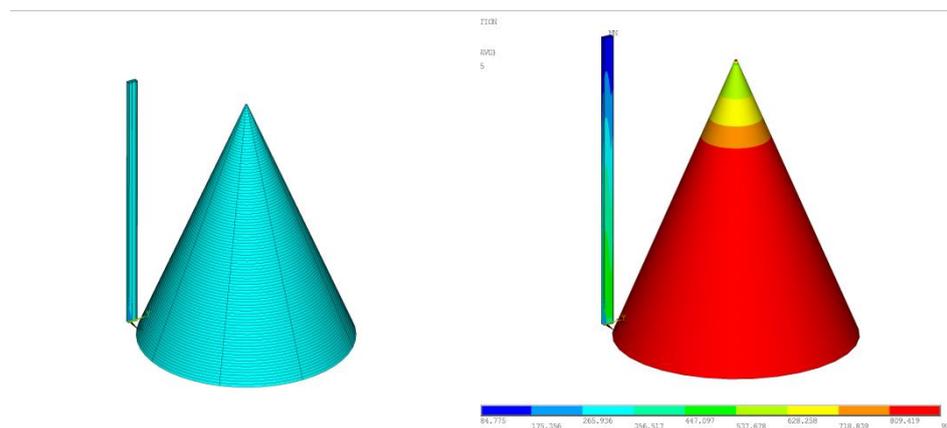


Bild 4.7 Flammenform (links) und Oberflächentemperatur (rechts) bei SAFIR

Das thermische Modell der SAFIR-Software berechnet die Temperatur mit Hilfe einer Serie von zweidimensionalen thermischen Analysen, die an jedem vom Nutzer ausgewählten longitudinalen Integrationspunkt jedes finiten Elementes durchgeführt werden. Diese Elemente können jede räumliche Orientierung aufweisen.

Die Wärmestromdichte wird zu jedem Zeitpunkt separat für jede Seite des finiten Elementes berechnet. Dies bedeutet, dass die vom lokalen Brand beim finiten Element beaufschlagende Wärmestromdichte anisotrop ist; die in Richtung des Brandes orientierten Seiten empfangen den größten Wärmestrom, während die in der Gegenrichtung orientierte Seite keinen Wärmestrom empfängt.

Wenn die Wärmestromdichte von einem lokalen Brand auf einer Seite berechnet wird, werden die Wärmeverluste von der Seite automatisch beim entferntesten Feld zuaddiert, und es wird angenommen, dass dieses sich bei der umgebenden Temperatur befindet.

Die Brandquelle wird in horizontalen Scheiben mit der gleichen Dicke von 0,1 m aufgeteilt. Dies ist kleiner als der empfohlene Wert für die manuelle Berechnung von 0,5 m (siehe Abschnitt A.2.1.1). Jede Scheibe und jeder Ring wird in 36 Sektoren von je 10 Grad unterteilt. Diese Teilungen definieren eine Reihe von Facetten, die die Außenseite der Flamme bilden. Die Wärmestrahlung von jeder Facette wird für jede Seite des Profils berechnet.

Die Konstruktion kann von einer oder mehreren lokalen Brandquellen beansprucht werden. Im Falle von mehreren Bränden werden die Wärmeströme aller Brände zusammenaddiert.

4.3 Bestimmung der Temperatur eines Stützensgments

Dieser Abschnitt beschreibt die Methode zur Berechnung der Temperatur eines Stützensgments auf der Basis der beaufschlagenden Wärmestromdichte. Wie in Abschnitt 5 beschrieben, sind zur Bemessung eines Bauteils die Temperaturen eher erforderlich als die Wärmestromdichten.

Die Wärmefreisetzungsrate (HRR) kann unter Anwendung von EN 1991-1-2 Anhang E ermittelt werden, wobei die HRR-Kurve in drei Phasen geteilt wird (siehe Bild 4.8): eine Wachstumsphase, eine stationäre Phase (wenn überhaupt) in der der Brand brandlast- oder ventilationsgesteuert ist, sowie eine Ausklingphase. Bei solch einem Kurvenverlauf ist die stationäre Phase die kritischste Phase hinsichtlich der thermischen Einwirkungen.

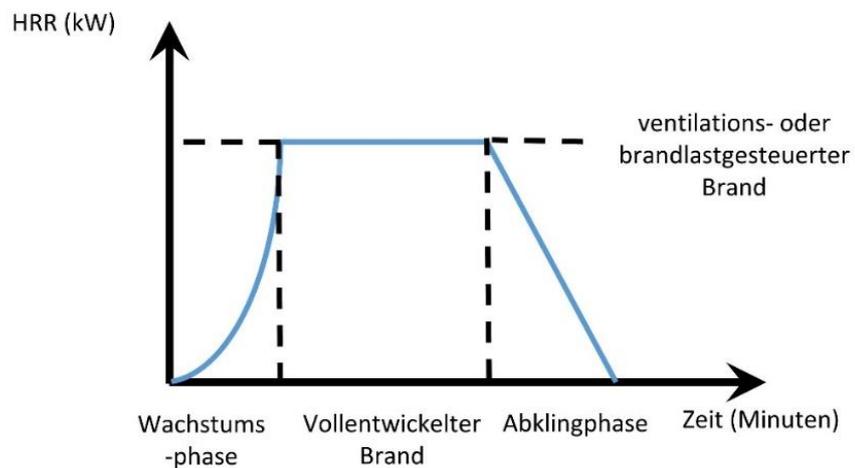


Bild 4.8 HRR-Kurve berechnet nach EN 1991-1-2 Anhang E

Bei einem Brand ist die Wärmefreisetzung ein zeitabhängiger Vorgang, was dafür spricht, dass die Wärmestromdichte in einer Reihe von Zeitschritten berechnet werden sollte. Berücksichtigt man auch, dass die Wärmestromdichte sich mit der Länge der Stütze ändert, vergrößert sich die Anzahl der erforderlichen Berechnungen deutlich.

Fängt ein Segment an, den Wärmestrom vom Brand zu empfangen, steigt seine Temperatur. Während der brandlastgesteuerten Phase bleibt die Wärmestromdichte konstant, was bedeutet, dass eventuell ein Punkt erreicht wird, an dem der vom Segment empfangene Wärmestrom durch den in der Umgebung ausgestrahlten Wärmestrom ausbalanciert wird. Diesen Punkt nennt man die Beharrungstemperatur.

Hat das Segment ein großes Volumen, kann die erforderliche Zeit zum Erreichen der Beharrungstemperatur lang sein. In vielen Fällen dauert die zum Erreichen des stationären Zustandes erforderliche Zeit länger als die Dauer des Brandes, was bedeutet, dass die stationäre Phase nie erreicht wird.

Der konservative Konstrukteur darf annehmen, dass der Beharrungszustand immer erreicht wird. Diese Annahme verringert deutlich den erforderlichen Rechenaufwand, da die Zeitabhängigkeit der Berechnung eliminiert ist. Es kann aber

sein, dass die angenommene Beharrungstemperatur deutlich höher liegt als die tatsächlich erreichte Temperatur. Konstrukteure, die bereit sind, eine wesentlich erweiterte Analyse unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit durchzuführen, beschaffen wahrscheinlich eine kostengünstigere Konstruktion. Die fortgeschrittene Methode wird unten in Abschnitt 4.3.2 als „inkrementelle Methode“ erwähnt.

Die empfohlene Methode zur Feststellung der Temperatur hängt von der Genauigkeit ab, mit der die Wärmestromdichte berechnet werden soll. Die Empfehlungen für die vier in Abschnitt 4.2 dargestellten Methoden sind wie folgt:

- Für Berechnungen mit Konturdiagrammen wird für die stationäre Phase die gesamte Wärmestromdichte verwendet. Die Temperatur wird nach den in Abschnitt 4.3.1 dargestellten Gleichungen berechnet.
- Für Berechnungen mit einer Tabellenkalkulation wird empfohlen, die gesamte von einem Stützensegment empfangene Wärmestromdichte für die folgenden HRR-Werte zu berechnen: 25 %, 50 %, 75 % und 100 % des Maximums. Die Temperatur sollte dann mittels der inkrementellen Methode berechnet werden (Abschnitt 4.3.2).
- OZone führt die Berechnung nach der inkrementellen Methode durch. Keine zusätzlichen Eingabeparameter sind erforderlich.
- FE-Software wird die Fähigkeit besitzen, sowohl Wärmestromdichten als auch Temperaturen in der gleichen Analyse zu ermitteln.

Unterschiedliche Segmente in unterschiedlichen Höhen entlang der Stütze empfangen unterschiedliche Wärmestromdichten und dies führt zu verschiedenen Temperaturverteilungen von Ebene zu Ebene. Diese Unterschiede haben zur Folge, dass entlang der Stütze in Längsrichtung ein konduktiver Wärmestrom entsteht und dieser wird versuchen, die unterschiedlichen Stahltemperaturen in benachbarten Segmenten auszugleichen. Ein 3D-Modell der Stütze wäre erforderlich, um diese Wirkung zu berücksichtigen. Mehrere numerischen Analysen haben jedoch gezeigt, dass diese Wirkung ziemlich begrenzt ist und dass eine Reihe von zweidimensionalen thermischen Analysen auf verschiedenen Ebenen, unter Anwendung der für die jeweilige Ebene maßgebenden Rahmenbedingungen, die tatsächliche Temperaturverteilung hinreichend annähert.

4.3.1 Gleichgewichtsmethode

Ist die von einem Segment empfangene mittlere Wärmestromdichte durch Strahlung bekannt, kann seine Beharrungstemperatur mit Hilfe der Gleichungen in den Eurocodes einfach berechnet werden.

Da das Segment außerhalb des Brandes liegt, findet der konvektive Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft bei 20 °C statt, außer im Falle einer Kupplung mit einem Vollbrand. Zum Wärmeaustausch durch Strahlung wird der Querschnitt eine Wärmemenge $\varepsilon \dot{h}_{m,r}$ absorbieren und die Wärme in Richtung der Umgebung ausstrahlen.

Die Gleichung der Wärmebilanz ist daher:

$$0 = \alpha_c(\theta - 20) + \sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4] - \varepsilon \dot{h}_{m,r} \quad (4.5)$$

Dabei ist:

α_c der konvektive Wärmeübergangskoeffizient (= 35 W/m²K nach EN 1991-1-2),

- σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, gleich $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$,
- ε der Emissionswert des Stahls (EN 1993-1-2 gibt einen Wert von 0,7),
- θ die Stahltemperatur ($^{\circ}\text{C}$).

Die Beharrungstemperatur ist unabhängig von der Größe des Abschnittes, den die Wärmestromdichte beaufschlagt.

Die Gleichung, die zu einem Verhältnis zwischen θ und $\dot{h}_{m,r}$ führt, darf iterativ gelöst werden. Mit Hilfe der empfohlenen Werte für σ und ε , kann Gleichung (4.5) wie in Bild 4.9 graphisch dargestellt werden.

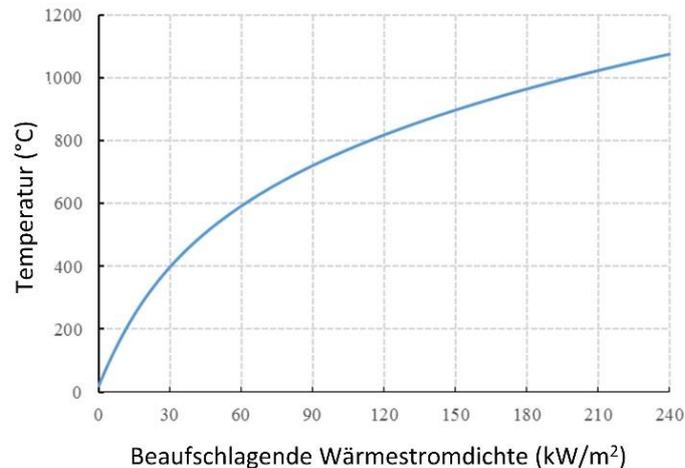


Bild 4.9 Verhältnis zwischen der Beharrungstemperatur und der beaufschlagenden Wärmestromdichte

4.3.2 Inkrementelle Methode

Sobald die einfallende Wärmestromdichte berechnet ist, kann man die in EN 1993-1-2 beschriebene inkrementelle Methode verwenden, um das Zeit-Temperatur-Verhältnis zu ermitteln. Die Temperatur eines Profils ist von der Netto-Wärmestromdichte abhängig, das heißt die Differenz zwischen der einfallenden und der ausgestrahlten Wärmestromdichte. Die Netto-Wärmestromdichte ergibt sich aus der Gleichung der Wärmebilanz, wofür Gleichung (4.6) einen Sonderfall ist:

$$\rho c_p(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} \left[\dot{h}_{z_j} - \alpha_c(T - 20) - \sigma\varepsilon((\theta + 273)^4 - 293^4) \right] \quad (4.6)$$

Dabei ist:

- \dot{h}_{z_j} die vom Profil empfangene Netto-Wärmestromdichte (beschrieben in Anhang A),
- ρ die Dichte des Stahls, in kg/m^3 ,
- c_p die spezifische Wärmekapazität von Stahl, in $\text{J}/(\text{kgK})$,
- A_m/V der Profilmfaktor des Segmentes, in m^{-1} .

Mittels dieser Gleichung wird die Temperatur inkrementell unter Anwendung eines Zeitschrittes Δt (zum Beispiel 60 s) berechnet:

$$T^{t+\Delta t} = T^t + \Delta t \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho C_p(T^t)} \left[\dot{h}_{z_j} - \alpha_c(T - 20) - \sigma \varepsilon ((\theta + 273)^4 - 293^4) \right] \quad (4.7)$$

Dabei ist:

$T^{t+\Delta t}$ die Temperatur des Segmentes z_j zum Zeitpunkt $t+\Delta t$.

Alle zeitabhängigen Größen auf der rechten Seite der Gleichung müssen zum Zeitpunkt t ermittelt werden, da die HRR sich zeitlich ändert. Diese Gleichung kann einfach in einem Excel-Arbeitsblatt ausgeführt werden. Die Temperaturberechnungen von OZone basieren auf dieser Methode.

5 BEMESSUNG DER STÜTZE

EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2 beinhalten Modelle zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines tragenden Bauteils sowie Integritätskriterien, die erfüllt werden müssen, wenn das Bauteil von einer nominellen oder Naturbrandkurve beansprucht wird. Sie definieren die Bemessungswerte der mechanischen und thermischen Werkstoffeigenschaften hinsichtlich der charakteristischen Werte. Die Bemessungswerte ergeben sich aus der charakteristischen Werte dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$. Der empfohlene Wert von $\gamma_{M,fi} = 1,0$ wird von allen Nationalen Anhängen akzeptiert; daher werden die thermischen Eigenschaften normalerweise ohne jegliche Bezeichnung als charakteristische oder Bemessungswerte angegeben.

5.1 Nachweis

Der Nachweis der Anforderungen an Beanspruchbarkeit wird so formuliert, dass nach einer Brandbeanspruchungszeit t :

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (5.1)$$

Die Einflüsse indirekter Brandeinwirkungen (die durch Verformungen und behinderte thermische Dehnung in der Konstruktion induzierten Schnittkräfte entstehen) müssen nicht berücksichtigt werden, wenn der Brandschutz auf der Einheits-Temperaturzeitkurve basiert. In anderen Fällen müssen indirekte Brandeinwirkungen nicht berücksichtigt werden, wenn festgestellt wurde, dass der Einfluss zu vernachlässigen ist oder wenn die Rahmenbedingungen oder das Bemessungsmodell konservativ sind.

5.2 Lastniveau

Zur Vereinfachung darf zur Bauteilanalyse der Wert von $E_{fi,d}$ wie folgt angenommen werden:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (5.2)$$

Dabei ist:

E_d der Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung aus der Grundkombination nach EN 1990,

η_{fi} der Abminderungsfaktor der Bemessungslasten für den Brandfall.

Der Wert des Abminderungsfaktors η_{fi} hängt davon ab, ob Gleichung (6.10) oder Gleichungen (6.10a) und (6.10b) als die Grundkombination der Einwirkungen gemäß EN 1990 verwendet wird.

Wird Gleichung (6.10) der EN 1990 für die Grundkombination der Einwirkungen verwendet, ergibt sich der Abminderungsfaktor η_{fi} aus:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (5.3)$$

Werden Gleichungen (6.10a) und (6.10b) für die Grundkombination der Einwirkungen verwendet, ist der Abminderungsfaktor η_{fi} der kleinste Wert aus den beiden folgenden Gleichungen:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1}Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1}\Psi_{0,1}Q_{k,1}} \quad (5.4)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1}Q_{k,1}}{\xi\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1}Q_{k,1}} \quad (5.5)$$

Dabei ist:

- G_k der charakteristische Wert einer ständigen Einwirkung,
- $Q_{k,1}$ der charakteristische Wert der führenden veränderlichen Einwirkung,
- ξ der Abminderungsfaktor für ungünstig wirkende ständige Einwirkungen, wie in EN 1990 angegeben,
- $\Psi_{0,1}$ der Kombinationsbeiwert für eine variable Einwirkung,
- $\Psi_{1,1}$ ein Häufigkeitsfaktor für den Wert einer variablen Einwirkung.

Es sollte beachtet werden, dass die Abminderungs-, Häufigkeits- und Kombinationsfaktoren national festgelegte Parameter sind und von Land zu Land unterschiedlich sind. Konstrukteure sollten sich versichern, dass sie die korrekten Werte verwenden.

5.3 Beanspruchbarkeit

Bei einem Bauteil mit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung darf die Beanspruchbarkeit als der Wert angenommen werden, der bei einer gleichmäßigen Temperaturverteilung der maximalen Temperatur im Bauteil zum betrachteten Zeitpunkt gleicht.

Die Temperatur θ des Bauteils wird nach der in Abschnitt 4 beschriebenen Methoden ermittelt. Die Temperatur einer Stütze sollte in einigen Höhen berechnet werden, und die höchste Temperatur sollte zur Berechnung der Beanspruchbarkeit der Stütze verwendet werden.

Brandmodelle haben gezeigt, dass tendenziell die maximale Temperatur in etwa ein Drittel der Stützhöhe entsteht, vorausgesetzt dass die Flamme nicht auf die Decke aufprallt. Prallt die Flamme auf die Decke auf, wird die maximale Temperatur wahrscheinlich in der heißen Zone sich befinden (Zone 4 in Bild 4.3).

5.3.1 Klassifizierung von Querschnitten

Wie bei der Bemessung bei Normaltemperatur werden alle Querschnitte, die ganz oder teilweise in Druck wirken klassifiziert, um den passenden Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Querschnitts festzustellen.

Da im Brandfall die Festigkeit und das Elastizitätsmodul von Stahl sich unterschiedlich schnell verringern, sind die Querschnittsklassifizierungen bei hoher Temperatur eventuell anders als die bei der Bemessung bei Normaltemperatur.

Aber, anstatt die Klassifizierung bei jeder hohen Temperatur festzustellen, wird eine einzige Klassifizierung auf der Basis des Verhaltens bei Normaltemperatur ausgeführt. Die Klassifizierung wird entsprechend den Regeln in EN 1993-1-1 mit der Ausnahme durchgeführt, dass der Wert von ε im Brandfall nach EN 1993-1-2 Abschnitt 4.2.2 berechnet wird:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.6)$$

Dabei ist f_y die Streckgrenze bei 20 °C.

Der Koeffizient 0,85 berücksichtigt die Änderungen bei den Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen und ist einer Annäherung von $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$. Es ist möglich, dass sich eine Stütze im Brand in einer schlechteren Klasse befindet als bei Raumtemperatur, z.B. Klasse 3 bei Raumtemperatur und Klasse 4 im Brand.

Die Regeln für die Berechnung der Beanspruchbarkeit von Querschnitten der Klasse 4 in einem Brand sind in EN 1993-1-2 [3]. Eine weitere Behandlung dieses Themas befindet sich außerhalb des Rahmens dieses Leitfadens.

5.3.2 Biegeknickbeanspruchbarkeit

Die Bemessungs-Biegeknickbeanspruchbarkeit von Stützen der Klassen 1, 2 oder 3 mit einer gleichmäßigen Temperatur θ_a zum Zeitpunkt t wird in einer ähnlichen Weise wie bei der Bemessung für Normaltemperatur bestimmt, jedoch mit Anpassungen für abgeminderte Eigenschaften bei höheren Temperaturen. Nach EN 1993-1-2 Abschnitt 4.2.3.2 ergibt sich der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit aus:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.7)$$

Der Abminderungsfaktor beim Biegeknicken χ_{fi} ist der kleinere der Werte um die y-y und z-z Achsen, und wird wie folgt festgestellt:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (5.8)$$

Dabei ist:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} (1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}) \quad (5.9)$$

Mit:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.10)$$

Die dimensionslose Schlankheit bei einer gleichmäßigen Temperatur θ_a wird gegeben durch:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (5.11)$$

Dabei ist:

A die Querschnittsfläche der Stahlstütze,

- $k_{y,\theta}$ der temperaturabhängige Abminderungsfaktor für die Festigkeit des Stahls,
- $k_{E,\theta}$ der Temperatur temperaturabhängige Abminderungsfaktor für das Elastizitätsmodul des Stahls,
- f_y die Streckgrenze des Stahls,
- $\bar{\lambda}$ die dimensionslose Schlankheit bei normaler Temperatur.

Die Abminderungsfaktoren $k_{y,\theta}$ und $k_{E,\theta}$ sind temperaturabhängig. Numerische Werte sind in EN 1993-1-2 ^[3] gegeben und in Bild 5.1 gezeigt.

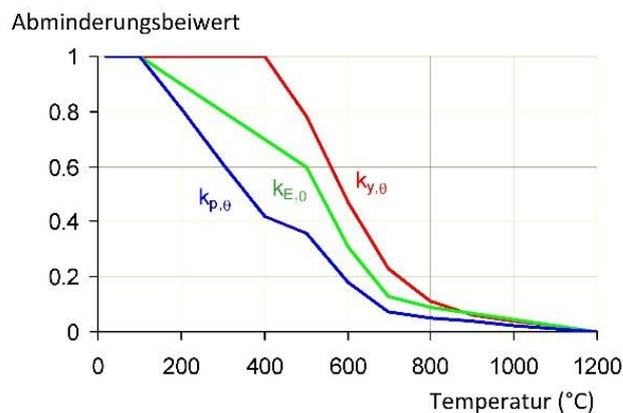


Bild 5.1 Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Kohlenstoffstahl bei erhöhter Temperatur

5.3.3 Knicklängen

EN 1993-1-2 Abschnitt 4.2.3.2(3) empfiehlt bei einer Bemessung im Brandfall die dimensionslose bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ im Allgemeinen so zu bestimmen wie bei einer Bemessung bei Normaltemperatur, mit einer Ausnahme: bei gegen Seitenverschiebung ausgesteiften Rahmen soll wie in Bild 5.2, gezeigt die Knicklänge l_{fi} unter Berücksichtigung seitlicher Festhaltungen berechnet werden, wenn die Anschlüsse steif oder verformbar ausgebildet sind und die Bauteile, die die oberen und unteren Brandabschnitte abtrennen, mindestens die gleiche Tragfähigkeit im Brandfall aufweisen wie die Stützen. Da die durchgehenden Stützen deutlich steifer sind als die Stütze im Brandabschnitt, wird angenommen, dass sie das Ende bzw. die Enden der beheizten Stütze in der Richtung halten.

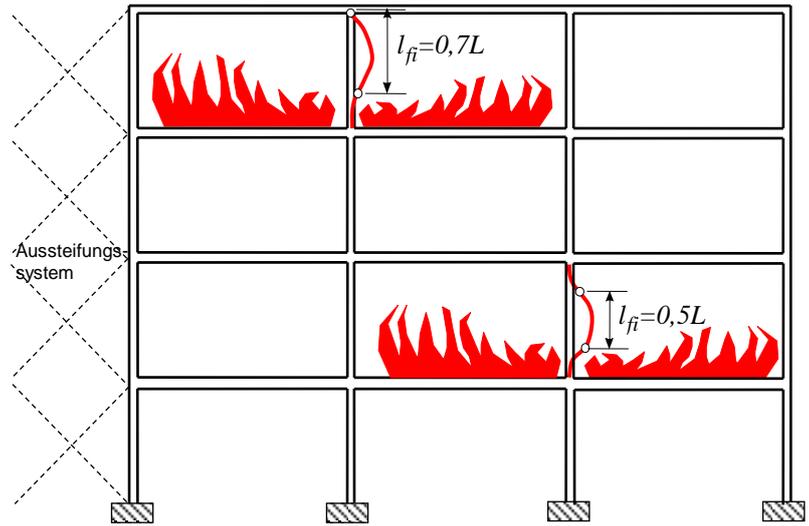


Bild 5.2 Knicklängen von Stützen im Brandfall

5.4 Berechnung der Tragfähigkeit im Brandfall mittels FE-Analyse

Als Alternative zum in Abschnitt 5.3 beschriebenen mechanischen Modell kann die Tragfähigkeit einer Stütze im Brandfall unter Anwendung einer FE-Analyse bestimmt werden.

Die vom Konstrukteur ausgewählte FE-Software muss in der Lage sein, eine „gekoppelte“ Analyse durchzuführen, in der die thermischen und mechanischen Komponenten der Analyse gleichzeitig berechnet werden.

Die thermische Analyse muss unter Anwendung einer Lösung durchgeführt werden, der in der Lage ist, die ausgestrahlte Wärmestromdichte einer „soliden Flamme“ zu berechnen. Die Form der Flamme wird gemäß der in Abschnitt A.2 dargestellten Gleichungen definiert. Die Anwendung von CFD-Techniken ist nicht erforderlich. Dieses Thema wird in Abschnitt A.2.1.1 behandelt.

Für den mechanischen Teil der Analyse wird ein nicht lineares Werkstoffmodell empfohlen. Je nach Nutzerpräferenz können Träger- oder Umhüllungselemente verwendet werden. In beiden Fällen sollte darauf geachtet werden, dass die Auswirkungen von Ausgangsimperfektionen berücksichtigt werden. Weitere Erläuterungen zur FE-Modellierung befinden sich in EN 1993-1-5 Anhang C^[18].

6 REFERENCES

- 1 EN 1990 (2002): Eurocode 0: Basis of structural design
- 2 EN 1991-1-2 (2002): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- 3 EN 1993-1-2 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 4 EN 1994-1-2 (2005): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 5 Wang, Y., Burgess, I., Wald, F. and Gillie, M. (2012) Performance-Based Fire Engineering of Structures, CRC Press. Taylor & Francis Group
- 6 Lennon, T. (2011) Structural Fire Engineering, , ICE Publishing
- 7 Franssen, J. M. and Vila Real, P. (2015) Fire design of steel structures, 2nd Edition, ECCS Eurocode Design Manuals, Wiley VCH
- 8 Simms, W.I. (2012) Fire resistance design of steel framed buildings. P375, The Steel Construction Institute
- 9 Guide to the advanced fire safety engineering of structures (2007), Institution of Structural Engineers.
- 10 Heskestad, G. (1972) Similarity relations for the initial convective flow generated by fire, ASME Paper 72-WA/HT-17.
- 11 Hasemi, Y. and Tokunaga, T. (1984) Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames, Fire Science & Technology 4(1):15-26
- 12 Franssen, J.M. and Scifo, A. (2013) LOCAFI D6: Description of all parameters that characterise the tests - ULg. (Part of 'Temperature assessment of a vertical steel member subjected to Localised Fire' RFCS project)
- 13 Nadjai, A. and Sanghoon, H. (2016) H, LOCAFI D15: Background document of the methodology – Ulster. (Part of LOCAFI RFCS project)
- 14 Nadjai, A. and Sanghoon, H. (2013) LOCAFI D7: Report of all detailed experimental data gathered during localised fire tests - Ulster (Part of LOCAFI RFCS project)
- 15 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2017), FDS User's Guide, FDS Version 6.5.3, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 16 Thauvoye C., (2013) LOCAFI D8-9 Numerical simulation of tests, (Part of LOCAFI RFCS project)
- 17 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2013), FDS Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 18 EN 1993-1-5(2006): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
- 19 Vassart, Olivier et al., (2014) Eurocodes: Background and applications. Structural fire design. Worked examples. EUR Scientific and Technical Research Reports. Publications Office of the European Union. (Available from: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/eurocodes-background-and-applications-structural-fire-design-worked-examples>)

ANHANG A MODELL ZUR BERECHNUNG DER BRANDLAST VON STÜTZEN IN LOKALEN BRÄNDEN

Viele Versuchsergebnisse haben zur Kalibrierung und zum Nachweis eines analytischen Modells zur Berechnung der einfallenden Wärmestromdichte und des Temperaturanstieges einer Stütze in einem lokalen Brand beigetragen, wie schon in Abschnitt 3.2 beschrieben. Das Modell wird in diesem Anhang erläutert.

Die Physik der Wärmeübertragung durch Strahlung sowie durch Konvektion hat zur Folge, dass das Modell ziemlich komplex ist. Es ist aber nicht vorgesehen, dass Konstrukteure versuchen werden, das Modell unter Anwendung von manuellen Berechnungsmethoden zu benutzen, obwohl sein Gebrauch mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms möglich ist. Stattdessen sind verschiedene vereinfachten Ansätze entwickelt worden, die die Grundsätze des Modells benutzen, wie in Abschnitt 4 besprochen.

A.1 Überblick

Die Temperatur einer in einem lokalen Brand befindlichen Stütze kann mit Hilfe der unten beschriebenen Methode bestimmt werden. Die Methode berechnet die Temperatur eines Stützensgments in einer bestimmten Höhe und kann mehrmals in jeder Höhe angewandt werden, um ein Temperaturprofil zu ermitteln.

Die Methode wird in zwei globale Schritte unterteilt: die Berechnung der beim Segment einfallenden Wärmestromdichte gefolgt von der Berechnung der Segmenttemperatur.

Es wird angenommen, dass die Form des Brandes am Boden kreisförmig ist und es wird beabsichtigt, das Modell für lokale Brände mit einem maximalen Durchmesser von 10 m und einer maximalen HRR von 50 MW zu verwenden.

Ist bei einem lokalen Brand der wichtigste brennbare Stoff nicht kreisförmig, wird beim Modell ein Kreis mit einem nach Gleichung (A.1) berechneten Durchmesser verwendet:

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ m} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist:

D_{fire} der äquivalente Durchmesser (m),

S die Fläche des lokalen Brandes (m²).

Die Anwendungsbereiche sind in Bild 4.3 dargestellt. Abschnitt A.2 beschreibt das Modell für Stützen, die außerhalb der Brandfläche liegen (Zonen 1 und 4) und Abschnitt A.3 beschreibt das Modell für Stützen, die innerhalb der Brandfläche liegen (Zonen 2 und 3).

A.2 Stütze außerhalb der Brandfläche

Falls eine ungeschützte Stütze nicht vollständig von Flammen eingeschlossen ist, resultiert die Einwirkung der Flammen eines lokalen Brandes hauptsächlich von der Wärmestrahlung. Die Flammenform und die Position der Flamme relativ zur Stütze haben einen starken Einfluss auf die von der Stütze empfangene Wärmestrahlung.

Für den Hauptanteil des Brandabschnittsvolumens kann der Wärmestrom durch Konvektion außerhalb der Brandfläche als geringfügig angenommen werden. Diese Annahme ist jedoch nicht mehr korrekt, wenn sich die Rauchschiicht unterhalb der Decke ausbreitet. Bei einem lokalen Brand ist die Höhe der Rauchschiicht generell klein im Vergleich zu der Höhe des Brandabschnittes.

Sind Hindernisse vorhanden, die die Verbreitung des Rauches unter der Decke erschweren, darf die Höhe der Rauchschiicht $h_{smoke\ layer}$ mit Hilfe geometrischer Kennwerte der Hindernisse (typischerweise die Tiefe der Träger) definiert werden. In der Praxis wird ein Wert von 10 % der Deckenhöhe empfohlen.

Verschiedene Gleichungen zum Voraussagen der einfallenden Wärmestromdichte gelten, wenn die spezifische Stelle außerhalb oder innerhalb der Rauchschiicht liegt (siehe Abschnitte A.2.1 und A.2.2).

A.2.1 Stütze außerhalb der Rauchschiicht

Die Vorgehensweise wird in drei Schritte unterteilt:

- die Geometrie der Flammenoberfläche modellieren,
- die Temperatur der Flamme berechnen,
- die bei einem Segment der Stahlstütze einfallende Wärmestrahlung abschätzen.

Der Wärmestrom durch Konvektion wird vernachlässigt und die Wärmestrahlung wird unter Anwendung des Konzeptes einer soliden Flamme modelliert, d.h. die Flamme wird als eine solide Oberfläche betrachtet, die die Wärme in Richtung der Stütze ausstrahlt.

A.2.1.1 Geometrie der Oberfläche der soliden Flamme

Der erste Schritt ist die Bildung der Flammenoberfläche. Eine konische Form wird angenommen und aus eine Reihe von Zylindern (vertikale Seiten) und Ringen (horizontale Seiten) abnehmender Durchmesser (Bild A.1) gebildet.

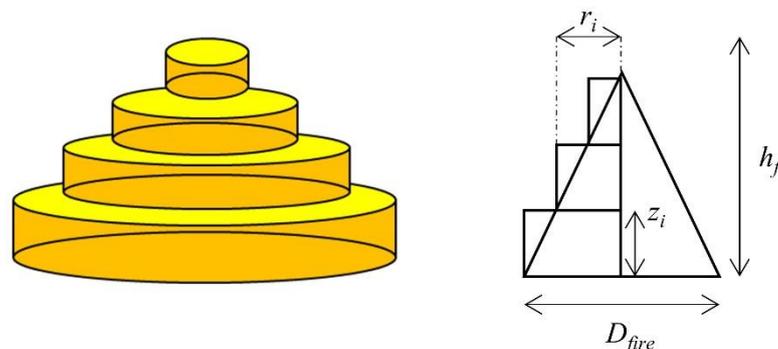


Bild A.1 Modell der soliden Flamme (links) mit geometrischen Einzelheiten (rechts)

Die Flammenhöhe h_f wird mittels der Korrelation in EN 1991-1-2 Anhang C ^[2] berechnet:

$$h_f = -1,02D_{fire} + 0,0148Q(t)^{0,4} \quad (A.2)$$

Dabei ist:

D_{fire} der Durchmesser der Brandquelle (m),

$Q(t)$ die HRR der Brandquelle (W).

Der Radius r_i eines Zylinders in einer Höhe z_i ist:

$$r_i = 0,5D_{fire} \left(1 - \frac{z_i}{h_f}\right) \quad (A.3)$$

Zur einfachen Handhabung sollte die Anzahl der Zylinder zur Modellierung des Brandes eingeschränkt werden. Eine Zylindertiefe von 0,5 m ergibt eine gute Balance zwischen Genauigkeit und Verwendbarkeit, und wird daher empfohlen. Eine Vereinfachung ist deutlich auf der sicheren Seite, wenn die angewandte Zylindertiefe der Flammenhöhe h_f gleicht. In diesem Fall reduziert sich die solide Flamme zu zwei Komponenten: ein Zylinder mit einer Scheibe oben drauf (Durchmesser = D_{fire}).

A.2.1.2 Strahlungseigenschaften und Temperatur der Flamme

Der zweite Schritt ist die Berechnung der Strahlungseigenschaften der Flamme und dadurch die Temperatur der soliden Flamme. Es wird angenommen, dass die Temperatur eines spezifischen Zylinders oder Ringes in einem Abstand z_i entlang der Flammenachse (Bild A.2) konstant ist:

$$\theta_f(z_i) = \min\left(900; \quad 20 + 0,25(0,8Q(t))^{2/3}(z_i - z_{virt})^{-5/3}\right) \quad (A.4)$$

Dabei ist z_{virt} der virtuelle Nullpunkt, gegeben durch die Gleichung:

$$z_{virt} = -1,02D_{fire} + 0,00524Q(t)^{0,4} \quad (A.5)$$

Diese Formeln sind Gleichungen C.2 and C.3 aus EN 1991-1-2. Die Länge h_f wird als der Punkt definiert, an dem nach Gleichung (A.4) die Temperatur der Gase entlang der Flammenachse 520 °C erreicht.

Es ist wichtig festzuhalten, dass die HRR sich zeitlich ändert, d.h. die Kenndaten der Flamme und die Wärmeströme ändern sich während des Brandes.

Durch Anpassung der Höhe unter der Decke ist es möglich, die Fälle zu berücksichtigen, in denen die Brandquelle nicht am Boden, sondern in einer anderen Höhe z_{fire} liegt (h_{ceil} wird durch $h_{ceil} - z_{fire}$ ersetzt).

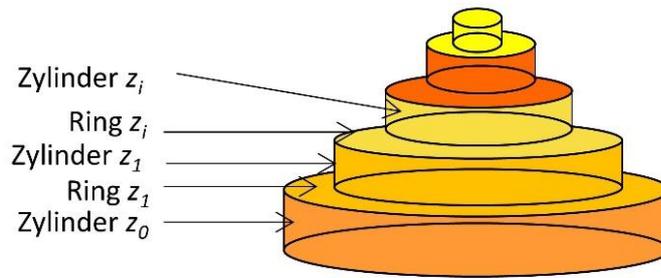


Bild A.2 Vereinfachtes Modell eines Brandes unter Anwendung von Ringen und Zylindern

A.2.1.3 Die von einem Stützensegment empfangene Wärmestrahlung

Unabhängig vom Original-Querschnitt wird zunächst der Querschnitt der Stütze als rechteckiger Querschnitt modelliert (Bild A.3). Dieser Ansatz ist im Einklang mit den Ausnahmen in Anhang G der EN 1991-1-2. Das Eliminieren von komplexen Querschnitt-Geometrien vermeidet die Berücksichtigung von komplexen Phänomenen wie dem Abschirmeffekt (bei dem ein Teil des Querschnitts andere Teile von einfallender Strahlung abschirmt).

Die Stütze wird in Segmente (Höhe z_j) unterteilt, die Wärmestromdichte wird für jede der vier Seiten des Segmentes bestimmt, und dann wird der Mittelwert berechnet.



Bild A.3 Modellierung einer H-Stütze und detaillierte Modellierung eines Segmentes

Da angenommen wird, dass über die Oberfläche jedes Segmentes die Emissivität und die Temperatur konstant sind, kann die Wärmestrahlung mit Hilfe eines Konfigurationsfaktors berechnet werden. Dieser gibt an, welchen Anteil der gesamten Wärmestrahlung, die von einer gegebenen Fläche ausgestrahlt wird, eine bestimmte empfangende Fläche erreicht. Seine Größe ist von der Größe der ausstrahlenden Fläche, dem Abstand zwischen der ausstrahlenden und der empfangenden Fläche und der Orientierung der Flächen zueinander abhängig. Es gibt analytische Formeln für Konfigurationsfaktoren für unterschiedliche Szenarien, einschließlich der hier verwendeten Formen der soliden Flamme.

Der Konfigurationsfaktor \varnothing zwischen einer infinitesimalen Ebene und einem finiten Zylinder ergibt sich aus Gleichung (A.6). Die geometrischen Parameter sind in Bild A.4 dargestellt

$$\Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5\} \quad (\text{A.6})$$

mit

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right)$$

$$L_2 = \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right)$$

$$L_3 = -Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right]$$

$$L_4 = -\sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right)$$

$$L_5 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right)$$

Dabei ist:

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad Y = \frac{y}{r} \quad H = \frac{h}{r}$$

$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$

$$B = S^2 + X^2$$

$$C = (H - Y)^2$$

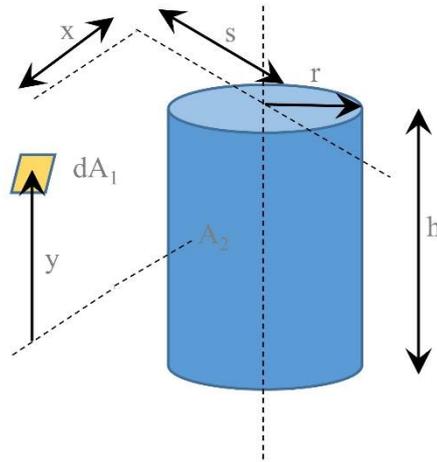


Bild A.4 Die zur Berechnung des Konfigurationsfaktors zwischen einer infinitesimalen Ebene und einem finiten Zylinder verwendeten geometrischen Parameter

Die Wärmestrahlung von Zylinder z_i , die durch die Seite $face_j$ empfangen und absorbiert wird, ist dann:

$$\dot{h}_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} = \sigma \varepsilon (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \quad (\text{A.7})$$

Dabei ist:

- ε die Emissivität des Stahls (EN 1993-1-2 gibt einen Wert von 0,7),
- σ $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$,
- $\theta_f(z_i)$ die Temperatur des Zylinders z_i , aus Gleichung (A.4),
- $\phi_{\text{Cylinder } z_i \rightarrow \text{face}_j}$ der Konfigurationsfaktor des Zylinders z_i und der Seite face_j aus Gleichung (A.6).

Ein Modell des Brandes zeigt Bild A.5.

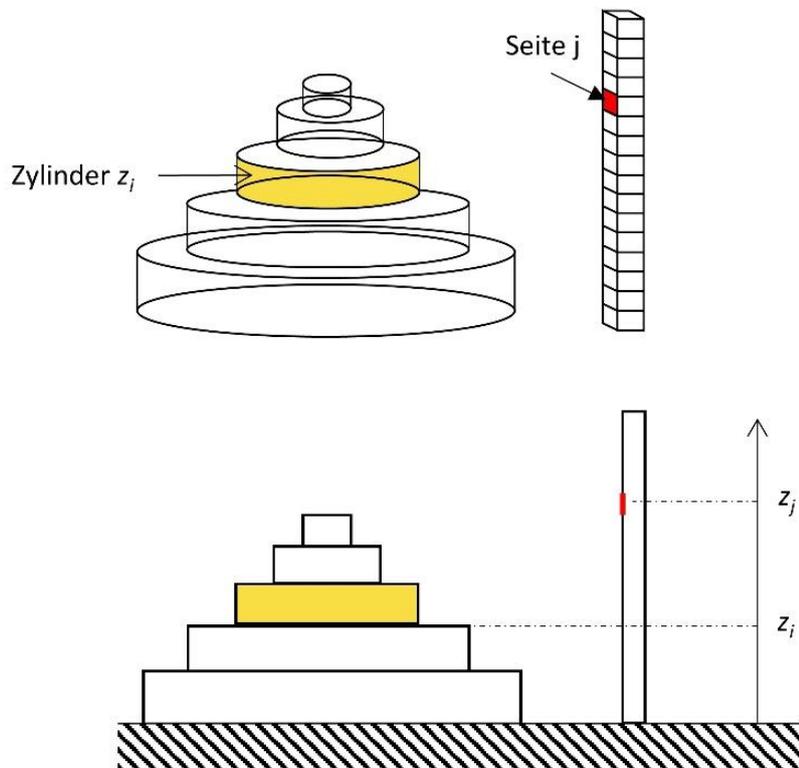


Bild A.5 Strahlungswärmeaustausch zwischen dem Zylinder z_i und der Seite face_j ; 3D-Ansicht (oben) und Seitenansicht (unten)

Konfigurationsfaktoren können addiert werden ^[2]. Zum Beispiel kann der Konfigurationsfaktor ϕ für den in Bild A.6 gezeigten Fall aus den Konfigurationsfaktoren ϕ_1 und ϕ_2 berechnet werden:

$$\phi_1 = \phi + \phi_2 \Rightarrow \phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (\text{A.8})$$



Bild A.6 Additionsregel für Konfigurationsfaktoren

Zusätzliche Regeln sind erforderlich, um den Konfigurationsfaktor und daher die Wärmestromdichte für alle möglichen Konfigurationen zu bestimmen. Allerdings, bei dem in Bild A.7 gezeigten Fall ist der Zylinder nur von Seite 1 aus völlig sichtbar; von den Seiten 2 und 4 aus ist er lediglich teilweise sichtbar, während keine Wärmestrahlung von der soliden Flamme Seite 3 erreicht. Daher entspricht Seite 1 der durch Gleichung (A.6) beschriebenen Situation. Für Seite 3 ist die einfallende Wärmestrahlung gleich Null. Der Fall ist komplexer für die Seiten 2 und 4 und Gleichung (A.6) kann nicht direkt verwendet werden, weil die Ebene (der Seite) den Zylinder durchschneidet.

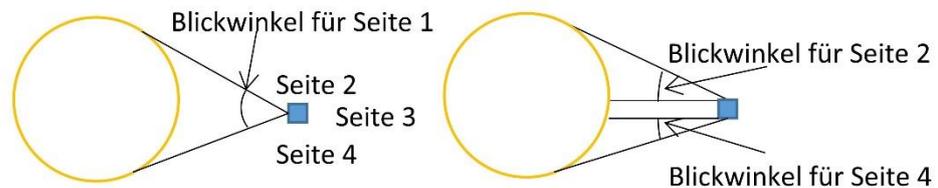


Bild A.7 Beispiel der Wechselbeziehung zwischen Zylinder und Stütze (Draufsicht)

Die Wärmestrahlung wird hauptsächlich durch die Winkel kontrolliert, aus der die Quelle der Strahlung vom Ziel aus sichtbar ist. Daher ist die übernommene Lösung, die Anwendung einer Flächenform, die zu einem äquivalenten Konfigurationsfaktor führt. Ein Zylinder kann weiter verwendet werden, jedoch mit der in Bild A.8 und Bild A.9 modifizierten Geometrie. Der Durchmesser des Zylinders wird so reduziert, dass der modifizierte Zylinder vom Ziel aus völlig sichtbar ist, und Gleichung (A.6) verwendet werden kann. Ein komplexerer Fall mit mehreren Zylindern ist in Bild A.10 dargestellt und kann in einer ähnlichen Weise behandelt werden.

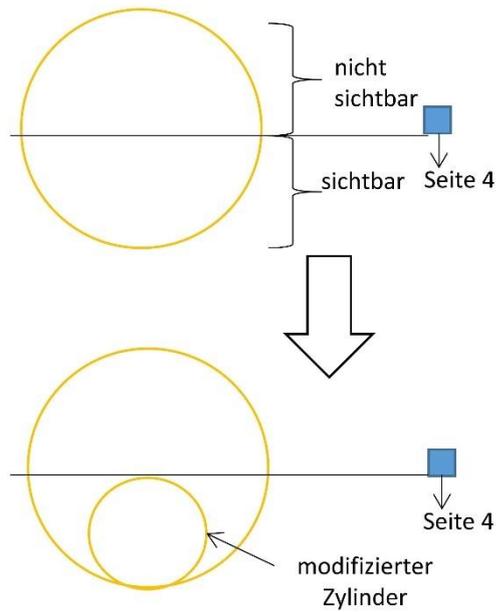


Bild A.8 Zylindermodellierung – Draufsicht

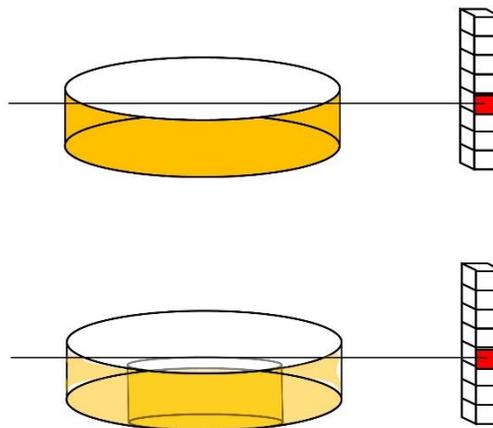


Bild A.9 Zylindermodellierung – 3D-Ansicht

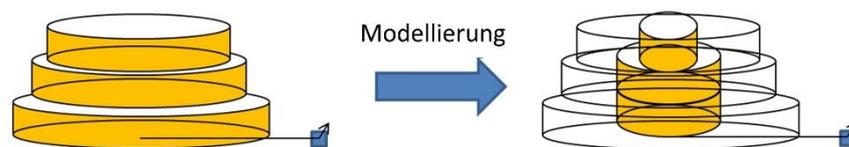


Bild A.10 Komplexer Fall der Zylindermodellierung

Der Konfigurationsfaktor zwischen einem infinitesimalen Flächenelement und einem Ring in einer senkrechten Ebene wird durch Gleichung (A.9) gegeben. Die geometrischen Parameter sind in Bild A.11 dargestellt.

$$\Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Diese Formel gilt nur wenn $l > r_2$

Dabei ist:

$$H = h/l$$

$$R_1 = r_1/l$$

$$R_2 = r_2/l$$

l der Abstand zwischen der Seite und der Ringmitte

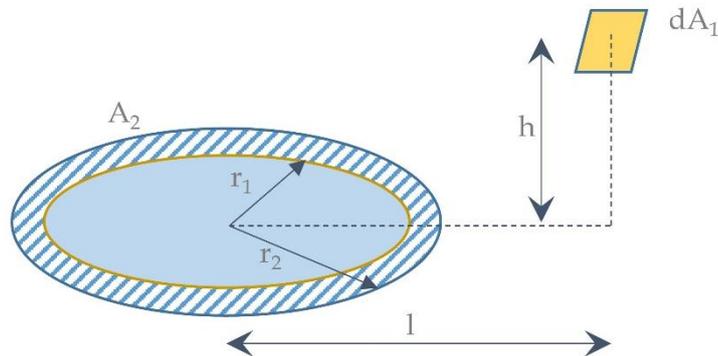


Bild A.11 Konfiguration Ring-Flächenelement

Der kranzförmige Teil (Ring z_i) zwischen zwei Zylindern wird als ausstrahlende Oberfläche betrachtet (siehe Bild A.12) und die verursachte Wärmestromdichte wird mittels Gleichung (A.9) berechnet. Sie werden nur dazu addiert, wenn $z_j > z_i$ ist, d.h. wenn der Ring von der jeweiligen Seite aus „sichtbar“ ist.

Zusätzliche Regeln sind erforderlich, um alle Konfigurationen mittels Gleichung (A.9) abzudecken. Theoretisch ist diese Gleichung nur gültig für einen in der Mitte einer Ebene senkrecht zum Ziel positionierten Ring, was in der Praxis nicht immer der Fall ist (siehe Bild A.12).

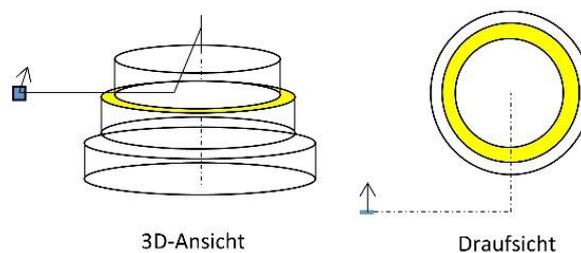
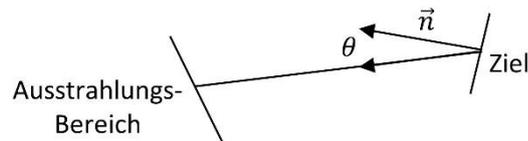


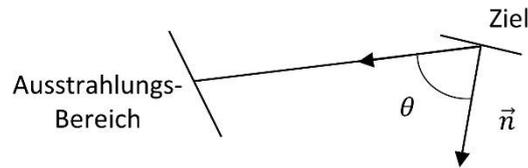
Bild A.12 Ringmodellierung (Draufsicht)

Die Orientierung des Ziels hat einen starken Einfluss auf den Wärmestromausaustausch zwischen zwei Flächen (Bild A.13). Gleichung (A.9) entspricht dem Fall, in dem das Ziel rechtwinklig zum Brand steht und sie führt zum höchsten (d.h. am konservativsten) Konfigurationsfaktor.



$$\cos\theta \sim 1$$

Hoher Sichtfaktor



$$\cos\theta \sim 0$$

Niedriger Sichtfaktor

Bild A.13 Einfluss der Orientierung des Ziels

Es ist erforderlich, die Situation zu berücksichtigen, in der der Ring, wie der Zylinder, nur teilweise sichtbar ist (siehe Bild A.14). Mit Hilfe der gleichen Methode, die für den Zylinder verwendet wurde, wird in diesem Fall der Außen- und sogar der Innendurchmesser des Rings verkleinert, um einen sichtbaren Ring zu erzielen. Die in Bild A.14 dargestellten Beispiele beinhalten zwei Fälle: in einem wird der Ring durch seinen Innendurchmesser r_{zi+1} definiert und in dem anderen durch seinen Außendurchmesser r_{zi} . Im Fall a) muss nur der Radius r_{zi} geändert werden während im Fall b) sowohl r_{zi} als auch r_{zi+1} geändert wird.

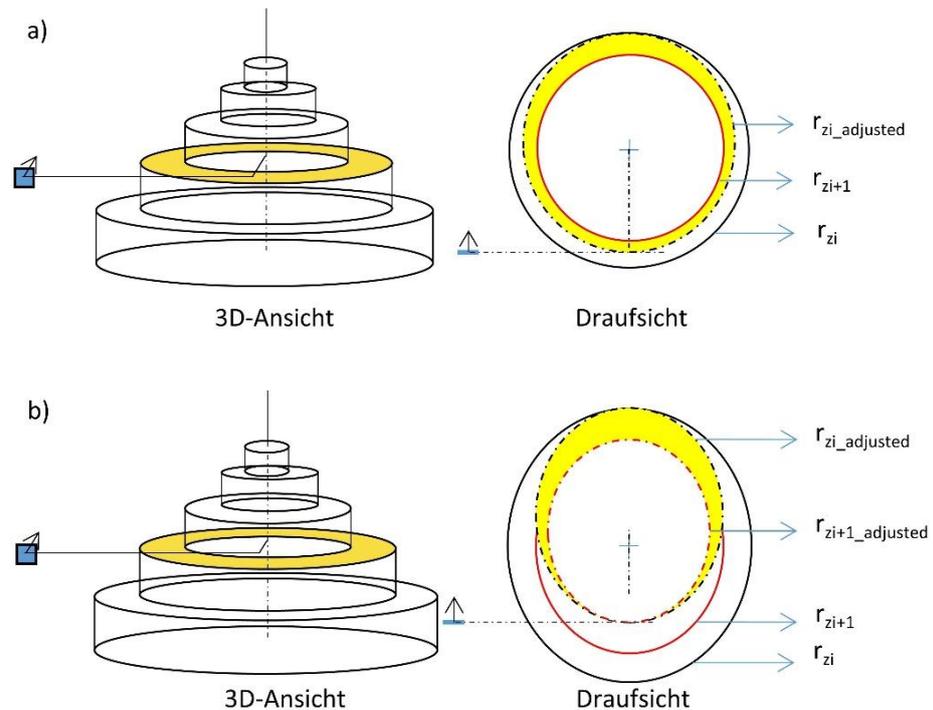


Bild A.14 Behandlung eines komplexen Falles von Ringmodellierung

Die von einer Seite empfangene Wärmestrahlung ist dann die Summe der von allen Zylindern und Ringen ausgestrahlten Wärme:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_j} &= \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \\ &+ \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{Ring\ z_i \rightarrow face_j} \end{aligned} \quad (A.10)$$

Schließlich wird der Mittelwert der Wärmestrahlung über dem Segment in einer Höhe z_j durch Mittelwertbildung der Wärmestrahlungen über den vier Seiten der Breite l_i jeder Seite ermittelt:

$$\dot{h}_{rad,section\ z_j} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.11)$$

A.2.1.4 Die von einem Stützensegment empfangene Gesamt-Wärmestromdichte

Wie schon erwähnt, befindet sich die Stütze außerhalb der Flamme. Liegt das betrachtete Segment nicht in der Rauchsicht, dann gleicht die gesamte empfangene Wärmestromdichte die Wärmestrahlungsdichte:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{rad,section\ z_j} \quad (A.12)$$

A.2.2 Die von einem Stützensegment empfangene Gesamt-Wärmestromdichte

Der Wärmestrom durch Konvektion kann in der Rauchsicht nicht vernachlässigt werden. Der Rauch hat auch eine starke Auswirkung auf die Wärmestrahlung durch Absorptions- und Emissionserscheinungen, hauptsächlich durch Ruß. Die gesamte von einem Segment empfangene Wärmestromdichte wird nach den folgenden Gleichungen berechnet:

In einem ersten Schritt wird die Größe y eingeführt:

$$y = \frac{d + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (A.13)$$

Dabei ist:

d der Abstand zwischen der Stütze und der Mitte der Brandfläche (Bild 4.2),

H der Abstand zwischen der Brandquelle und der Decke.

Befindet sich die Brandquelle in einer Höhe z_{fire} , dann:

$$H = h_{ceil} - z_{fire} \quad (A.14)$$

L_h ist gegeben durch:

$$L_h = H(2,9Q_h^{0,33} - 1) \quad (A.15)$$

Q_h , eine dimensionslose HRR, wird geschätzt durch:

$$Q_h = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}} \quad (A.16)$$

z' wird definiert durch:

$$z' = 2,4D_{eq}(Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1 \quad (\text{A.17})$$

$$z' = 2,4D_{eq}(1 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1 \quad (\text{A.18})$$

Q^* ist eine dimensionslose HRR, die in einer ähnlichen Weise zu Q_h berechnet wird:

$$Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D_{fire}^{2,5}} \quad (\text{A.19})$$

Je nach dem Wert von y wird die einfallende Wärmestromdichte H_s wie folgt berechnet:

$$\begin{cases} H_s = 100000 \text{ W/m}^2 & y \leq 0,3 \\ H_s = 136300 - 121000 \cdot y \text{ W/m}^2 & 0,3 < y < 1,0 \\ H_s = 15000 \cdot y^{-3,7} \text{ W/m}^2 & 1,0 \leq y \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

Schließlich ist die gesamte von Segment z_j empfangene Wärmestromdichte:

$$\dot{h}_{section\ z_j} = H_s \quad (\text{A.21})$$

A.3 Stütze innerhalb der Brandfläche

Für eine Stütze innerhalb der Brandfläche ist die Wärmestromdichte durch Konvektion ein wesentlicher Bestandteil der gesamten Wärmestromdichte. Ferner ist das Konzept einer soliden Flamme mit einer externen Oberfläche, von der die Flamme Richtung einer Stütze ausstrahlt, nicht mehr richtig.

EN 1991-1-2^[2] beinhaltet ein Modell zur Berechnung der Wärmestromdichte, die an einem Punkt innerhalb des Brandes empfangen wird. Mit einer geringfügigen Änderung basiert das unten vorgestellte Modell auf die Eurocode-Gleichungen.

Es wird nochmal unterschieden zwischen Stützensegmente, die sich in der Rauchsicht unter der Decke befinden und die, die nicht in diesem Bereich sind.

A.3.1 Stützensegment außerhalb der Rauchsicht

Stützensegmente in einer Höhe z_j , die sich zwischen dem Boden und der Höhe ($h_{ceil} - h_{smoke\ layer}$) befinden, werden umgeben von heißen Gasen bei einer Temperatur, die mit Gleichung (A.4) ermittelt wird. Die einfallende Wärmestromdichte wird dann wie folgt berechnet:

$$\dot{h}_{inside\ flame} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left((\theta_f(z_j) + 273)^4 - 293^4 \right) + \alpha_c (\theta_f(z_j) - 20) \quad (\text{A.22})$$

Dabei ist:

α_c der konvektive Wärmetransportkoeffizient = 35 W/(m²K) nach EN 1991-1-2.

Die gesamte von Segment z_j empfangene Wärmestromdichte wird dann wie folgt berechnet:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{inside\ flame} \quad (\text{A.23})$$

A.3.2 Segment innerhalb der Rauchschrift

Für die Stützenssegmente, die sich in der Rauchschrift befinden (zwischen ($h_{ceil} - h_{smoke\ layer}$) und h_{ceil}) wird angenommen, dass die gesamte empfangene Wärmestromdichte der größere von zwei Werten ist: H_s , die mittels Gleichungen (A.13) bis (A.20) berechnet wird, und $\dot{h}_{inside\ flame}$, die mittels Gleichung (A.22) berechnet wird.

A.4 Die vom Stützenssegment empfangene Gesamt-Wärmestromdichte

Das in den Abschnitten A.2 und A.3 dargestellte Modell setzt eine einzige Brandquelle voraus. Es kommen jedoch Brandszenarien häufig vor, in denen mehrere Quellen verwickelt sind. In diesen Fällen dürfen einfache Additionsregeln verwendet werden.

Befindet sich die Stütze außerhalb der Brandfläche und nicht in der Rauchschrift ist die von jeder Seite der Stütze empfangene Wärmestrahlungsdichte gleich die Summe der von jeder Quelle emittierten Wärmestrahlungsdichte, unter der Annahme einer oberen Grenze von 100 kW/m².

Werden n Brandquellen berücksichtigt:

$$\dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_j} = \min \left(100000, \sum_{i=1}^n \dot{h}_{solid\ flame_i \rightarrow face_j} \right) \quad (A.24)$$

$$\dot{h}_{rad_{section}z_j} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.25)$$

Es gibt keine Änderung beim Mittelungsverfahren hinsichtlich der von einem Stützenssegment empfangenen Gesamt-Wärmestromdichte.

Für alle anderen Fälle wird die gesamte empfangene Wärmestromdichte durch das Addieren aller Wärmestromdichten jeder Brandquelle ermittelt, ebenfalls unter der Annahme einer oberen Grenze von 100 kW/m².

ANHANG B ANWENDUNG BEI EINER STÜTZE AUSSERHALB DER BRANDFLÄCHE

Dieser Anhang beinhaltet ein Beispiel, welches die praktische Anwendung des Modells zeigt. Es ist festzuhalten, dass die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Techniken dem Konstrukteur ermöglichen, den Temperaturanstieg in einer Stütze zu berechnen, ohne die hier dargestellte komplexe numerische Vorgehensweise zu verwenden.

B.1.1 Fallbeschreibung

Bei dem Beispiel handelt es sich um eine Stütze, die sich außerhalb der Brandfläche und außerhalb der Rauchsicht befindet (dies ist der Fall, der am komplexesten ist). Stützensegmente, die sich innerhalb der Brandfläche oder außerhalb der Brandfläche aber innerhalb der Rauchsicht befinden stellen keine besonderen Schwierigkeiten dar, da die Methode klassische und einfache Gleichungen verwendet, die schon in EN 1991-1-2 vorhanden sind.

Bild B.1 zeigt die angenommene allgemeine Konfiguration. Die Stütze ist ein HEB 300 Profil. Sie befindet sich vor einem Becken von 4 m Durchmesser. Der Abstand zwischen der Beckenkante und der nächstgelegenen Seite des Stahlsegments beträgt 0,5 m. Es wird angenommen, dass im Becken ein Brennstoff verbrennt mit einer gleichbleibenden HRR von 1000 kW/m^2 .

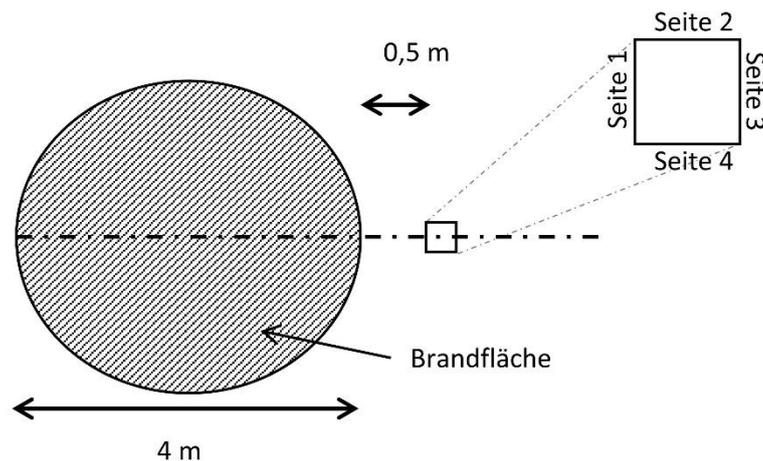


Bild B.1 Position der Stütze relativ zum Brand

B.1.2 Vorläufige Analyse

Die Berechnung kann in gewisser Weise vereinfacht werden. Die Anzahl der Berechnungen ist proportional zur Anzahl der Segmente. Gleichung (A.6) wird deutlich vereinfacht, wenn die Segmente sich in Höhen befinden, die ein Mehrfaches der zur Modellierung der Flamme verwendeten Zylinderhöhe (0,5 m) betragen. In diesem Fall ist die Größe y gleich 0 (siehe Bild B.2) und Gleichung (A.6) wird vereinfacht:

$$\phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s, x, r, h) = \frac{S}{A} - \frac{S}{2A\pi} \{\pi + L_1 - L_2 + L_3\} \quad (\text{B.1})$$

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{H^2 + A - 1} \right)$$

$$L_2 = H \frac{H^2 + A + 1}{\sqrt{(H^2 + A - 1)^2 + 4H^2}} \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{\sqrt{A}(H^2 + A - 1)} \right)$$

$$L_3 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \right)$$

Dabei ist:

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad H = \frac{h}{r} \quad A = X^2 + S^2 \quad (\text{B.2})$$

Dann werden Berechnungen für Segmente bei 0 m, 0,5 m, 1,0 m und so weiter durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird die Wärmestromdichte für ein Segment in einer Höhe von 1,0 m berechnet.

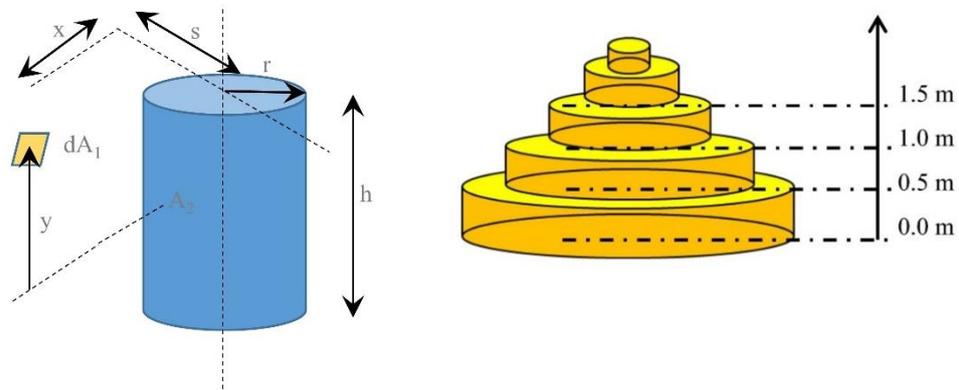


Bild B.2 Konfiguration Zylinder-Flächenelement (links) und Höhe der Segmente für die Berechnungen (rechts)

Zweitens wird bei dieser Konfiguration angenommen, dass keine Wärmestrahlung von der Flamme Seite 3 erreicht. Seiten 2 und 4 sind symmetrisch und werden die gleiche Wärmestrahlung empfangen.

Die letzte Vereinfachung bezieht sich auf die Position zur Berechnung der Wärmestromdichte der Seiten. Obwohl die Berechnung in der Mitte jeder Seite ausgeführt werden sollte (siehe Bild B.3), werden zur Vereinfachung die Berechnungen an der gleichen Position in der Mitte von Seite 1 verwirklicht. Da diese Seite am nächsten zum Becken liegt, wird der Wärmestrom hier am höchsten und die Berechnung daher konservativ.

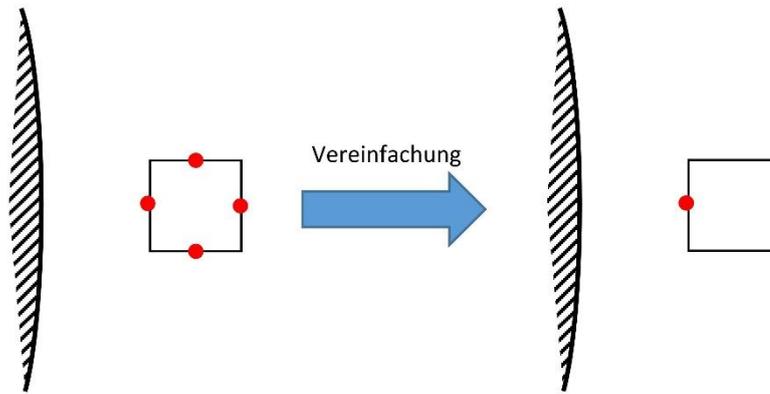


Bild B.3 Vereinfachung der Position jeder Seite zum Berechnen der Wärmestromdichte

B.1.3 Berechnung der Wärmestromdichte

Mit Gleichungen (A.2) bis (A.5) ist es möglich, die Eigenschaften von jedem Zylinder und jedem Ring zu ermitteln. In diesem Fall ist die Höhe der Flamme 6,15 m (siehe Bild B.9). Die von jeder Seite empfangene Wärmestromdichte wird separat ermittelt.

Für Seite 1 kann **Gleichung** (B.1) direkt verwendet werden, um den Konfigurationsfaktor zwischen der Seite 1 und dem Zylinder zu berechnen. Trotzdem muss je nach der relativen Höhe zwischen dem Zylinder und der Seite der Additionsregel verwendet werden.

Für die in Bild B.4 gezeigten Position der Seite 1 und eines Zylinders C_i (zwischen z_i und z_{i+1}), kann die Position des Segmentes im lokalen Koordinatensystem $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ als (s_f, x_f, z_f) genommen werden, nämlich $(2,5, 0,0, 1,0)$. Die vier in Bild B.5 dargestellten Situationen können auftreten und müssen zerlegt werden, wie im gleichen Bild gezeigt.

Wird ϕ_i (bzw. ϕ_{i+1}), definiert, ist der Konfigurationsfaktor zwischen Seite 1 und einem Zylinder mit einer Höhe $t |z_i - z_f|$ (bzw. $|z_{i+1} - z_f|$) und einem Radius r_i :

$$\phi_i = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_i - z_f|) \quad (\text{B.3})$$

$$\phi_{i+1} = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_{i+1} - z_f|)$$

Der Konfigurationsfaktor ϕ zwischen der Seite 1 und dem Zylinder C_i ist:

$$\phi = |\phi_i - \phi_{i+1}| \quad (\text{B.4})$$

Der letzte Teil betrifft die durch die Ringe hervorgerufene Wärmestromdichte. Weil sich das Segment in einer Höhe von 1,0 m befindet, gibt es nur einen Ring (bei 0,5 m) unterhalb des Segmentes. Mittels Gleichung (A.3) können die (externen und internen) Radien des Rings wie folgt berechnet werden:

$$r(z_i = 0,0) = 2,00 \text{ m} \quad (\text{B.5})$$

$$r(z_{i+1} = 0,5) = 1,84 \text{ m}$$

Schließlich wird die einfallende Wärmestromdichte durch das Summieren aller Beiträge (Gleichung (A.9)) berechnet. Es führt zu einer einfallenden

Wärmestromdichte auf Seite 1 von $76,36 \text{ kW/m}^2$ und, unter der Annahme einer Emissivität von $0,7$, zu einer absorbierten Wärmestromdichte von $53,45 \text{ kW/m}^2$.

Bild B.9 zeigt diese in einem Excel-Arbeitsblatt umgesetzte Vorgehensweise für das Beispiel.

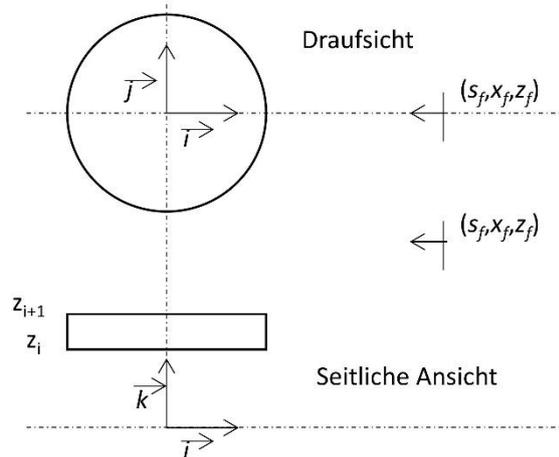


Bild B.4 Koordinaten der Seite 1

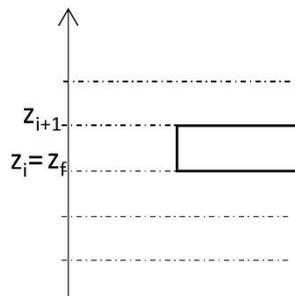


Bild B.5 Relative Position der Seite 1: Zylinder und Zerlegung, Fall a

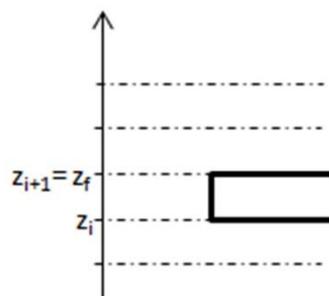


Bild B.6 Relative Position der Seite 1: Zylinder und Zerlegung, Fall b

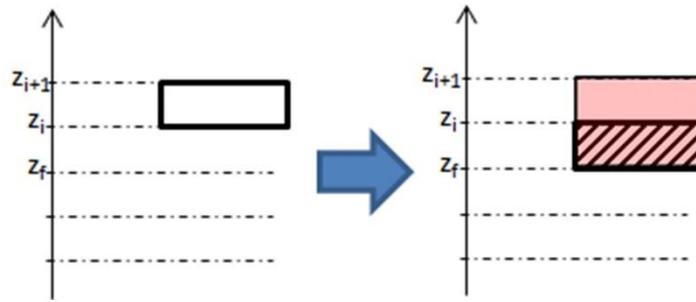


Bild B.7 Relative Position der Seite 1: Zylinder und Zerlegung, Fall c

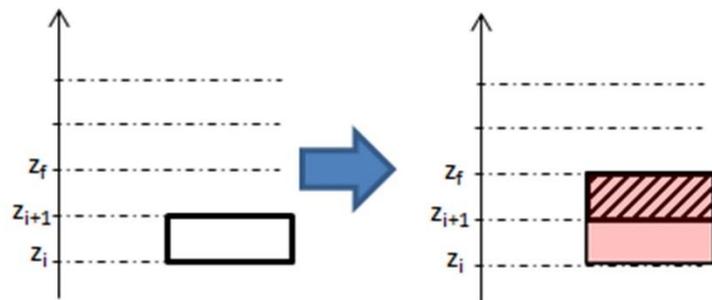


Bild B.8 Relative Position der Seite 1: Zylinder und Zerlegung, Fall d

Input data					Constant		Section coordinate			Intermediate variables	
HRR	Dfire	Q	Q	hf	σ	Tab _s	sf	xf	zf	z_{virt}	l
kW/m ²	m	W	MW	m			m	m	m		
1000	4	12566370.6	12.57	6.15	5.67E-08	273.15	2.5	0	1	-0.46	2.5

zi	Tf	ri	F _{cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face1}	Cylinder								Ring		
						Fi	Fi+1	S	X	A	Hi	Hi+1	zi-zf	zi+1-zf	H	Ri
m	°C	m	-	-	kW/m ²	-	-	-	-	-	-	-	m	m	-	-
0	900	2.00	0.0726	0	7.79	0.3705	0.2979	1.25	0	1.56	0.50	0.25	1.00	0.50	0	0.00
0.5	900	1.84	0.2374	0.0555	31.45	0.2374	0.0000	1.36	0	1.85	0.27	0.00	0.50	0.00	0.20	0.80
1	900	1.67	0.1893	0	20.33	0.0000	0.1893	1.49	0	2.23	0.00	0.30	0.00	0.50	0	0.73
1.5	900	1.51	0.0823	0	8.84	0.1514	0.2337	1.65	0	2.73	0.33	0.66	0.50	1.00	0	0.67
2	900	1.35	0.0361	0	3.88	0.1953	0.2315	1.85	0	3.43	0.74	1.11	1.00	1.50	0	0.60
2.5	900	1.19	0.0177	0	1.91	0.1958	0.2136	2.11	0	4.43	1.26	1.68	1.50	2.00	0	0.54
3	900	1.02	0.0095	0	1.02	0.1797	0.1893	2.44	0	5.95	1.95	2.44	2.00	2.50	0	0.47
3.5	900	0.86	0.0054	0	0.58	0.1564	0.1618	2.90	0	8.41	2.90	3.48	2.50	3.00	0	0.41
4	900	0.70	0.0031	0	0.34	0.1296	0.1328	3.57	0	12.77	4.29	5.00	3.00	3.50	0	0.34
4.5	828	0.54	0.0018	0	0.15	0.1009	0.1027	4.66	0	21.68	6.52	7.45	3.50	4.00	0	0.28
5	708	0.37	0.0010	0	0.05	0.0711	0.0720	6.68	0	44.58	10.68	12.02	4.00	4.50	0	0.21
5.5	615	0.21	0.0004	0	0.02	0.0405	0.0409	11.80	0	139.24	21.24	23.60	4.50	5.00	0	0.15
6	540	0.05	0.0001	0	0.00	0.0095	0.0096	50.71	0	2571.11	101.41	111.55	5.00	5.50	0	0.08
6.5	479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00	0	0.02
7	429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50	0	0
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	1.00	0	0

		Incident heat flux on face 1	76.36	kW/m ²
		Absorbed heat flux on face 1	53.45	kW/m ²

Bild B.9 Beispiel eines Excel-Arbeitsblattes zur Berechnung der auf Seite 1 einfallenden Wärmestromdichte

Gleichung (A.9) kann nicht direkt für Seite 2 (und Seite 4) verwendet werden, weil manche Teile der Flamme nicht sichtbar sind. Für Seite 2 und einen Zylinder C_i (zwischen z_i und z_{i+1}) wird die Position der Seite 2 im lokalen Koordinatensystem $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ als (s_f, x_f, z_f) definiert (Bild B.10). Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, wird der Zylinder C_i angepasst und dann werden die zusätzlichen Punkte A, B und C eingeführt. Der komplexeste Teil ist die Charakterisierung dieses angepassten Zylinders.

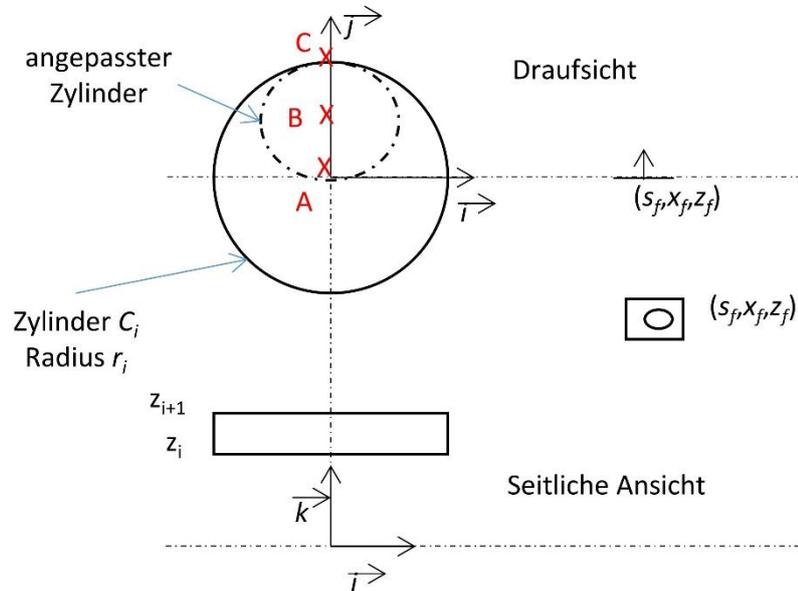


Bild B.10 Koordinaten der Seite 2

Punkt A entspricht dem Punkt mit der kleinsten y-Koordinate r_{min} beim angepassten Zylinder:

$$r_{min} = \max(-r_i, x_f) \quad (\text{B.6})$$

Punkt C entspricht dem Punkt mit der größten y-Koordinate r_{max} beim angepassten Zylinder:

$$r_{max} = r_i \quad (\text{B.7})$$

Punkt B entspricht dem Mittelpunkt des angepassten Zylinders:

$$y_{centre} = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} \quad (\text{B.8})$$

Der Radius des angepassten Zylinders ist:

$$r_{adjusted} = \frac{r_{max} - r_{min}}{2} \quad (\text{B.9})$$

Dies erlaubt die Bestimmung der Parameter für den angepassten Zylinder, die in **Gleichung** (B.1) verwendet werden.

Für den Zylinder C_0 zwischen 0 m und 0,5 m ist der Ausgangsradius 2 m, so dass:

$$\begin{aligned}
r_{min} &= \max(-2,0) = 0 \text{ m} \\
r_{max} &= 2 \text{ m} \\
y_{centre} &= \frac{0+2}{2} = 1 \text{ m} \\
r_{adjusted} &= \frac{2-0}{2} = 1 \text{ m}
\end{aligned} \tag{B.10}$$

Je nach der relativen Höhe der Seite 2 und des modifizierten Zylinders muss der Additionsregel wie bei Seite 1 verwendet werden:

$$\begin{aligned}
\Phi_i &= \Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \left(\begin{array}{l} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_i - z_f| \end{array} \right) \\
\Phi_{i+1} &= \Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \left(\begin{array}{l} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_{i+1} - z_f| \end{array} \right)
\end{aligned} \tag{B.11}$$

Der Konfigurationsfaktor Φ zwischen Seite 2 und dem modifizierten Zylinder ist dann:

$$\Phi = |\Phi_{i+1} - \Phi_i| \tag{B.12}$$

Die von den Ringen ausgestrahlte Wärmestrahlungsdichte beschränkt sich nochmal auf den Ring bei 0,5 m, genauer gesagt auf den modifizierten Ring, der durch seinen Innenradius und Außenradius definiert wird. Dies entspricht dem Radius des modifizierten Zylinders, der vorher für den Außenradius (1 m) berechnet wurde. Bei dem Innenradius wird der Ausgangsradius von 1,84 m auf 0,92 m reduziert (siehe den r_i -Wert bei $z_i = 0,5$ m in Bild B.11).

Die auf Seite 2 einfallende Wärmestromdichte ist dann die Summe aller Beiträge der modifizierten soliden Flamme und ist gleich 7,41 kW/m²; bei einer Emissivität der Stütze von 0,7 ist die absorbierte Wärmestrahlungsdichte dann 5,19 kW/m². Bild B.11 zeigt ein Beispiel der Umsetzung mit Hilfe eines Excel-Arbeitsblattes.

Die von jeder Seite absorbierte Wärmestrahlungsdichte ist daher:

$$\begin{aligned}
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_1} &= 53,45 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_2} &= 6,00 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_3} &= 0 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_4} &= 6,00 \text{ kW/m}^2
\end{aligned} \tag{B.13}$$

Da die Breite jeder Seite eines HEB 300 Profils 0,3 m beträgt, ist die gesamte Wärmestrahlungsdichte, die in einer Höhe von 1,0 m von einem Segment angenommen wird:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \frac{53,45 + 6,00 + 0 + 6,00}{4} = 16,36 \text{ kW/m}^2 \tag{B.14}$$

zi	Tf	ri	F _{cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face2}	Ring		
m	°C	m	-	-	kW/m ²	H	Ri	Ri+1
0	900	2.00	0.0175	0	1.88	0	0.00	0.00
0.5	900	1.84	0.0193	0.0060	2.71	0.20	0.40	0.37
1	900	1.67	0.0160	0	1.72	0	0.37	0.33
1.5	900	1.51	0.0103	0	1.10	0	0.33	0.30
2	900	1.35	0.0056	0	0.60	0	0.30	0.27
2.5	900	1.19	0.0028	0	0.30	0	0.27	0.24
3	900	1.02	0.0014	0	0.15	0	0.24	0.20
3.5	900	0.86	0.0006	0	0.07	0	0.20	0.17
4	900	0.70	0.0003	0	0.03	0	0.17	0.14
4.5	828	0.54	0.0001	0	0.01	0	0.14	0.11
5	708	0.37	0.0000	0	0.00	0	0.11	0.07
5.5	615	0.21	0.0000	0	0.00	0	0.07	0.04
6	540	0.05	0.0000	0	0.00	0	0.04	0.01
6.5	479	0	0	0	0	0	0.01	0.00
7	429	0	0	0	0	0	0	0
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0
Incident heat flux on face 2					8.57	kW/m ²		
Absorbed heat flux by face 2					6.00	kW/m ²		

Input data				
HRR	Dfire	Q	Q	hf
kW/m ²	m	W	MW	m
1000	4	12566370.6	12.57	6.15

Section coordinate		
sf	xf	zf
m	m	m
2.5	0	1

Constant		Intermediate variables	
σ	Tabs	z _{virt}	l
5.67E-08	273.15	-0.46	2.5

Modified cylinder / ring				Cylinder									
rmin	rmax	ri_adjusted	ycenter	Fi	Fi+1	s	S	X	A	Hi	Hi+1	z _i -z _i 1	z _{i+1} -z _i 1
m	m	m	m	-	-	-	-	-	-	-	-	m	m
0	2.00	1.00	1.00	0.0403	0.0229	1.00	1.00	2.50	7.25	1.00	0.50	1.00	0.50
0	1.84	0.92	0.92	0.0193	0.0000	0.92	1.00	2.72	8.40	0.54	0.00	0.50	0.00
0	1.67	0.84	0.84	0.0000	0.0160	0.84	1.00	2.99	9.91	0.00	0.60	0.00	0.50
0	1.51	0.76	0.76	0.0130	0.0233	0.76	1.00	3.31	11.93	0.66	1.32	0.50	1.00
0	1.35	0.67	0.67	0.0185	0.0241	0.67	1.00	3.70	14.72	1.48	2.22	1.00	1.50
0	1.19	0.59	0.59	0.0187	0.0215	0.59	1.00	4.21	18.74	2.53	3.37	1.50	2.00
0	1.02	0.51	0.51	0.0161	0.0174	0.51	1.00	4.88	24.81	3.90	4.88	2.00	2.50
0	0.86	0.43	0.43	0.0124	0.0130	0.43	1.00	5.80	34.64	5.80	6.96	2.50	3.00
0	0.70	0.35	0.35	0.0086	0.0089	0.35	1.00	7.15	52.09	8.58	10.01	3.00	3.50
0	0.54	0.27	0.27	0.0053	0.0054	0.27	1.00	9.31	87.70	13.04	14.90	3.50	4.00
0	0.37	0.19	0.19	0.0026	0.0027	0.19	1.00	13.35	179.33	21.37	24.04	4.00	4.50
0	0.21	0.11	0.11	0.0009	0.0009	0.11	1.00	23.60	557.97	42.48	47.20	4.50	5.00
0	0.05	0.02	0.02	0.0000	0.0000	0.02	1.00	101.41	10285.43	202.82	223.11	5.00	5.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	7.00

Bild B.11 Beispiel eines Excel-Arbeitsblattes zur Berechnung der einfallenden Wärmestromdichte auf Seite 2

ANHANG C KONTURDIAGRAMME

Tabelle C ist eine Zusammenfassung der Konturdiagramme in diesem Anhang.

Tabelle C: Zusammenfassung der Konturdiagramme

Bild-Nr.	D (m)	HRR (kW/m ²)		Seite
		(kW/m ²)	(MW)	
C.1	2	250	0,8	62
C.2	2	500	1,6	63
C.3	2	1000	3,1	64
C.4	2	1500	4,7	65
C.5	3	250	1,8	66
C.6	3	500	3,5	67
C.7	3	1000	7,1	68
C.8	3	1500	10,6	69
C.9	4	250	3,1	70
C.10	4	500	6,3	71
C.11	4	1000	12,6	72
C.12	4	1500	18,8	73
C.13	6	250	7,1	74
C.14	6	500	14,1	75
C.15	6	1000	28,3	76
C.16	6	1500	42,4	77
C.17	8	250	12,6	78
C.18	8	500	25,1	79
C.19	8	1000	50,3	80
C.20	9	250	15,9	81
C.21	9	500	31,8	82
C.22	9	750	47,7	83
C.23	10	250	19,6	84
C.24	10	500	39,3	85

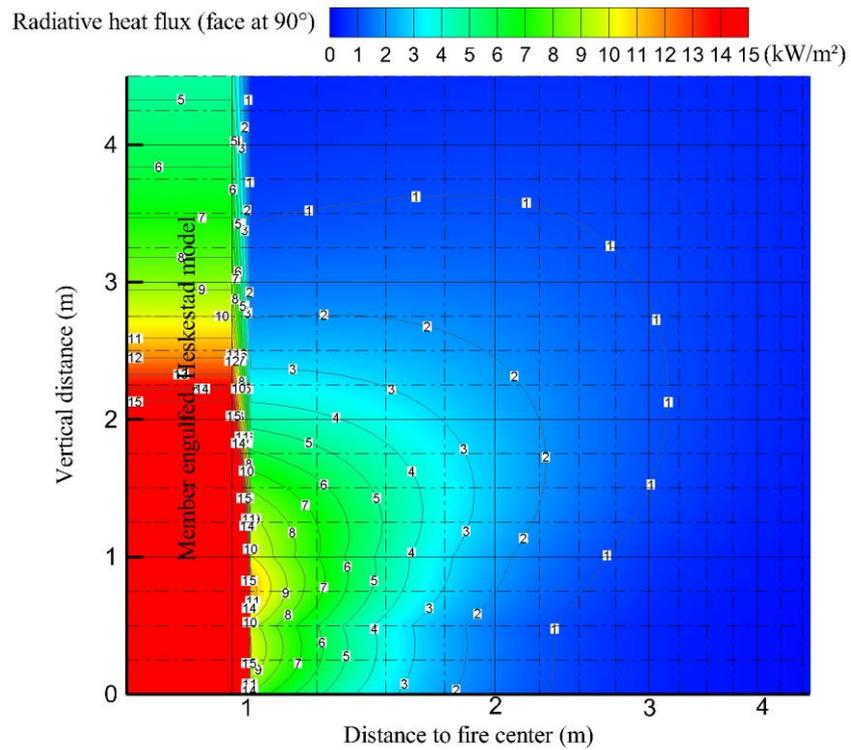
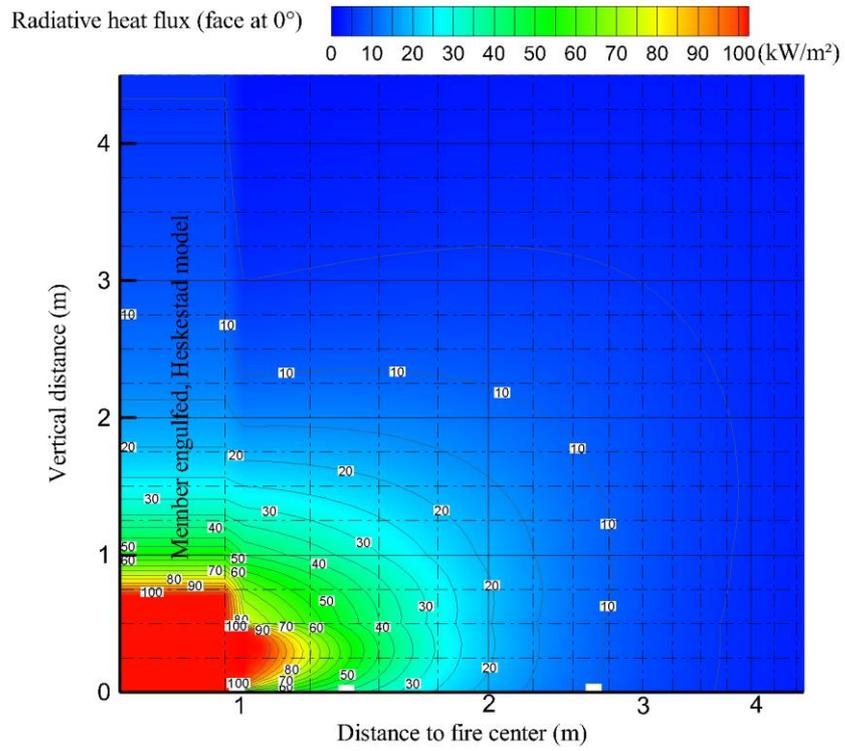


Bild C.1 Konturdiagramm für $D = 2 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

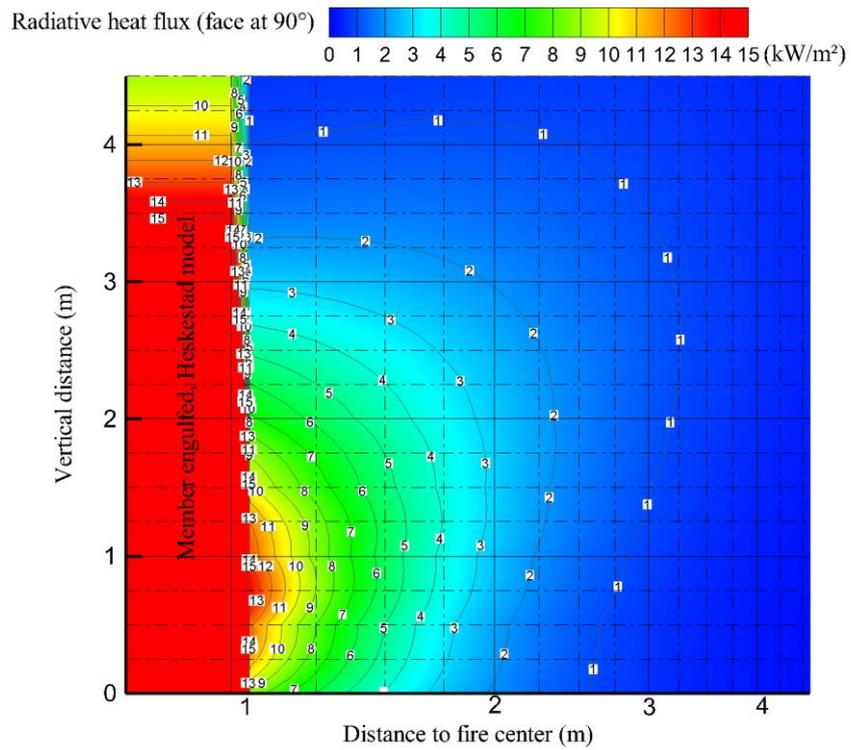
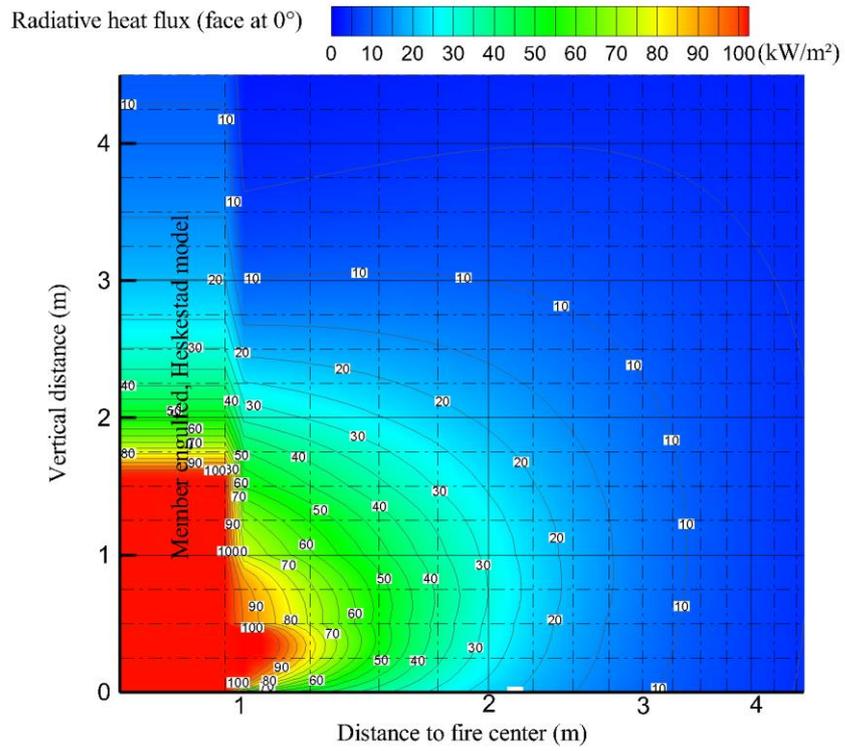


Bild C.2 Konturdiagramm für $D = 2 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

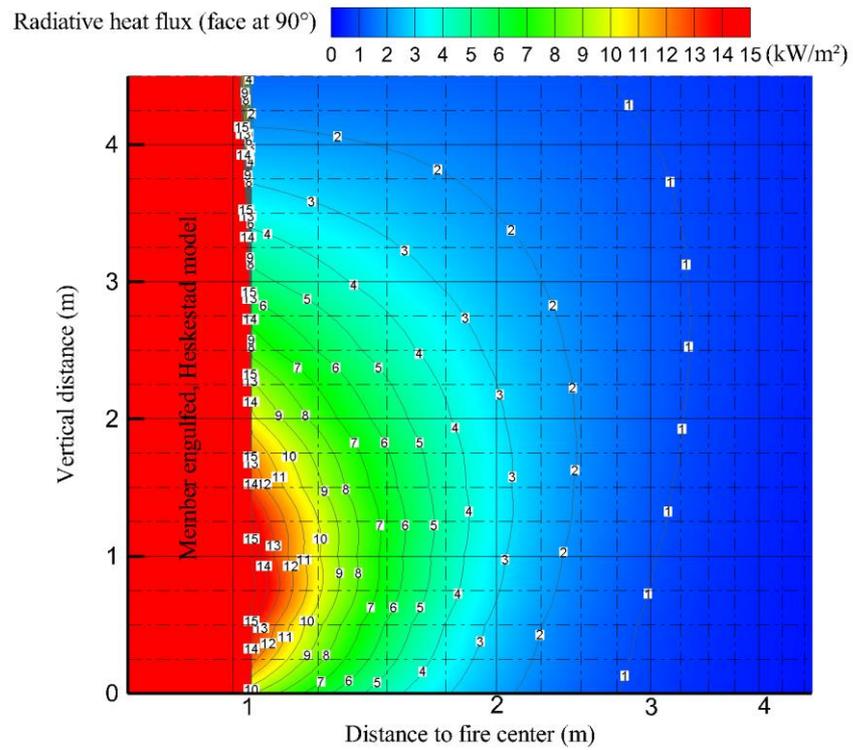
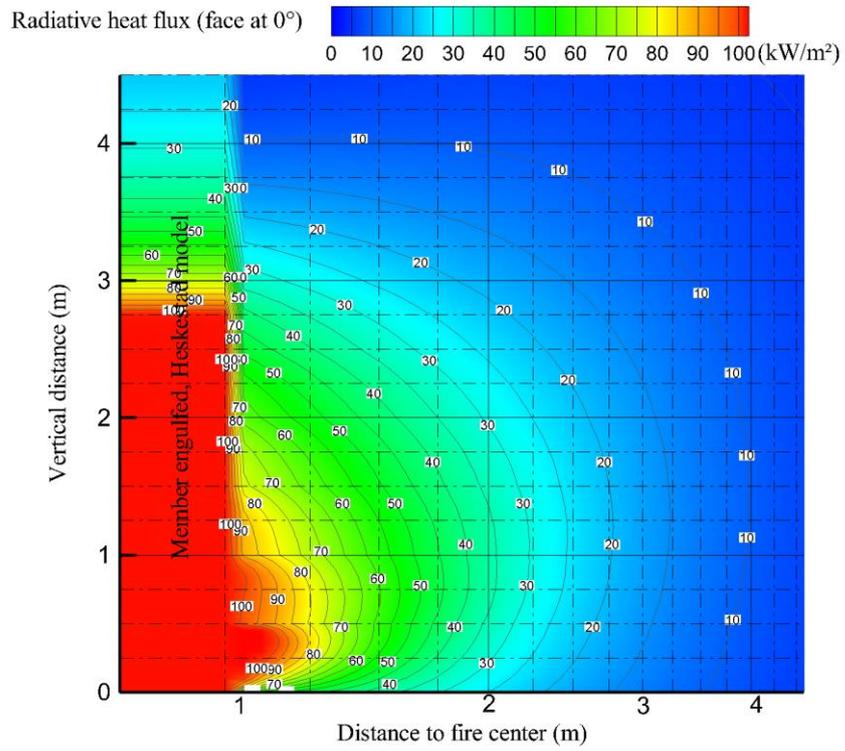


Bild C.3 Konturdiagramm für $D = 2 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

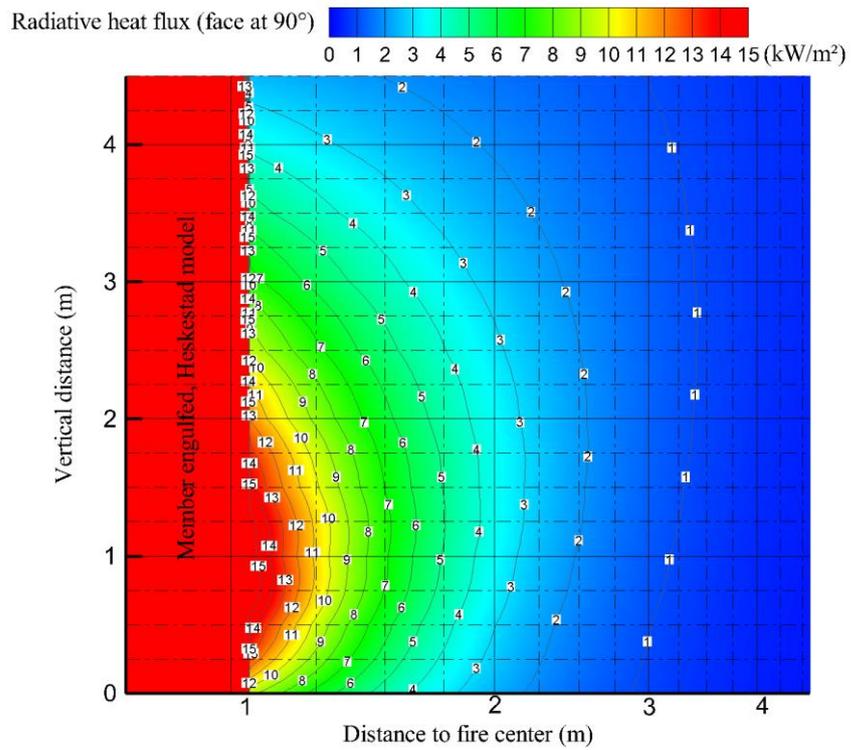
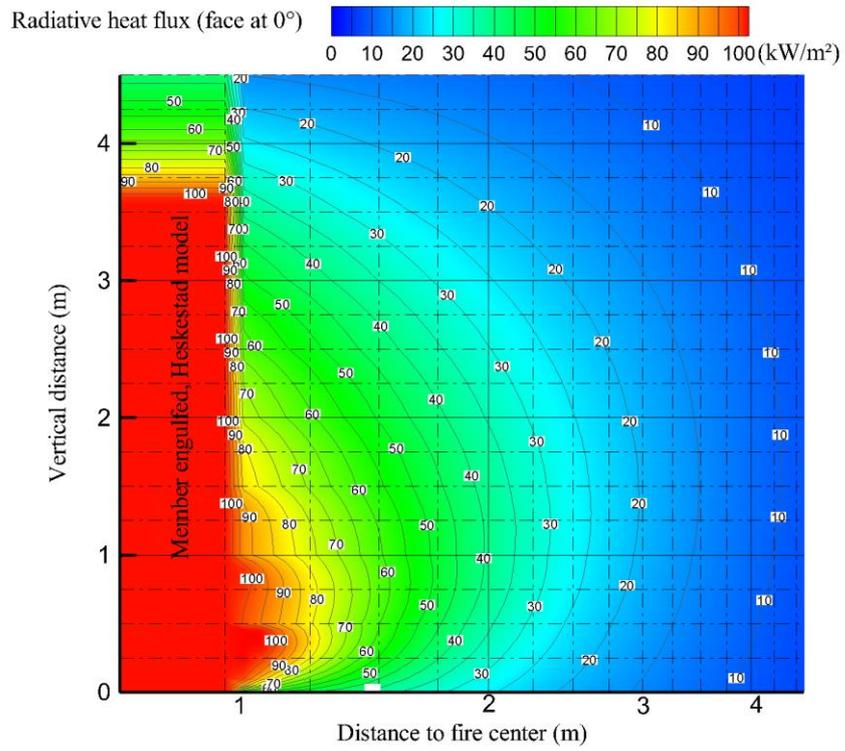
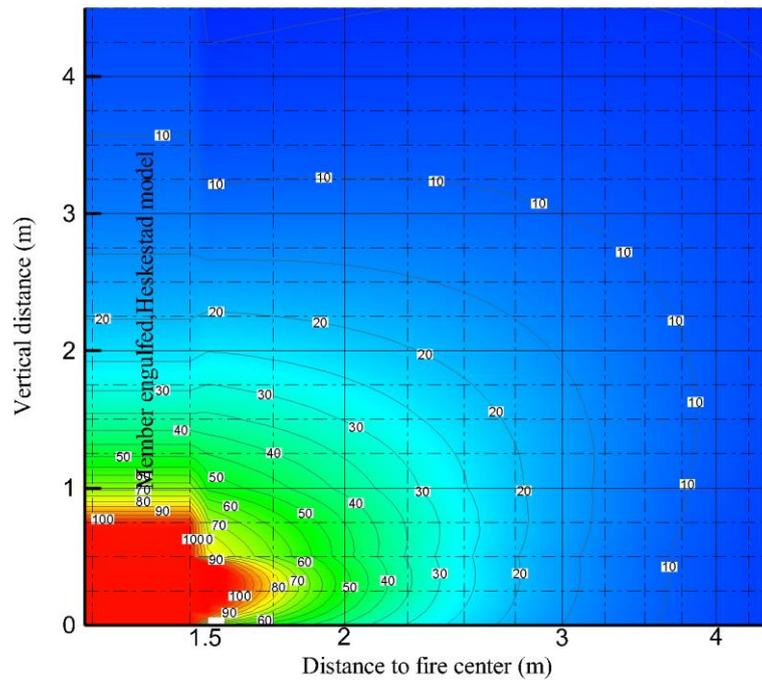


Bild C.4 Konturdiagramm für $D = 2 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

Radiative heat flux (face at 0°)  0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100(kW/m²)



Radiative heat flux (face at 90°)  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15(kW/m²)

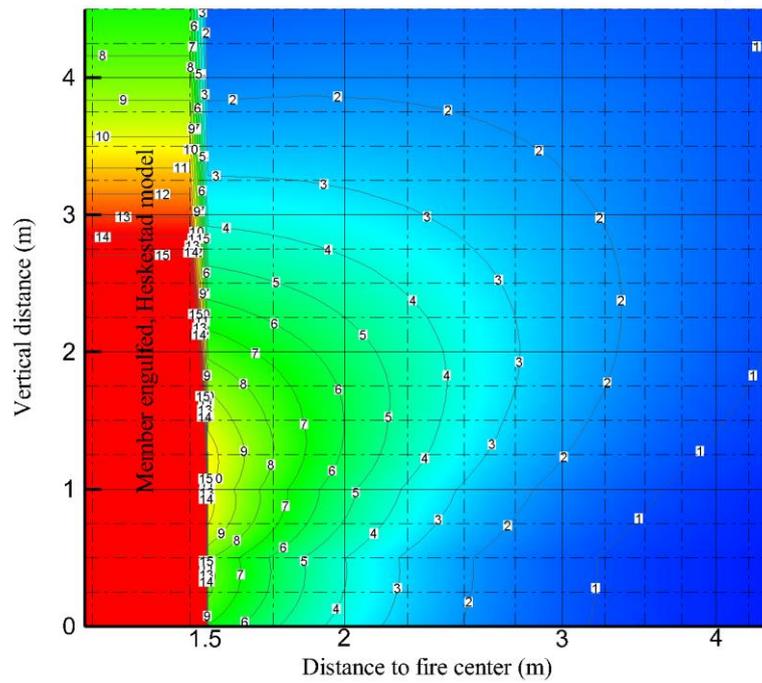


Bild C.5 Konturdiagramm für $D = 3 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

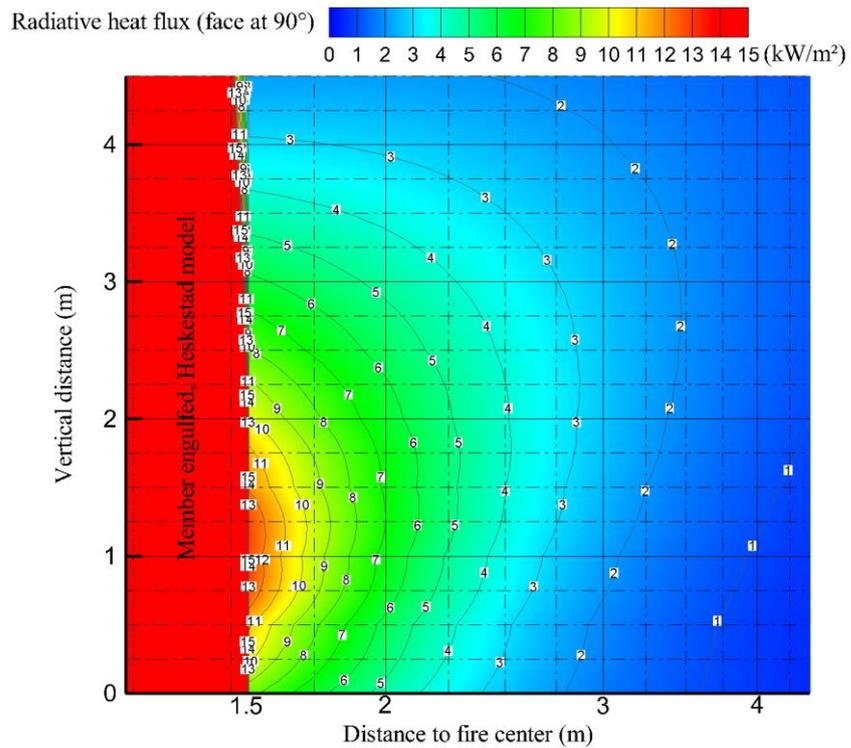
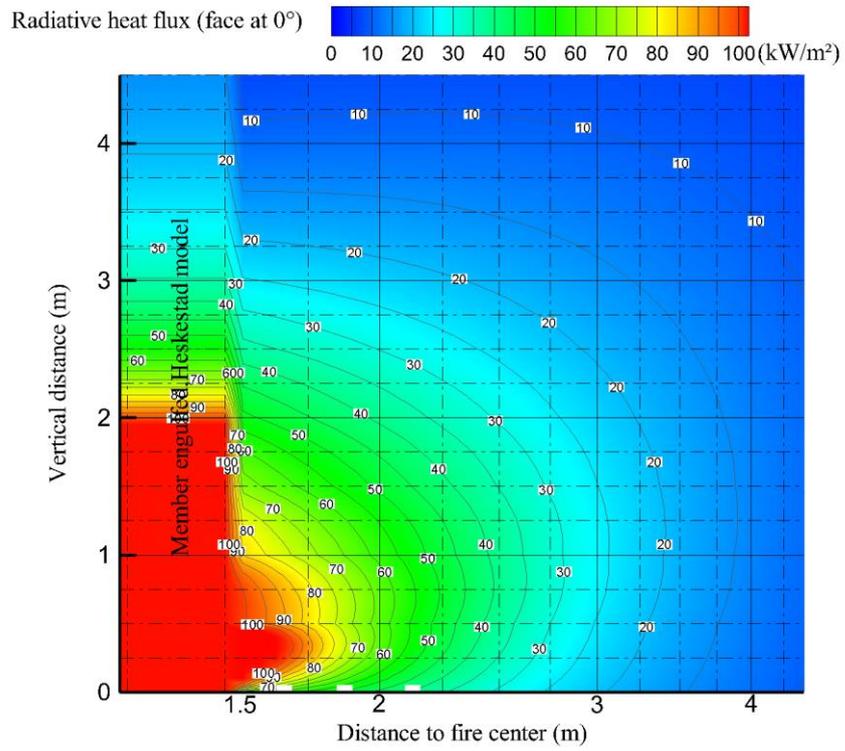


Bild C.6 Konturdiagramm für $D = 3 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

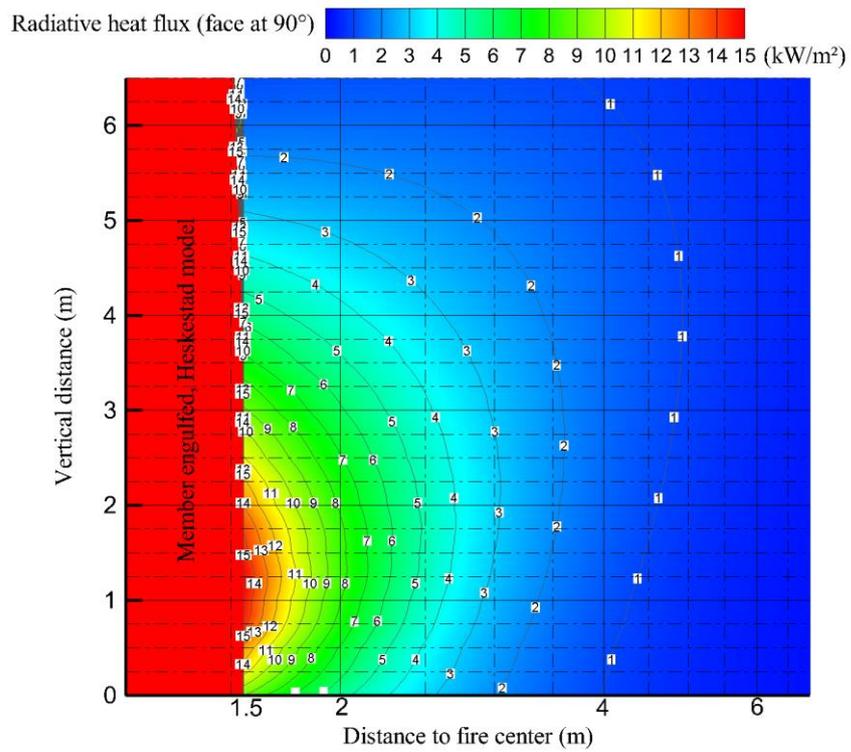
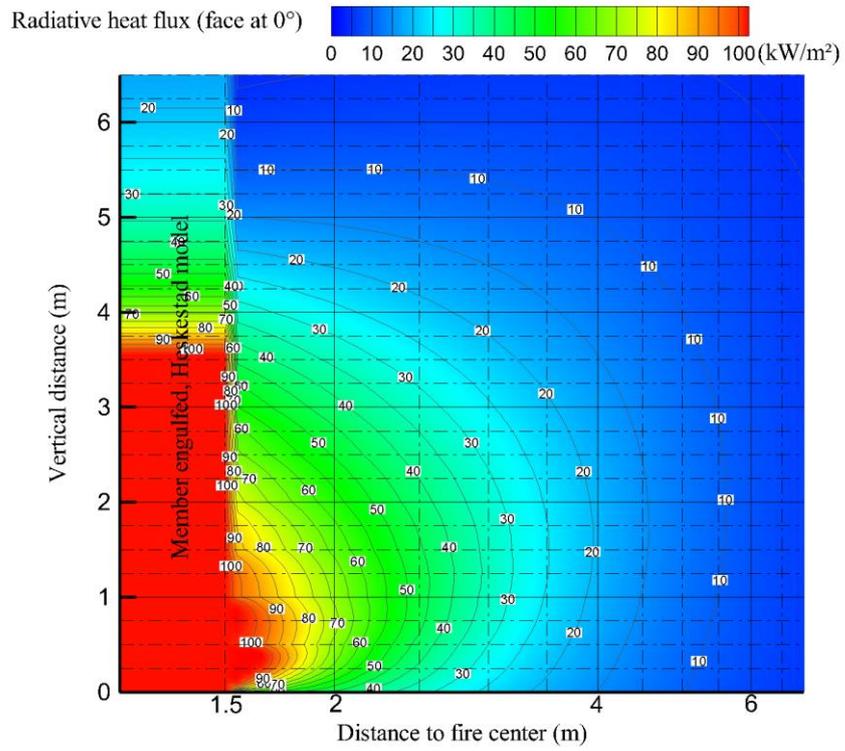


Bild C.7 Konturdiagramm für $D = 3 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

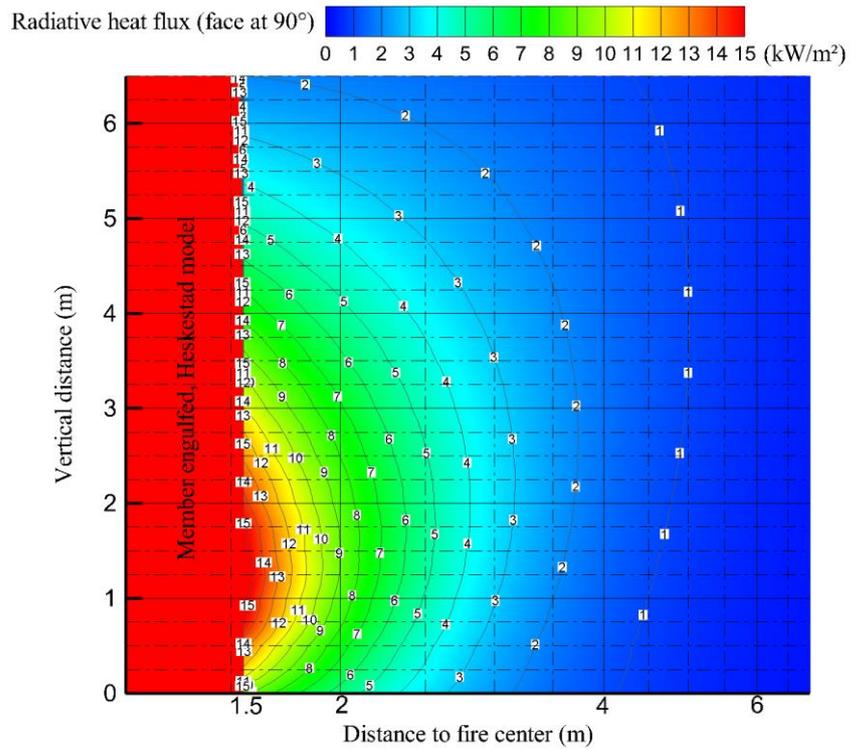
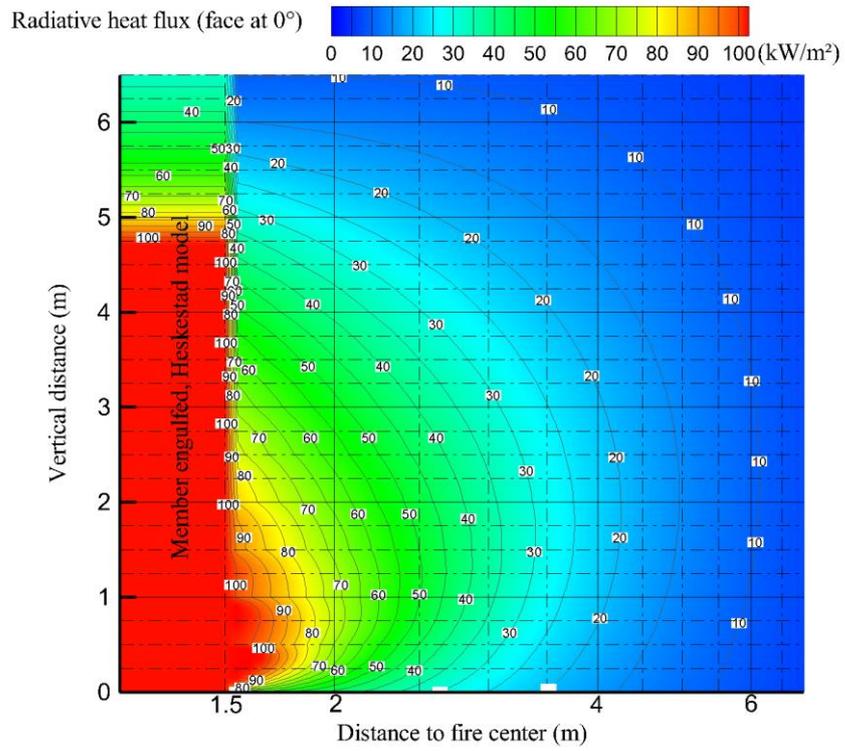
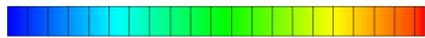
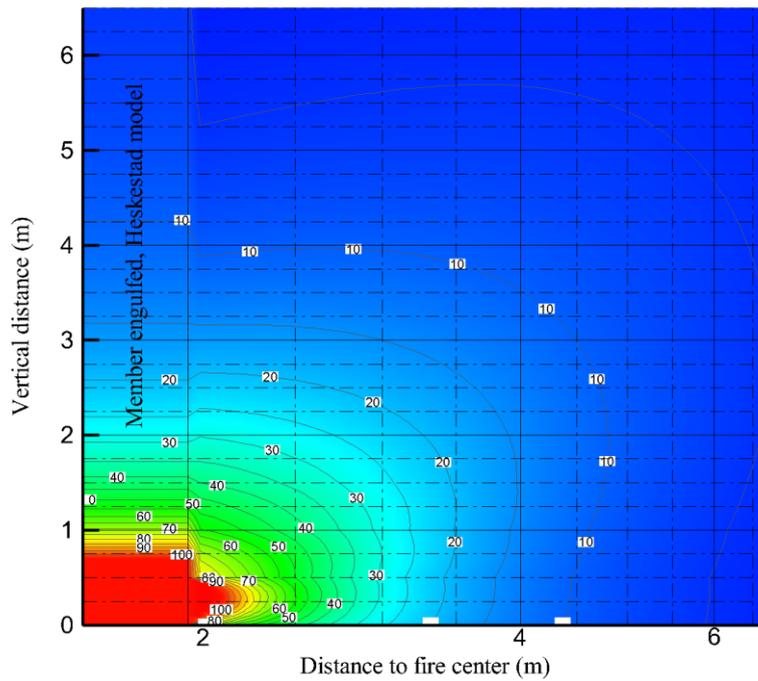


Bild C.8 Konturdiagramm für $D = 3 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

Radiative heat flux (face at 0°)  0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100(kW/m²)



Radiative heat flux (face at 90°)  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15(kW/m²)

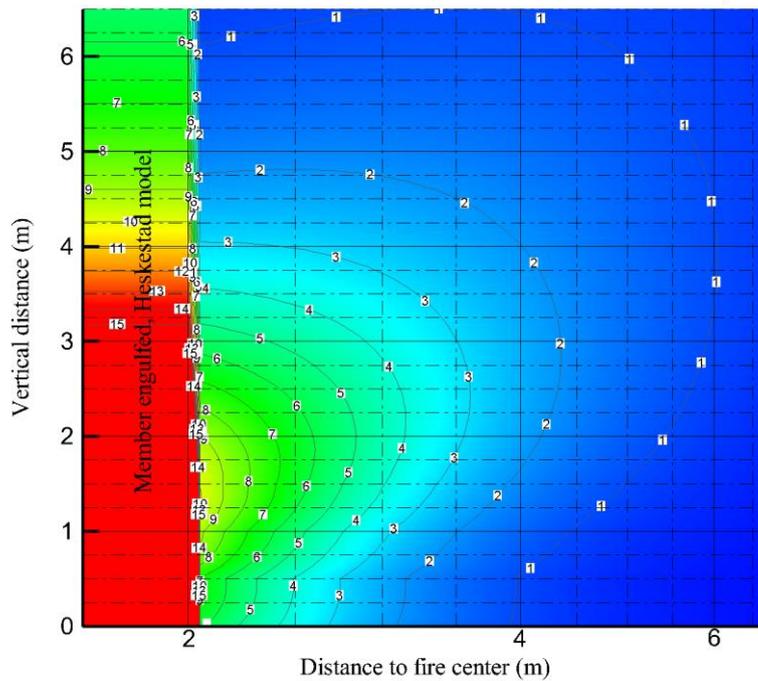


Bild C.9 Konturdiagramm für $D = 4 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

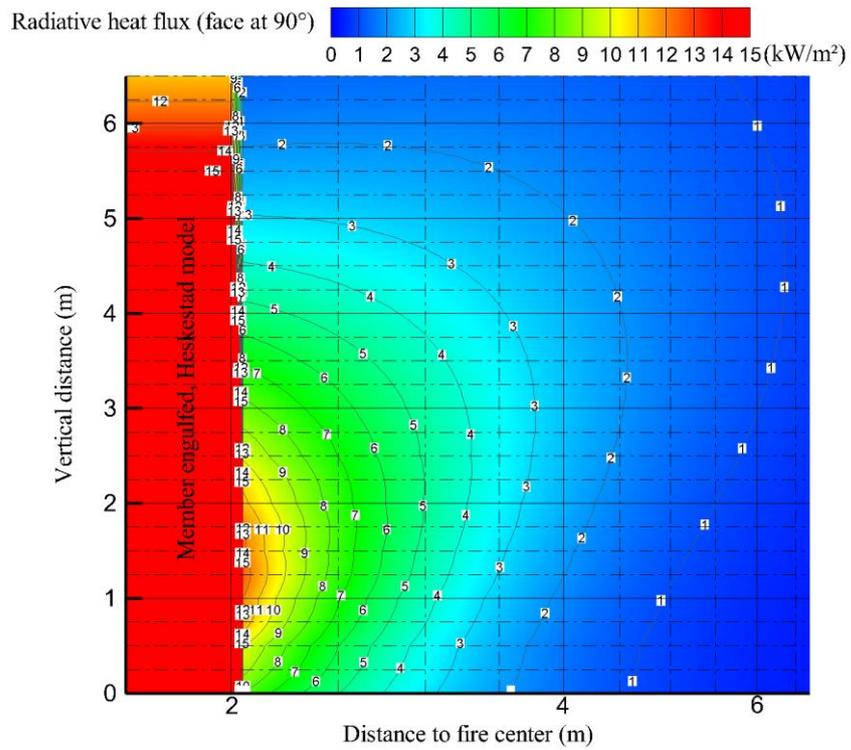
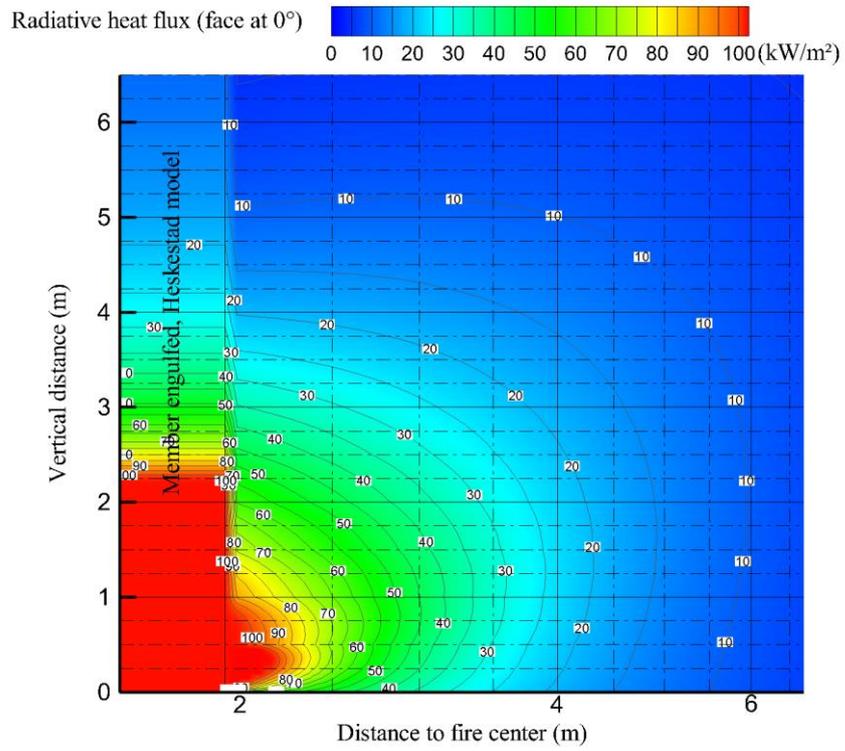


Bild C.10 Konturdiagramm für $D = 4 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

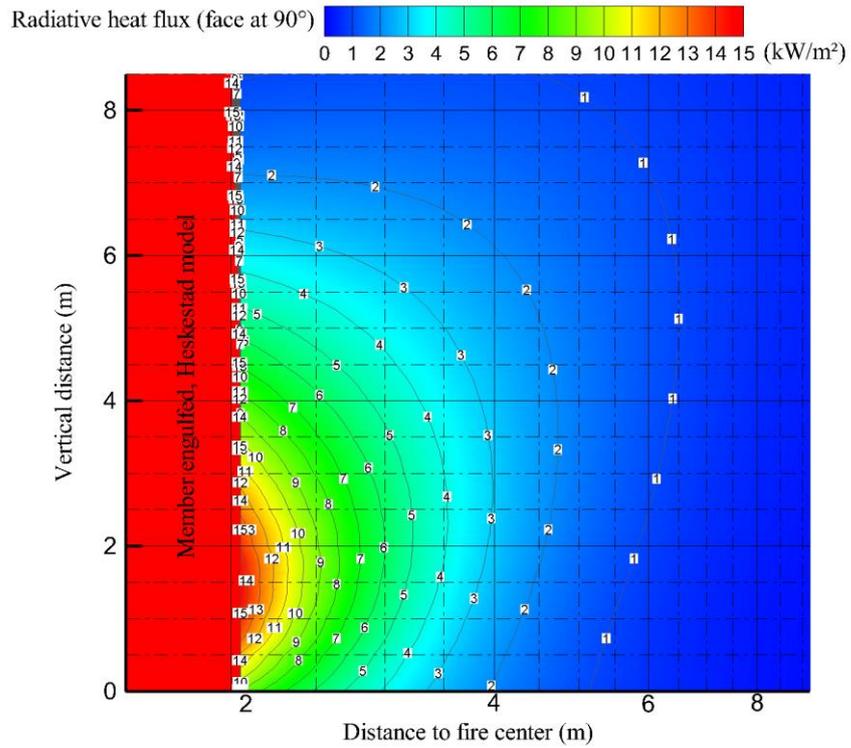
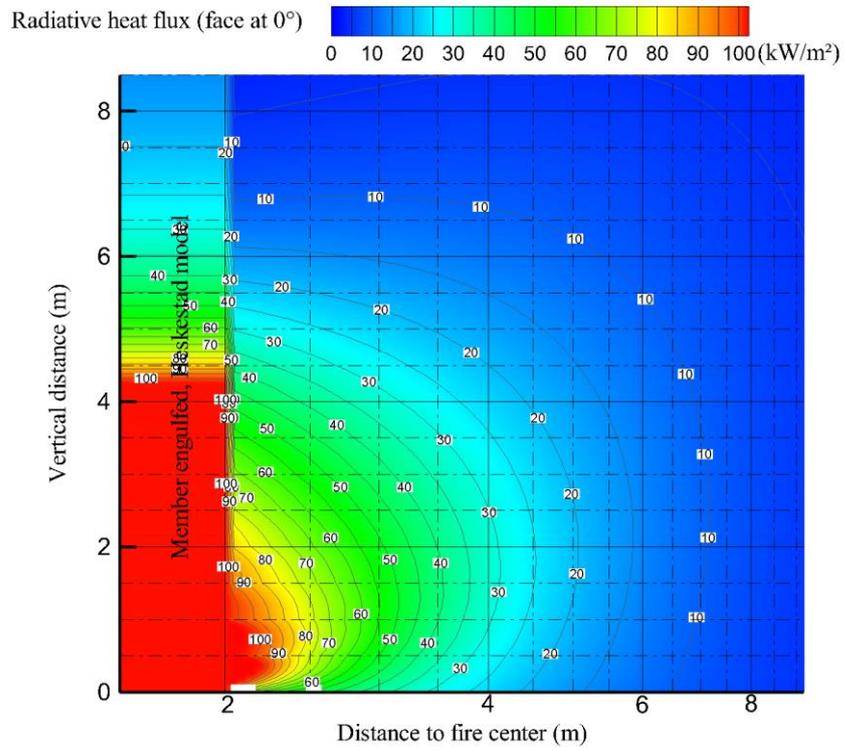


Bild C.11 Konturdiagramm für $D = 4 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

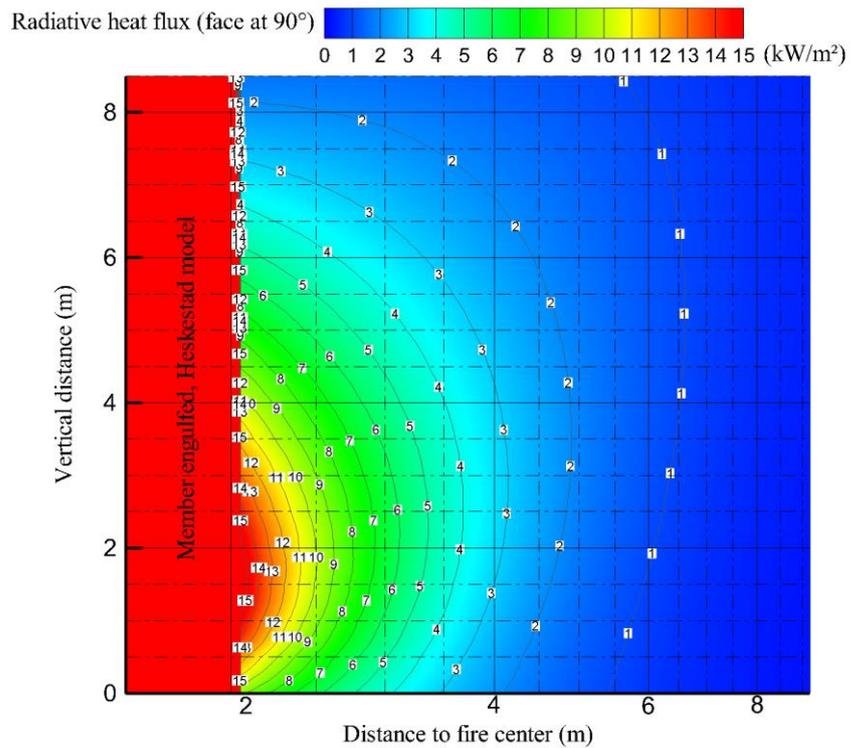
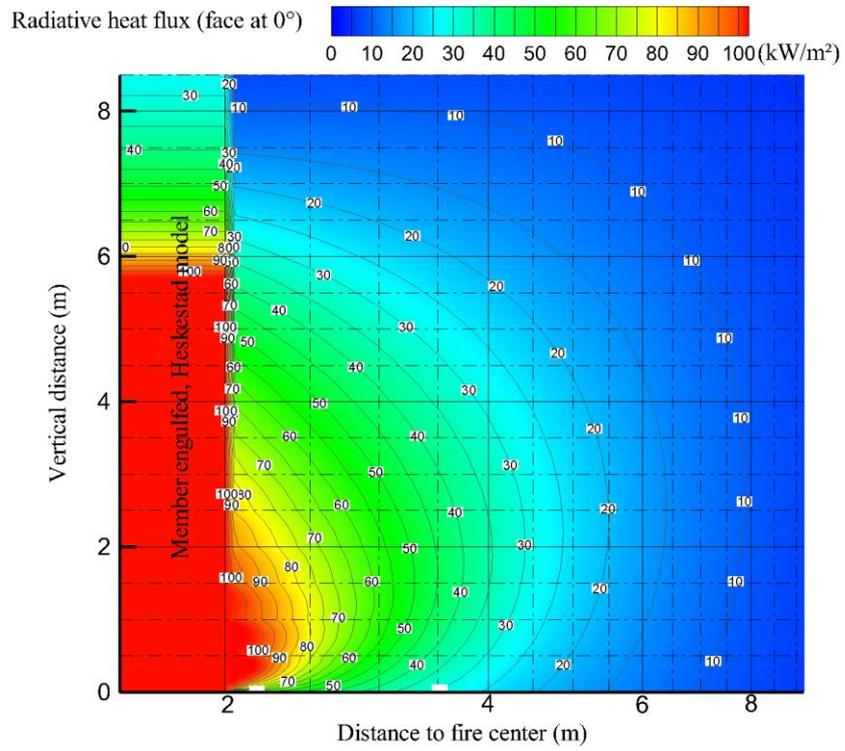


Bild C.12 Konturdiagramm für $D = 4 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

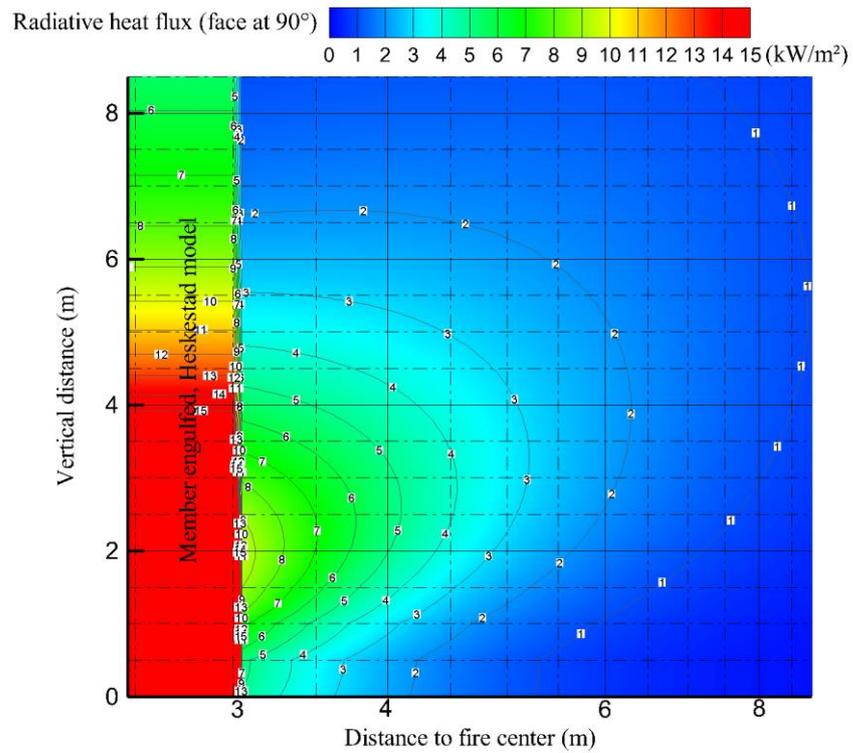
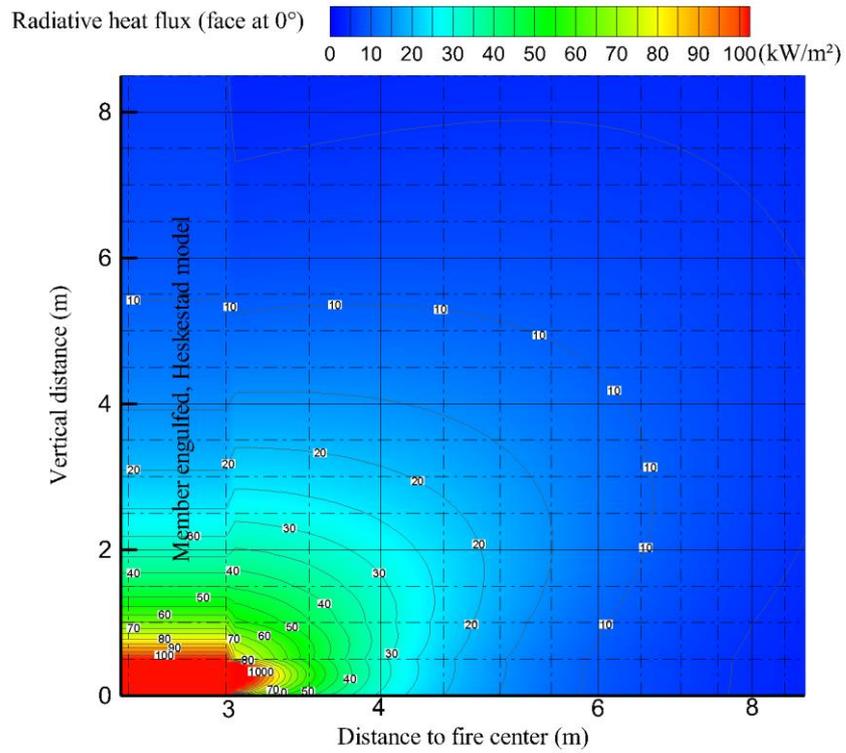


Bild C.13 Konturdiagramm für D = 6 m und HRR = 250 kW/m²

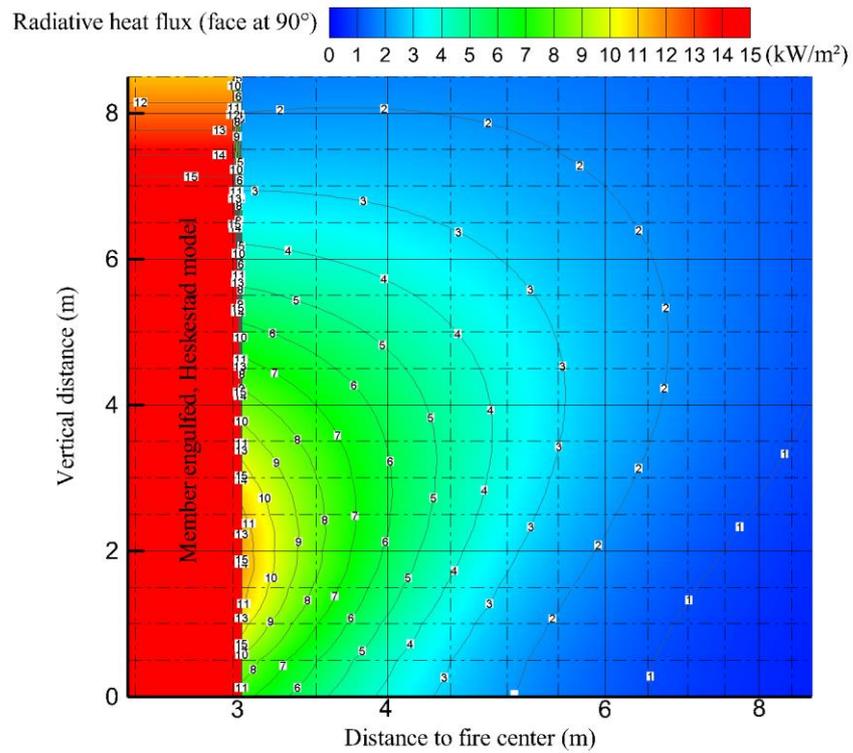
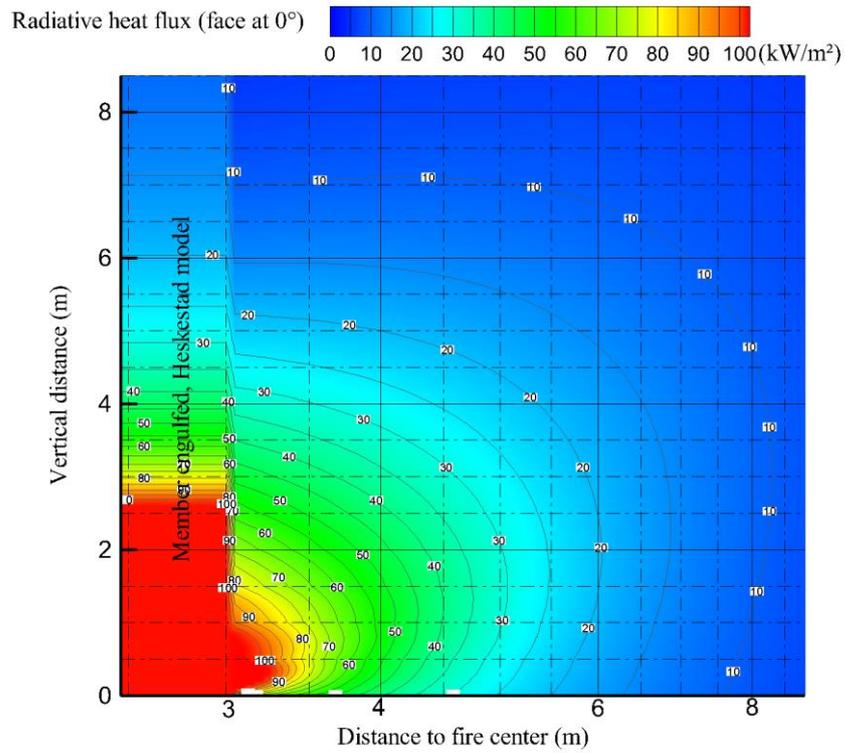


Bild C.14 Konturdiagramm für $D = 6 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

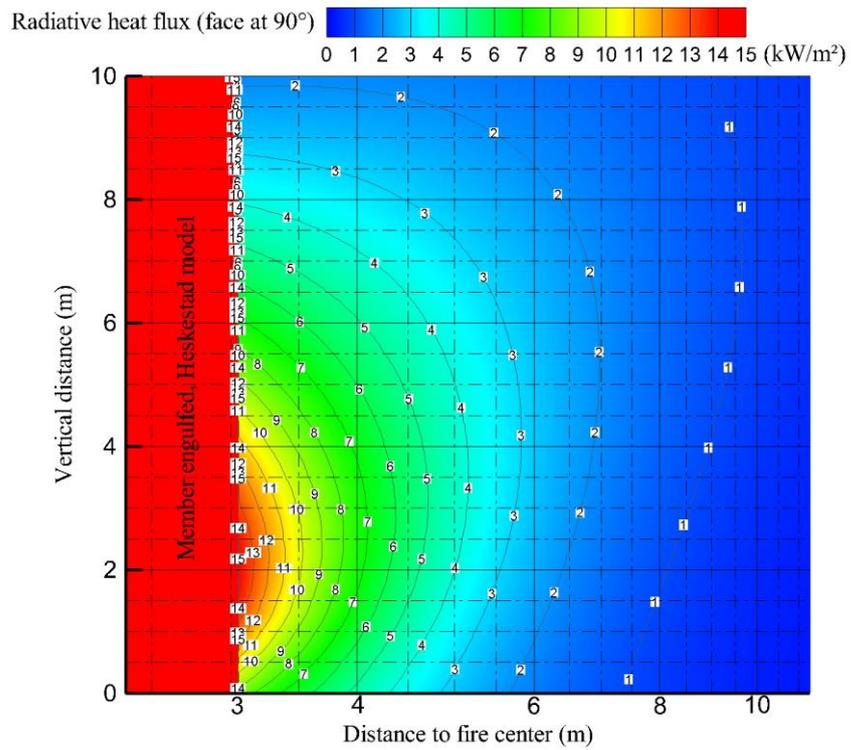
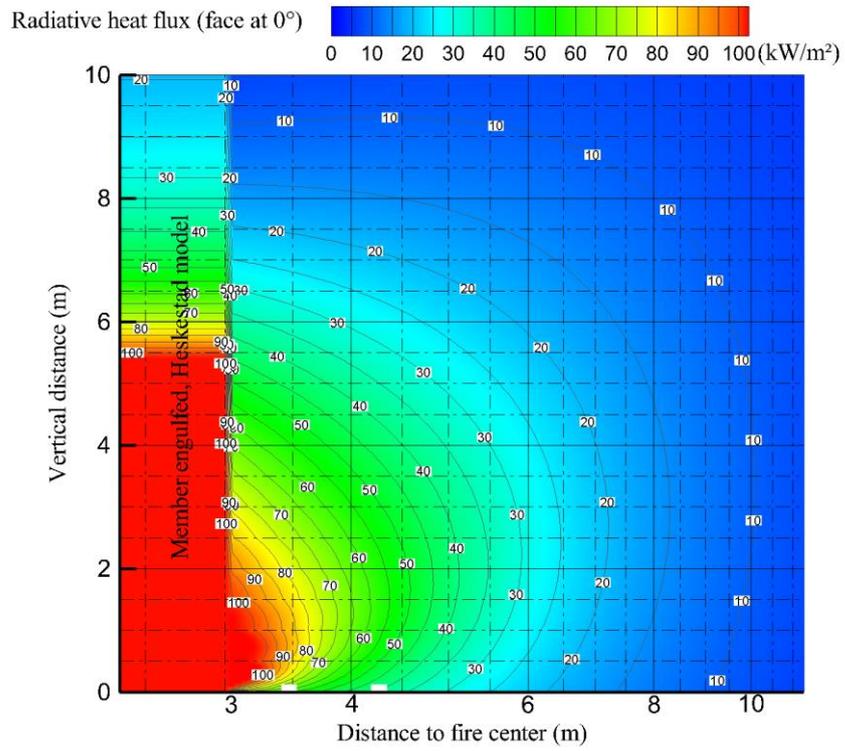


Bild C.15 Konturdiagramm für $D = 6 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

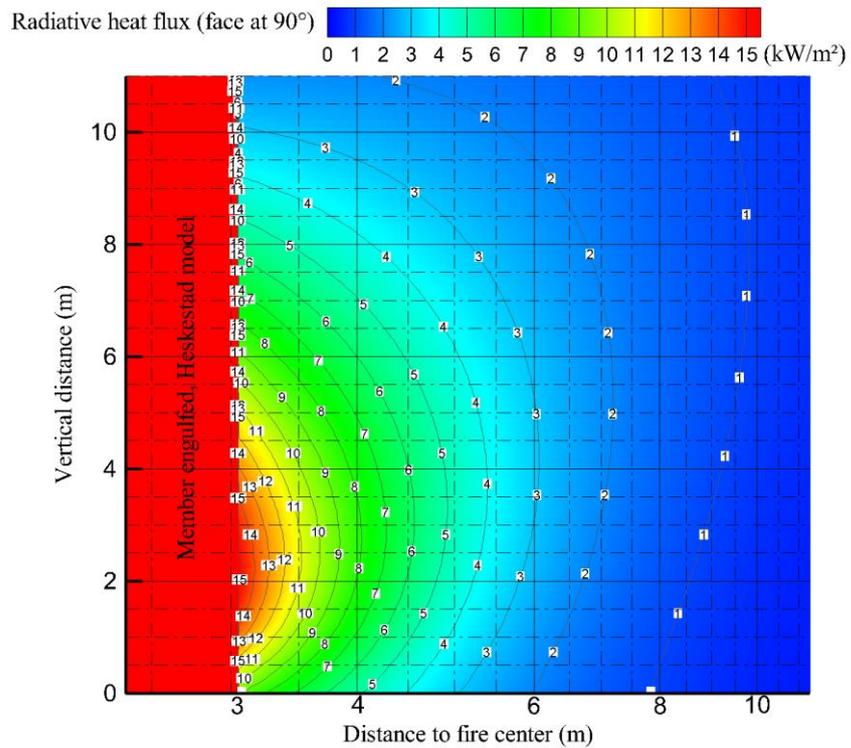
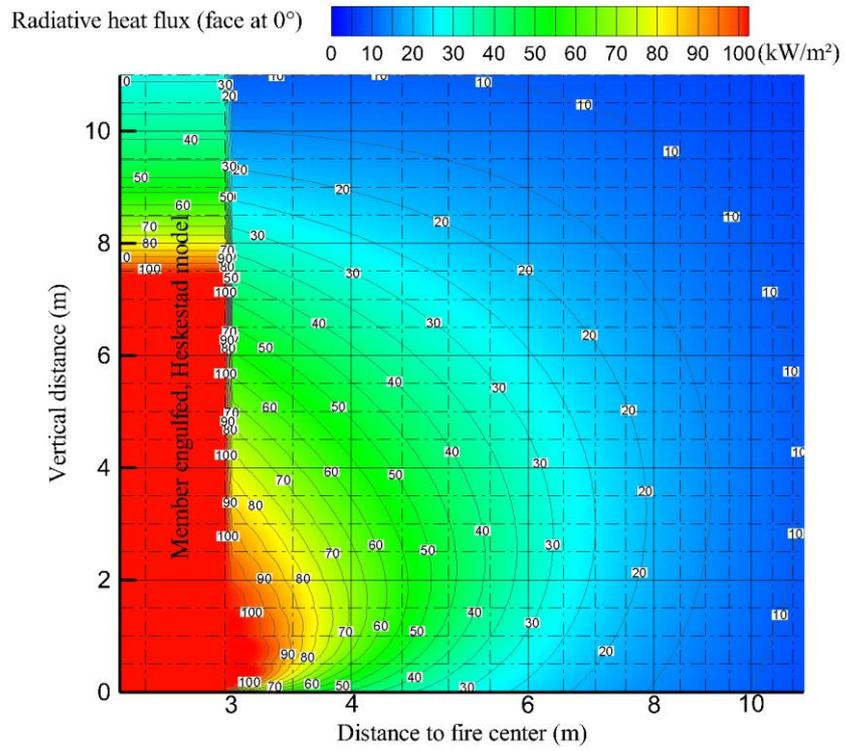


Bild C.16 Konturdiagramm für $D = 6 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

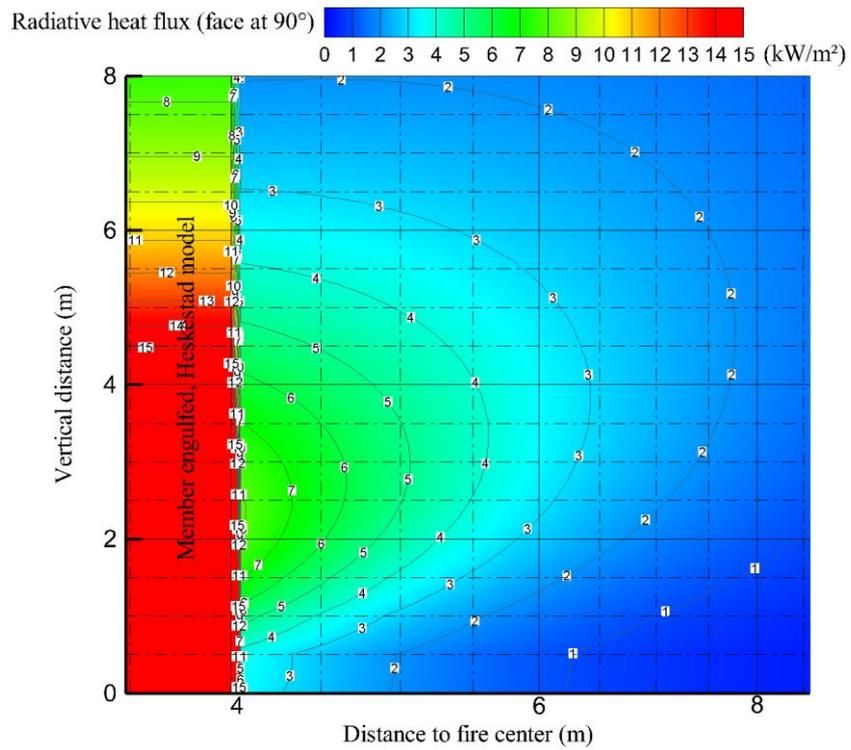
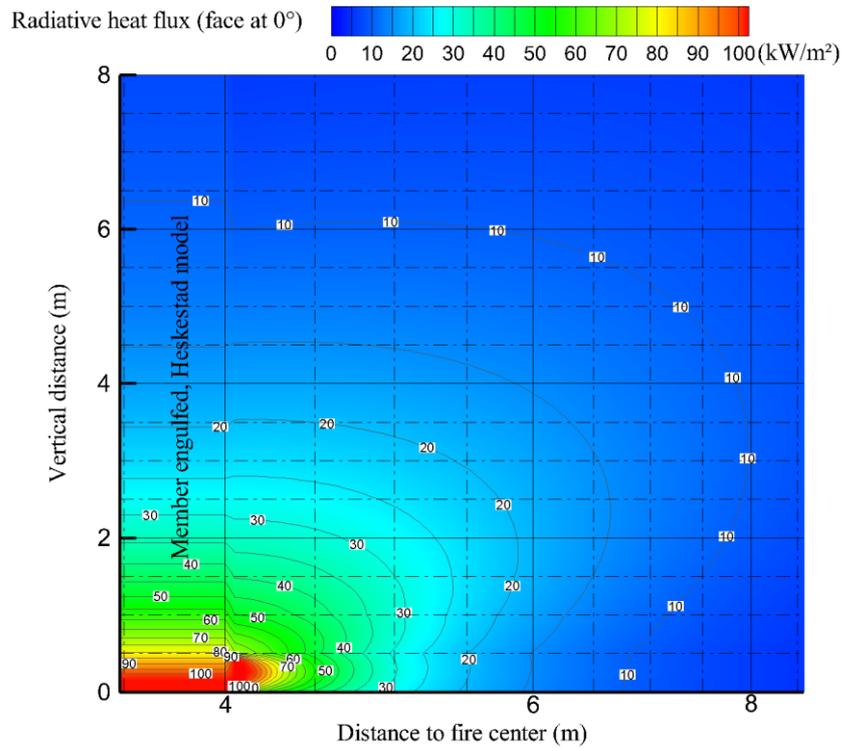


Bild C.17 Konturdiagramm für $D = 8 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

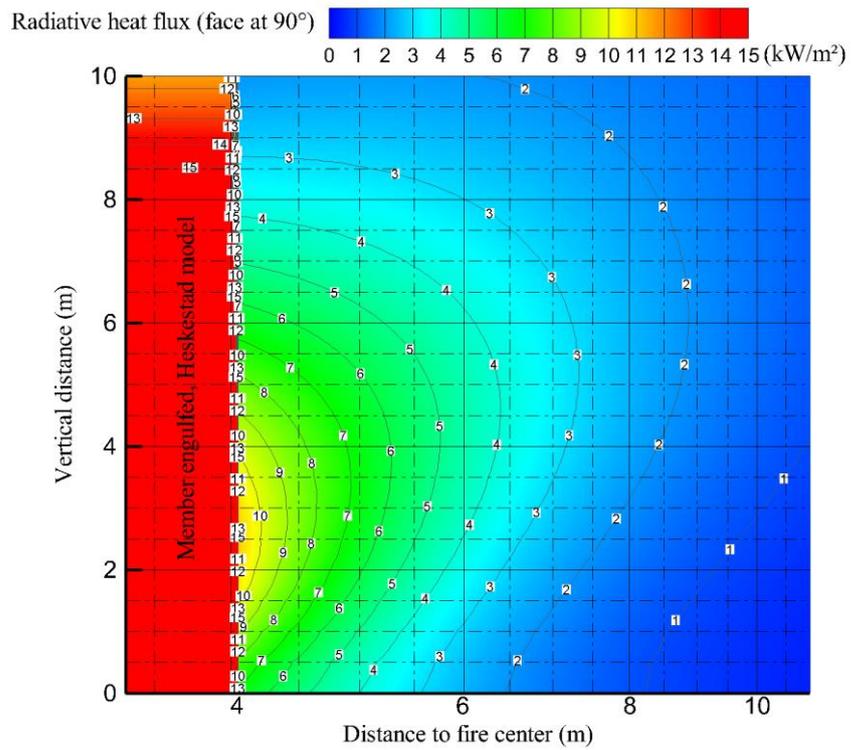
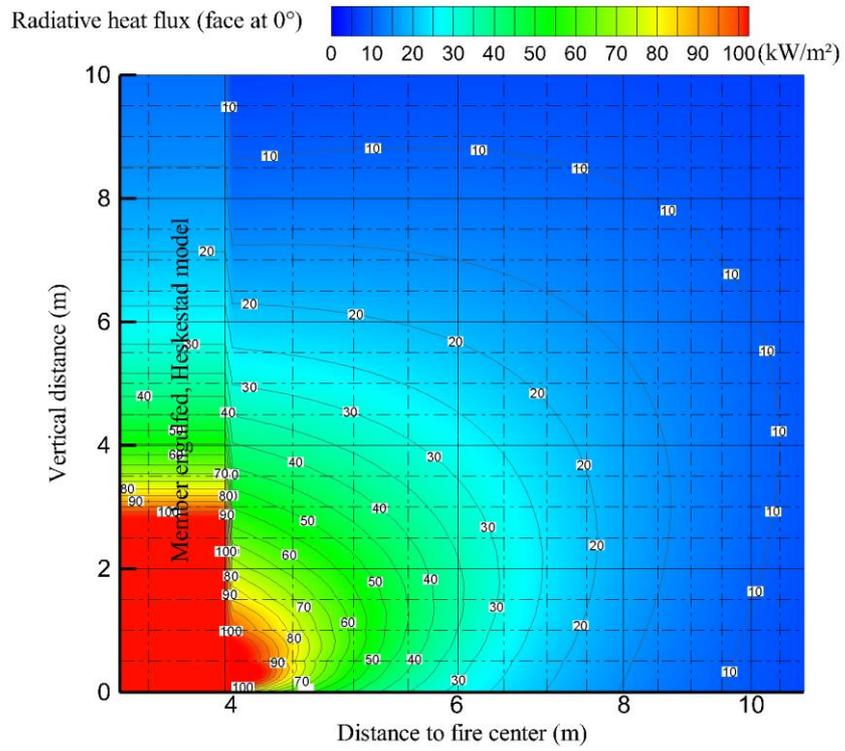


Bild C.18 Konturdiagramm für $D = 8 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

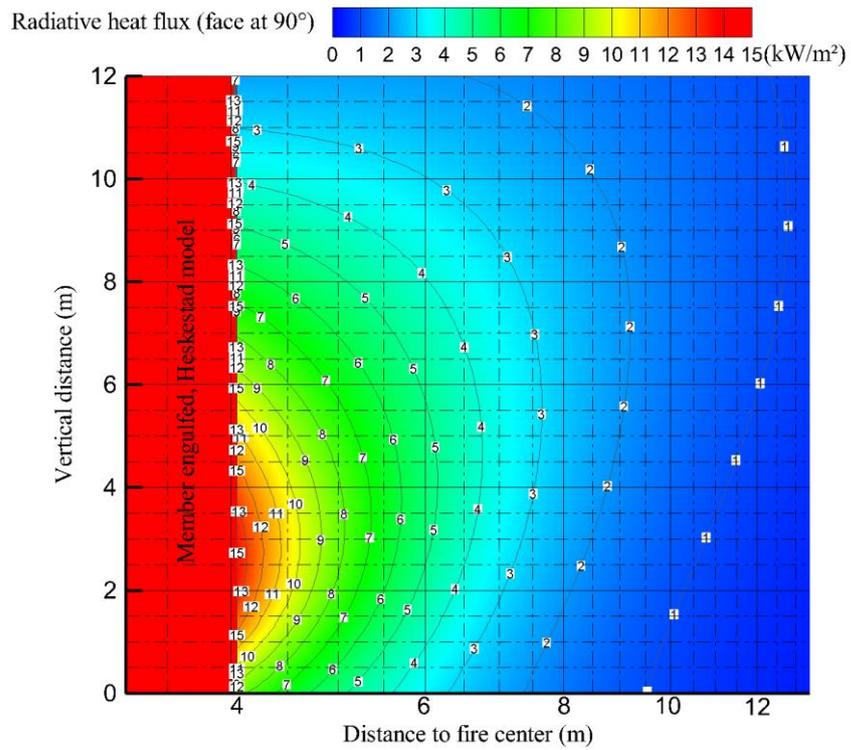
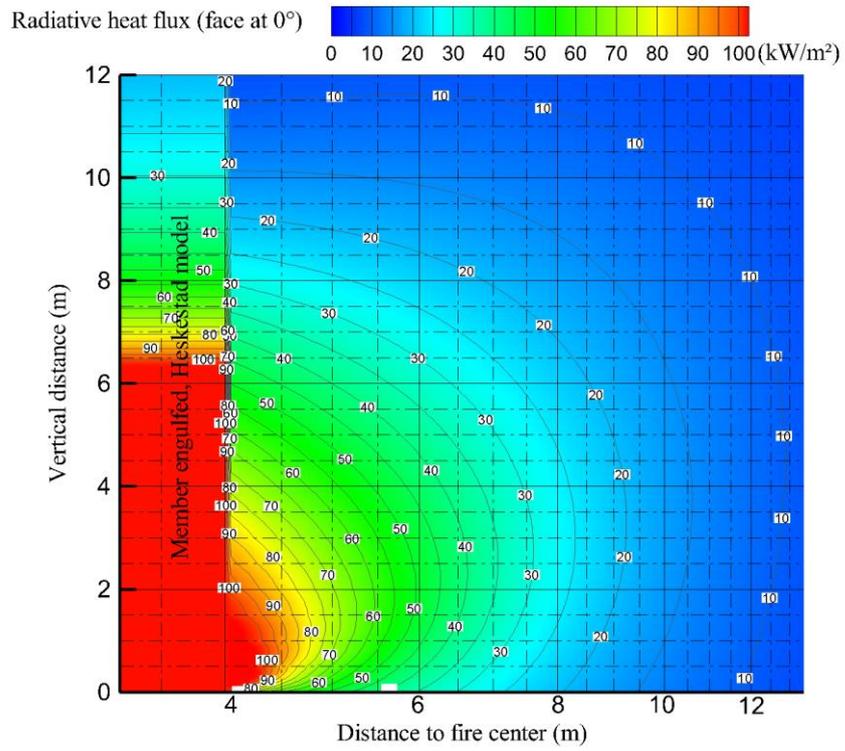


Bild C.19 Konturdiagramm für $D = 8 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

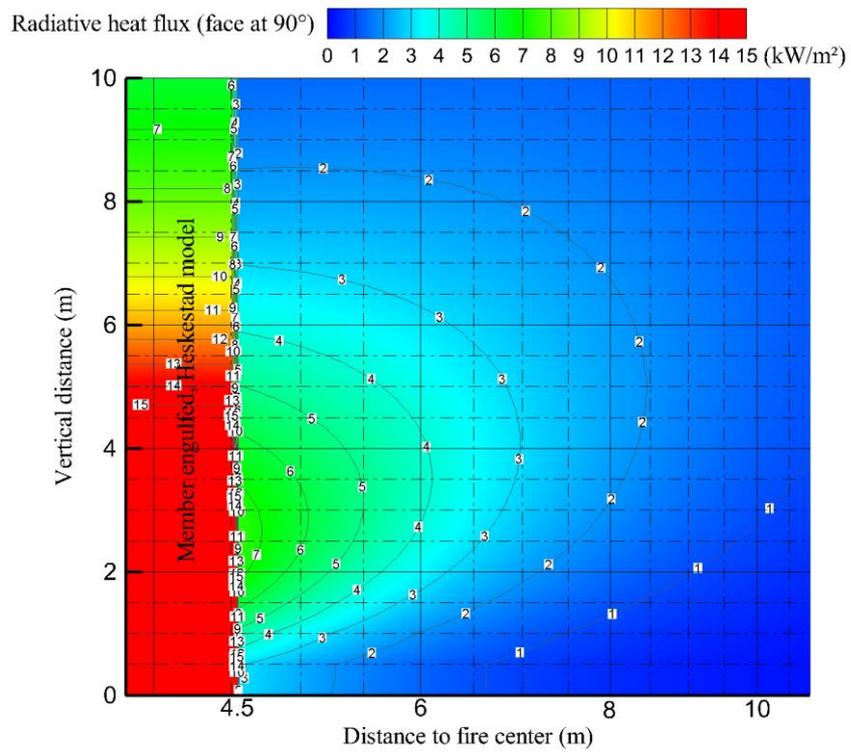
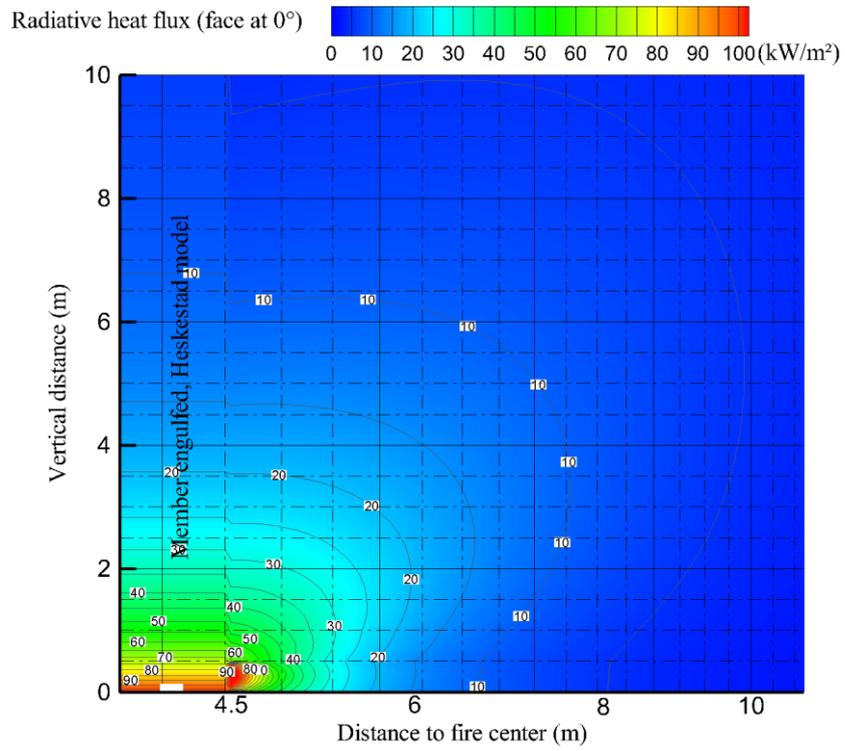


Bild C.20 Konturdiagramm für $D = 9 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

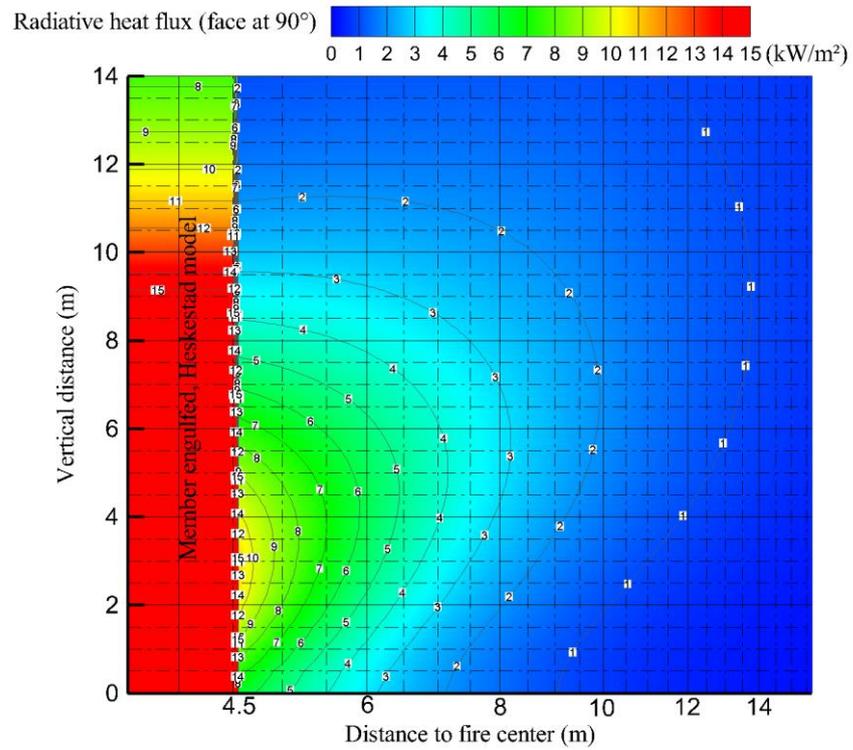
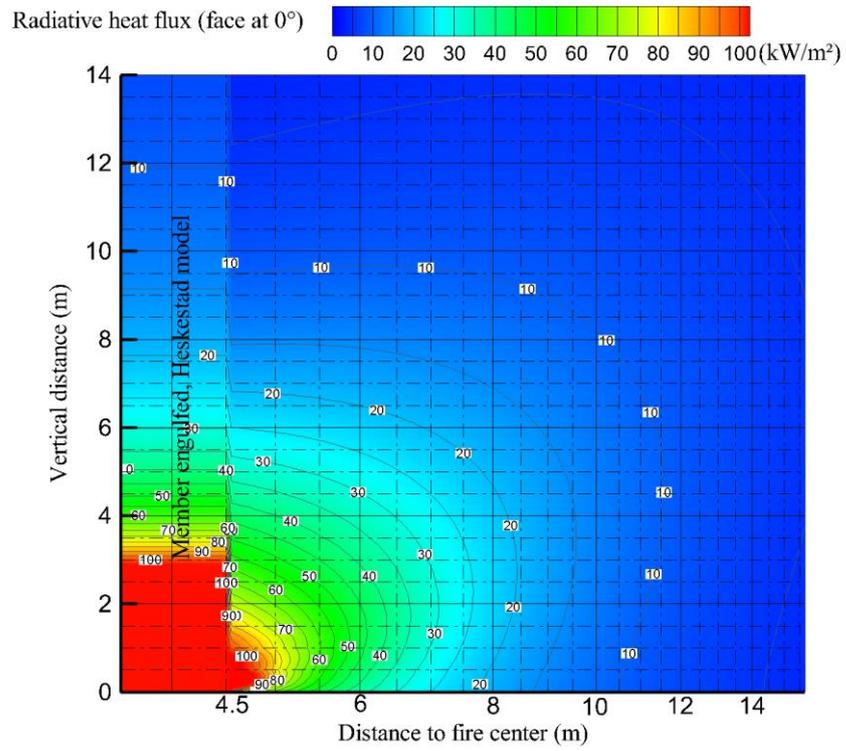


Bild C.21 Konturdiagramm für D = 9 m und HRR = 500 kW/m²

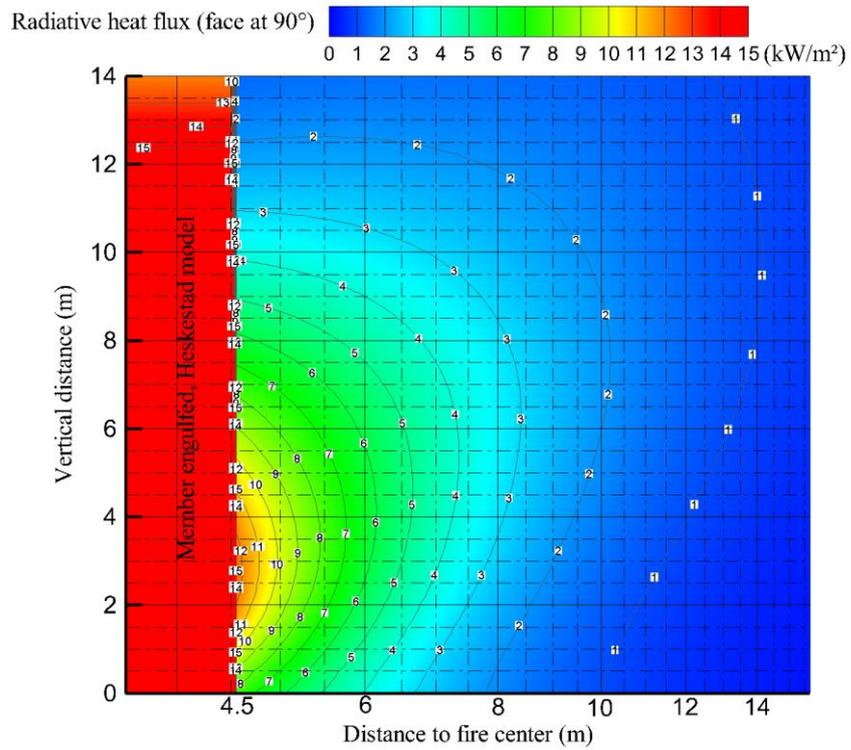
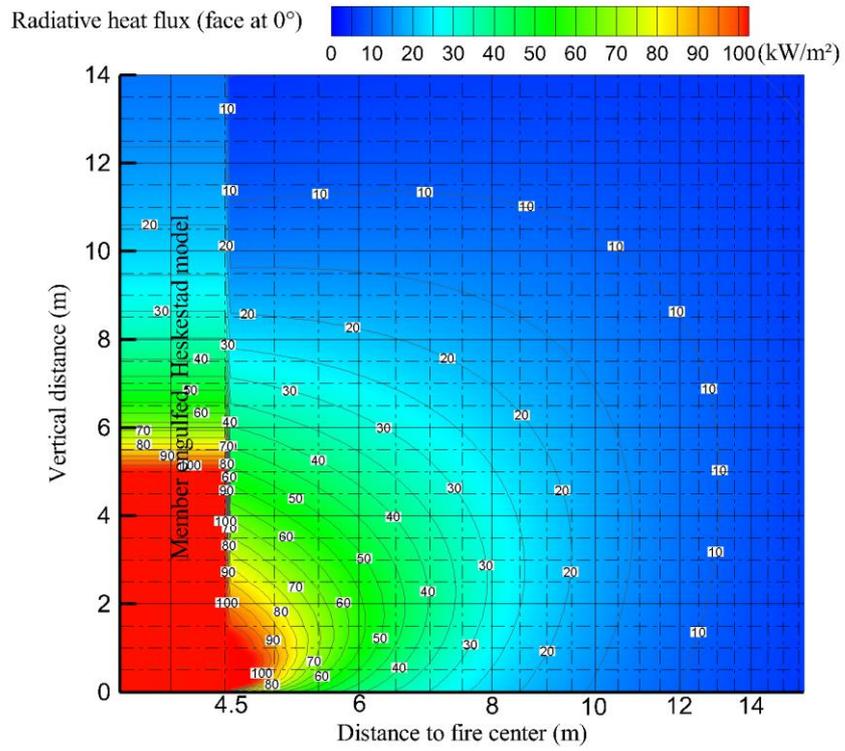


Bild C.22 Konturdiagramm für $D = 9 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 750 \text{ kW/m}^2$

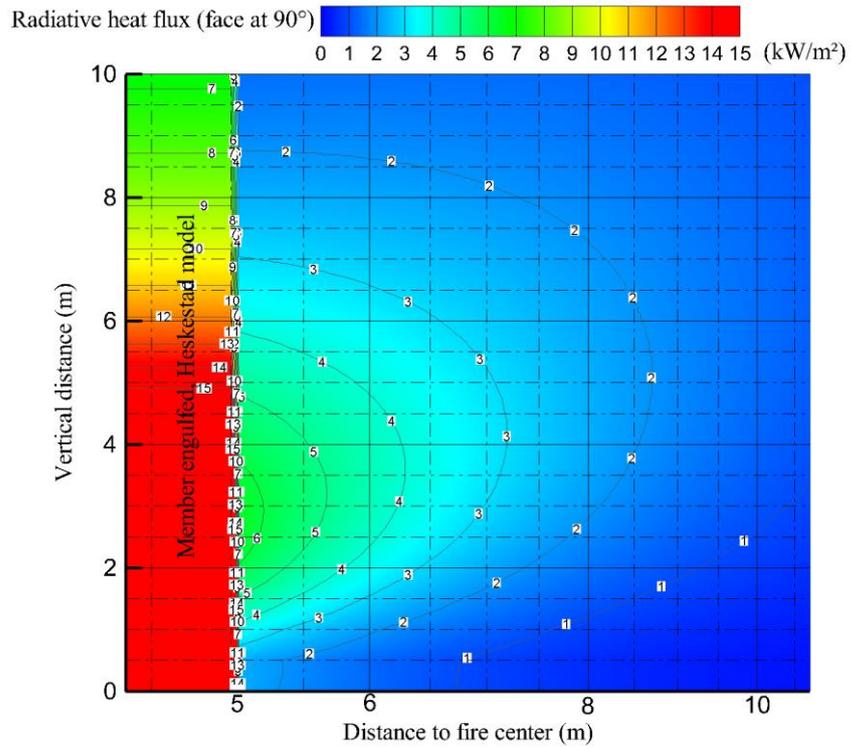
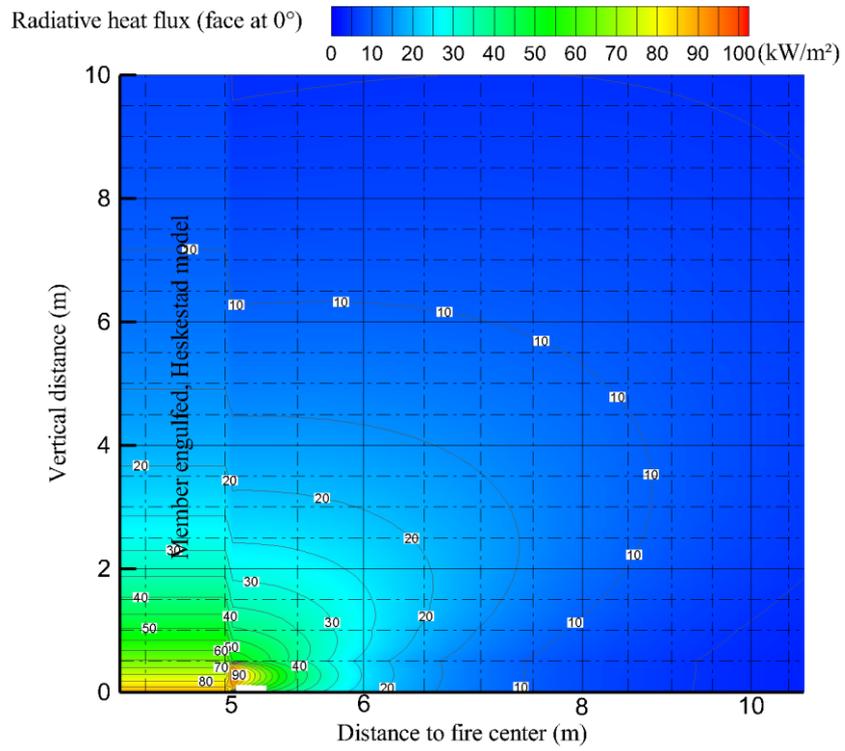


Bild C.23 Konturdiagramm für $D = 10 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

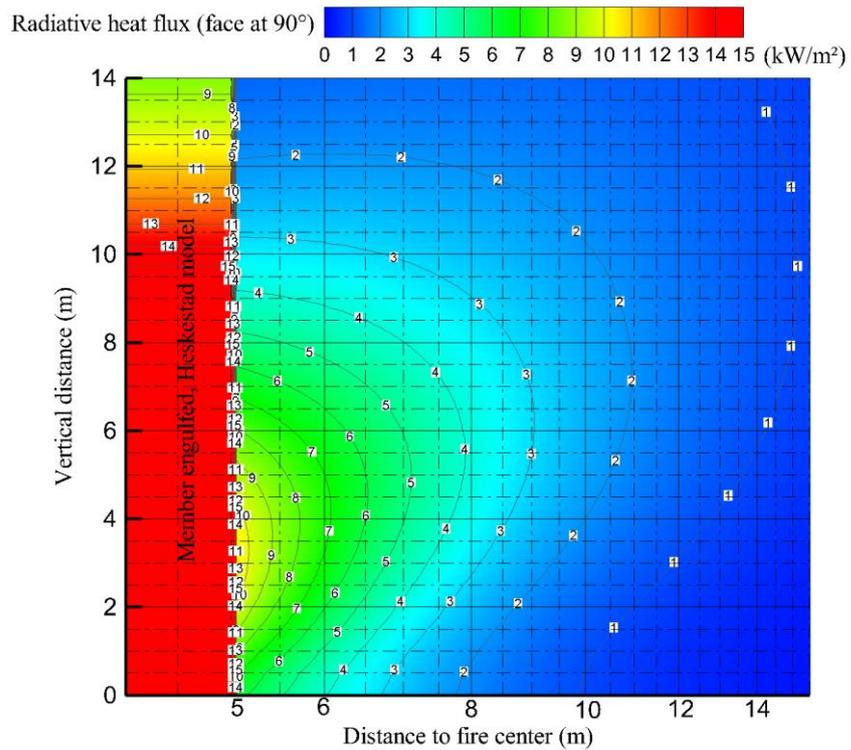
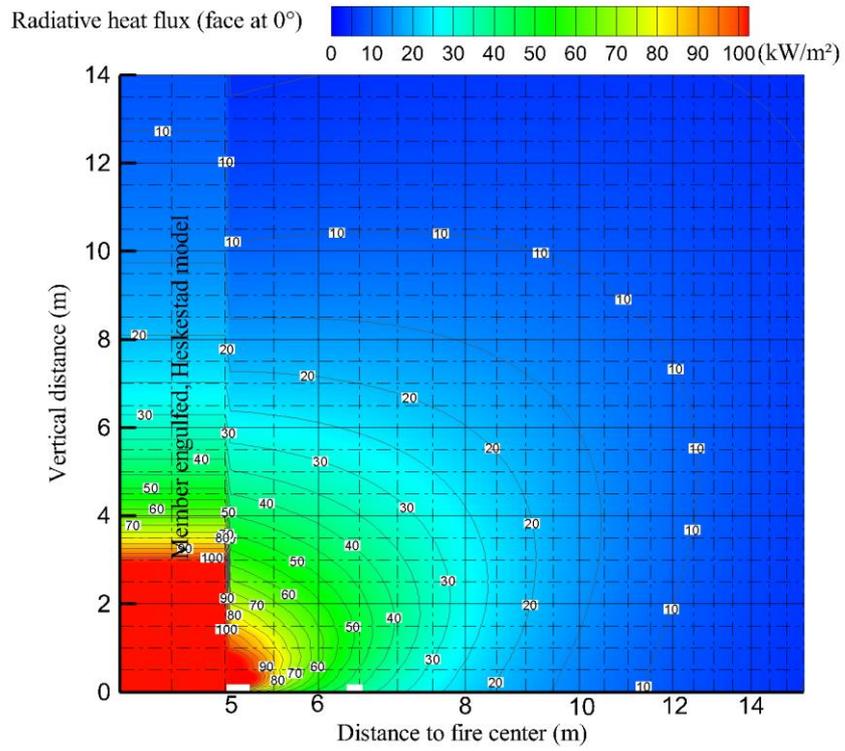


Bild C.24 Konturdiagramm für $D = 10 \text{ m}$ und $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

ANHANG D BEMESSUNGSBEISPIELE

Die Bemessungsbeispiele in diesem Anhang stellen die Anwendung der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methoden zur Berechnung der Temperatur einer Stütze als Folge eines lokalen-Brand-Szenarios dar.

Das erste Beispiel ist eine direkte Erweiterung der Methode für Stützen in der Rauchschiicht (Zone 4) außerhalb des Brandes. Das zweite Beispiel fokussiert auf der Anwendung des neuen Modells (Zone 1) unter Anwendung von Konturdiagrammen und OZone. Das dritte Beispiel ist ein komplexer Fall mit vier Brandquellen und nicht-konventionellen HRR-Kurven.

D.1 Industrielles Gebäude

D.1.1 Bemessungsbrandfall

Eine Lagerhalle ist 60 m lang und 32 m breit und die Firsthöhe beträgt 14 m, wie in Bild D.1 dargestellt. Die Konstruktion besteht aus Stahlrahmen, positioniert alle 10 m. Die Gurte der Träger bestehen aus Profile HEA 220 und die Diagonale sind Winkel L60×60×6 Rücken an Rücken.

Die Bodenfläche wird überwiegend für die Produktion verwendet aber am Ende des Gebäudes befindet sich einen Lagerbereich zwischen zwei Rahmen. Der lokale Brand wird in diesen Bereich ausbrechen. 10 Tonnen Zellulosematerial wird nicht in der Nähe von allen sonstigen brennbaren Stoffen über eine Fläche von 50 m² gelagert (entspricht einem Branddurchmesser von 8 m). Die HRR-Kurve (Bild D.2) basiert auf der Methode aus EN 1991-1-2 Anhang E und es gibt auch folgende Annahmen:

- eine mittlere Ausbreitungsrate ($t_{\alpha} = 300$ s),
- das brennbare Material ist zellulosisch und setzt 17,5 MJ/kg frei,
- die HRR pro Flächeneinheit ist 1000 kW/m².

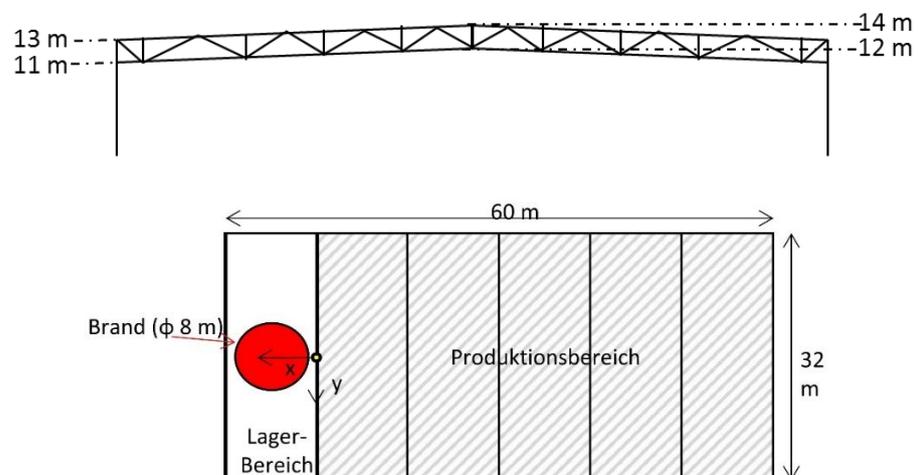


Bild D.1 Darstellung des industriellen Gebäudes

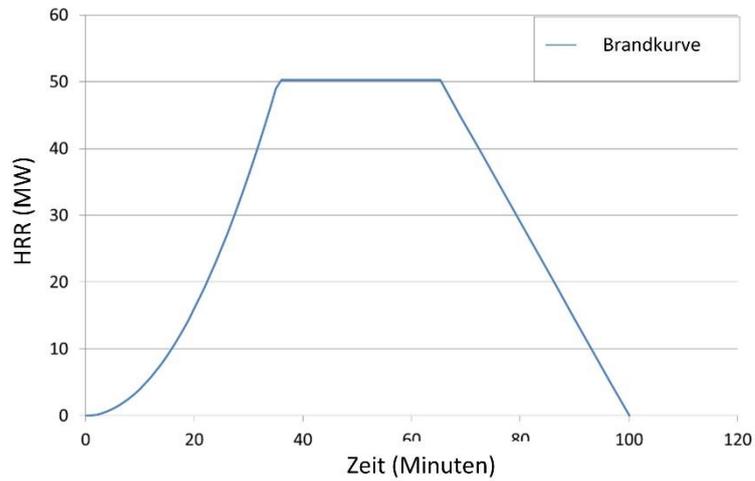


Bild D.2 HRR für einen lokalen Brand in der Halle

D.1.2 OZone-Eingabedaten

Die Wärmeübertragung ist fokussiert auf die Träger, die sich innerhalb des Rauches befinden, wo die Bauteile am nächsten zum Brand liegen. Diese Position entspricht der Mitte des Rahmens in einer Höhe von 12 m für den unteren Flansch und 14 m für den oberen Flansch. Die Eingabedaten werden aus dem vorherigen Abschnitt hergeleitet und mittels der Eingabemasken „Brand“ und „Stahlprofil“ eingetragen, wie in Bild D.3 bzw. Bild D.4 dargestellt.

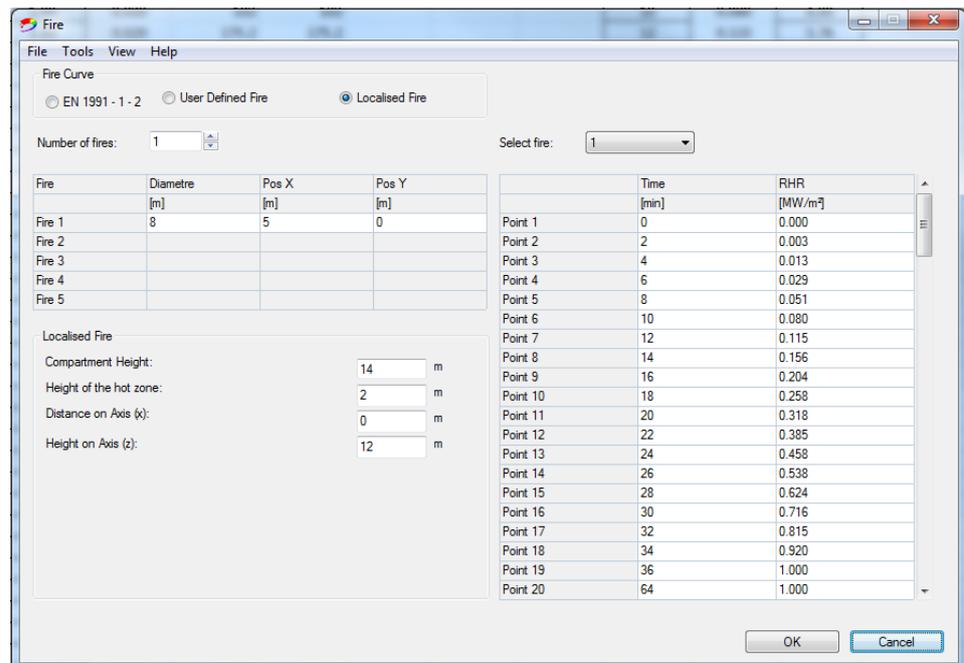


Bild D.3 Eingabedaten der Maske „Brand“

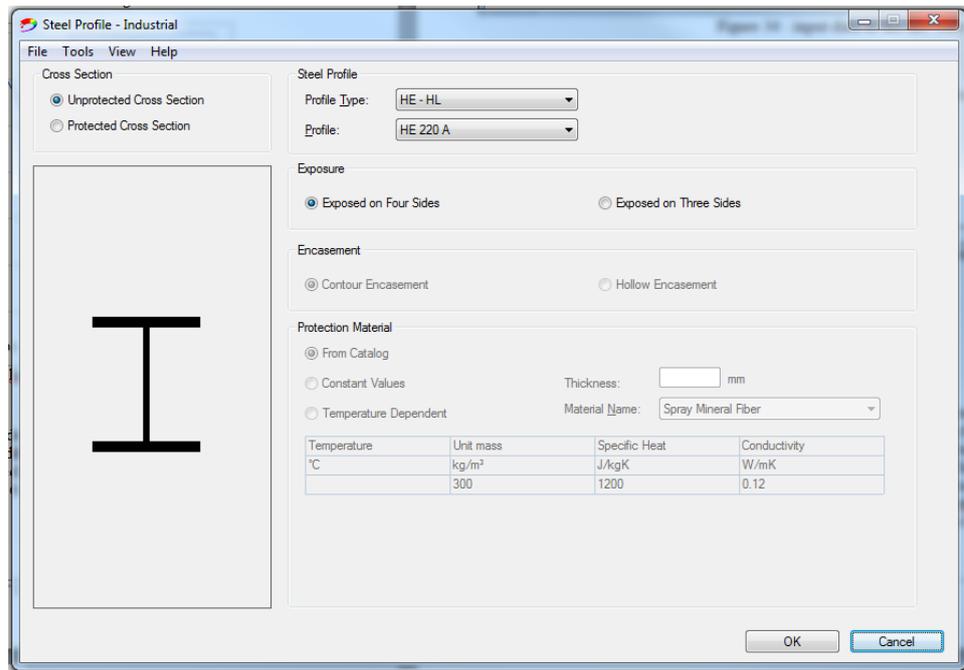


Bild D.4 Eingabedaten der Maske „Stahlprofil“

D.1.3 OZone-Ergebnisse

Bei einem Brandquellendurchmesser von 8 m und einer maximalen HRR von 50 MW beträgt die Höhe der Flamme 9,7 m. Da das Gebäude höher ist als die Flamme, prallen die Flammen nicht auf die Decke auf. Die Einwirkung des Brandes hinsichtlich der thermischen Einwirkungen ist begrenzt; die Temperatur der Träger am Berechnungspunkt ist 210 °C (Bild D.5).

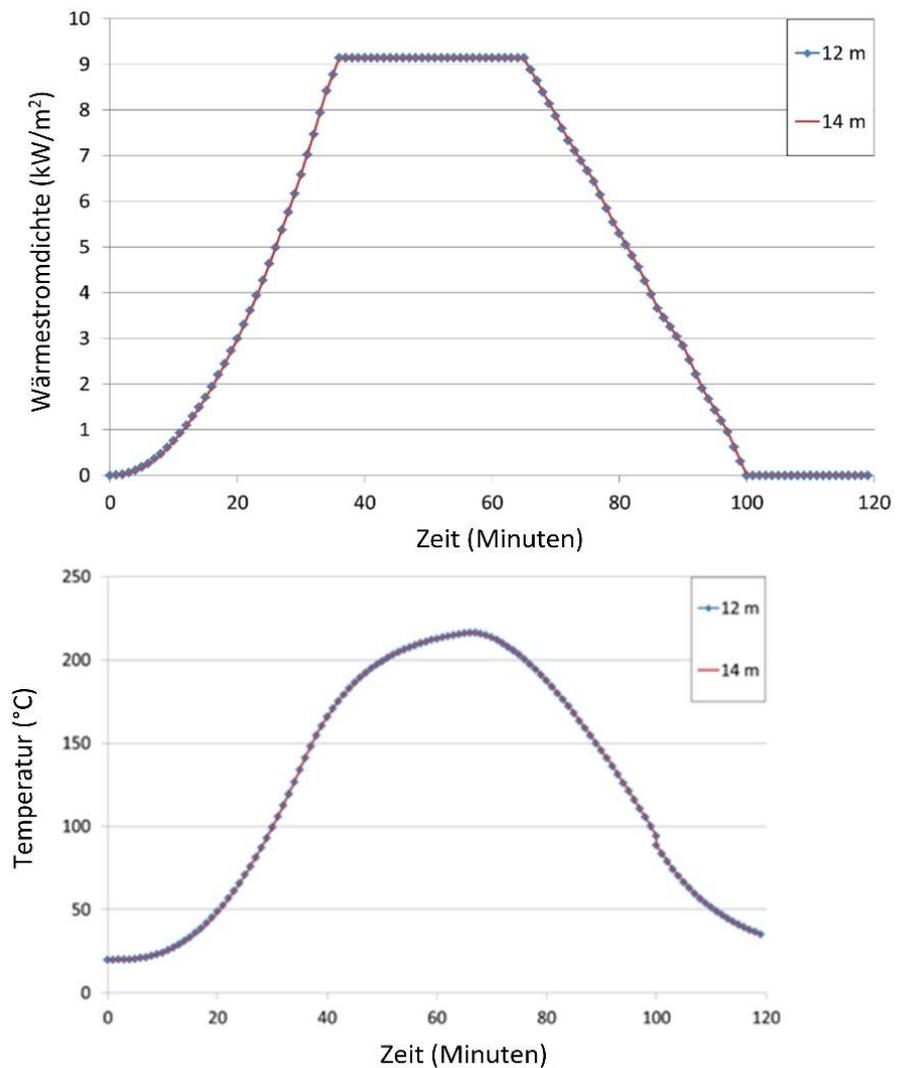


Bild D.5 Empfangene Wärmestrahlungsdichte (oben) und Temperatur (unten)

D.2 Bürogebäude

D.2.1 Bemessungsbrandfall

Seine Abmessungen sind 30 m x 15 m und die Deckenhöhe beträgt 3,5 m; die Stützen am Außenrand des Gebäudes sind aus Stahlprofile HEA 260 hergestellt. Das Brandszenario basiert auf der Entzündung von Druckpapier. Es wird auf einer Palette mit einer Masse von 500 kg über einer Fläche von 2,5 m² (2 m × 1,25 m) gelagert. Hinsichtlich seiner Position steht sie 0,8 m vor einem Flansch, wie in Bild D.6) dargestellt.

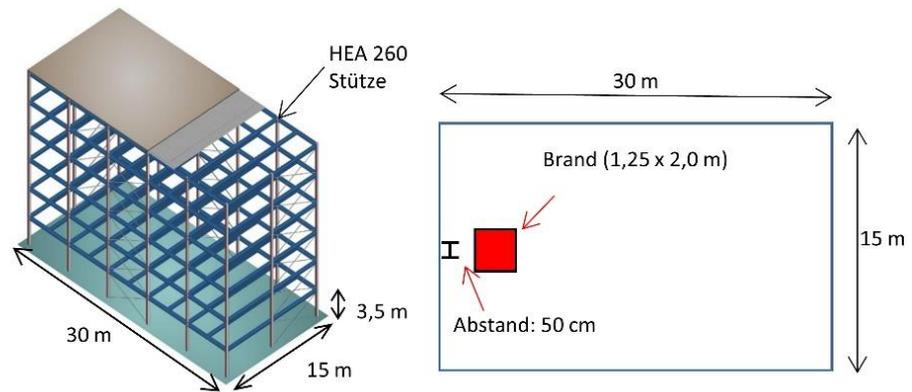


Bild D.6 Abmessungen des Bürogebäudes (links) und Position der Brandquelle (rechts)

Die HRR-Kurve wird nach den Empfehlungen aus EN 1991-1-2 Anhang E gefertigt. Die Kurve hat drei ausgeprägte Phasen: die Wachstums-, stationäre und Ausklingphase (Bild D.7). Die Wachstumsphase wird definiert mittels der Gleichung:

$$Q(t) = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (\text{D.1})$$

Dabei ist Q die HRR, t die Zeit in Sekunden und t_α die erforderliche Zeit zum Erreichen einer HRR von 1 MW. Für ein Bürogebäude ist t_α gleich 300 s. Bei einem lokalen Brand wird die HRR nicht durch die Belüftung, sondern durch die Brandfläche begrenzt. Die Annahme $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$ führt zu einer maximalen HRR von 2,5 MW. Die Ausklingphase fängt an, wenn 70 % des brennbaren Stoffes schon verbrannt ist und hört auf, wenn 100 % aufgebraucht sind.

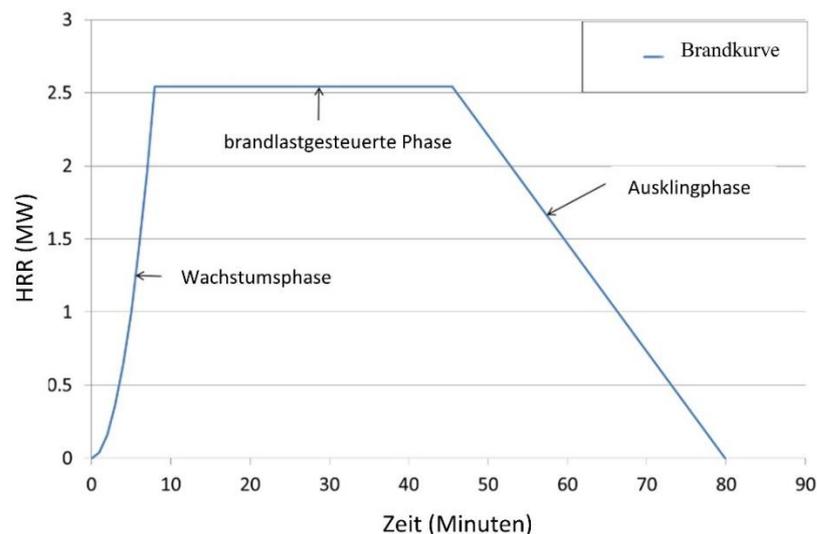


Bild D.7 HRR nach EN 1991-1-2 Anhang E

D.2.2 Anwendung des Konturdiagramms

Gemäß Abschnitt 4.2.1 wird die Brandfläche umgewandelt in eine äquivalente kreisförmige Fläche. Bei einer Fläche von $2,5 \text{ m}^2$ beträgt ihr Durchmesser $1,8 \text{ m}$ (Bild D.8). Die breiteste Seite der Stütze misst 260 mm und sie ist $1,4 \text{ m}$ von der Mitte des Brandes entfernt.

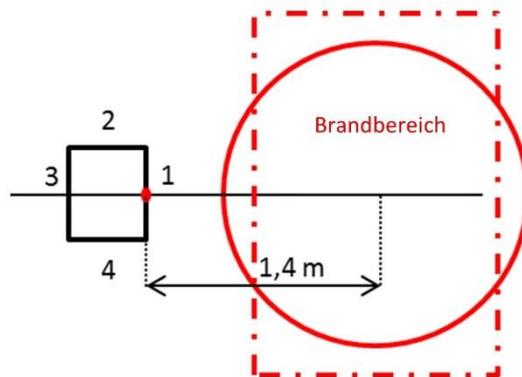


Bild D.8 **Veränderte Konfiguration**

Die maximale HRR ist 1000 kW/m^2 und entspricht einem Wert, der sich in der Liste der Konturdiagramme befindet. Ein oberer Wert von 2 m wird für den Durchmesser gewählt. Die Werte werden von Bild C.3 abgelesen.

Die Stütze wird unterteilt in Segmente von 0,5 m. Die mittlere Wärmestromdichte für jedes Segment wird dann mittels Gleichung (4.2) berechnet. Diese Werte sind in Tabelle D.1 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Werte aus der heißen Schicht (in einer Höhe über 3,15 m) nicht dargestellt sind.

Tabelle D.1 **Wärmestromdichten**

Höhe (m)	Wärmestromdichte		
	Seite 1	Seite 2	Mittelwert
0,5	65	7	19,75
1	60	7,5	18,75
1,5	55	7	17,25
2	45	6	14,25
2,5	35	5	11,25
3	25	4	8,25

Die höchste Wärmestrahlungsdichte befindet sich in Zone 1 in einer Höhe von 0,5 m und hat einen Wert von $19,75 \text{ kW/m}^2$. Unter Anwendung von Bild 4.9 wurde eine Gleichgewichtstemperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt.

D.2.3 Anwendung von OZone

D.2.3.1 OZone-Eingabedaten

Das Verfahren zur Berechnung des Anstieges der Wärmestromdichte und der Temperatur entlang der Stütze in Folge eines lokalen Brandes mit Hilfe der OZone-Software benutzt die gleichen Schritte wie vorher.

Zunächst sollte in der „Lokaler Brand“-Maske die Position der Brandquelle relativ zur Position der Stütze eingegeben werden (es wird angenommen, dass sie sich bei $X=0$ und $Y=0$ befindet), zusammen mit dem Anstieg der HRR; der Brand hat einen Abstand von 0,5 m und einen Durchmesser von 1,8 m und seine Mitte befindet bei

1,4 m, siehe Bild D.9. In der gleichen Maske sollte die Höhe des Brandabschnittes eingegeben werden, zusammen mit der Position des gewünschten Berechnungspunktes (Höhe entlang der Achse der Stütze, zwischen $z = 0,5$ m und 3,5 m). Dann muss die Maske „Stahlprofil“ aufgerufen und die HE 260A Stütze ausgewählt werden.

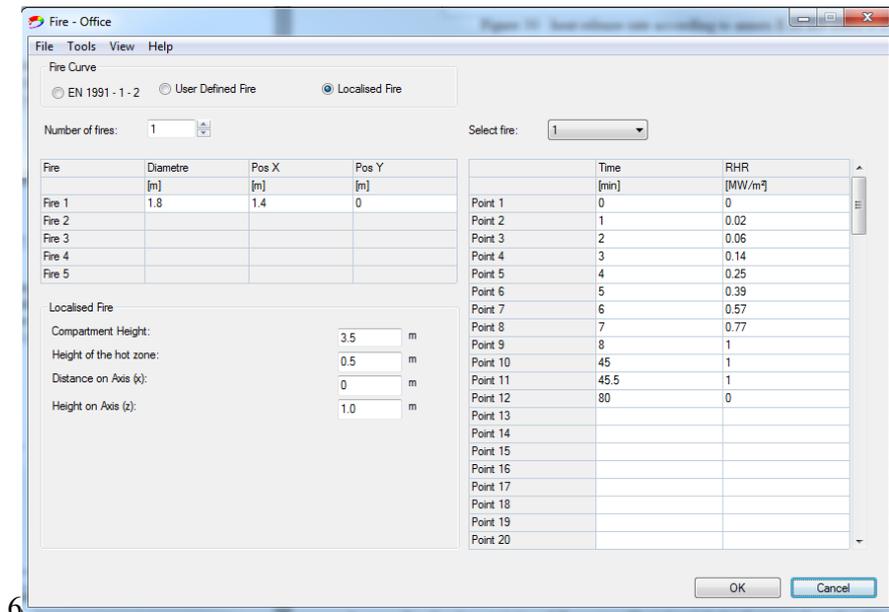


Bild D.9 Eingabedaten der Maske „Brand“

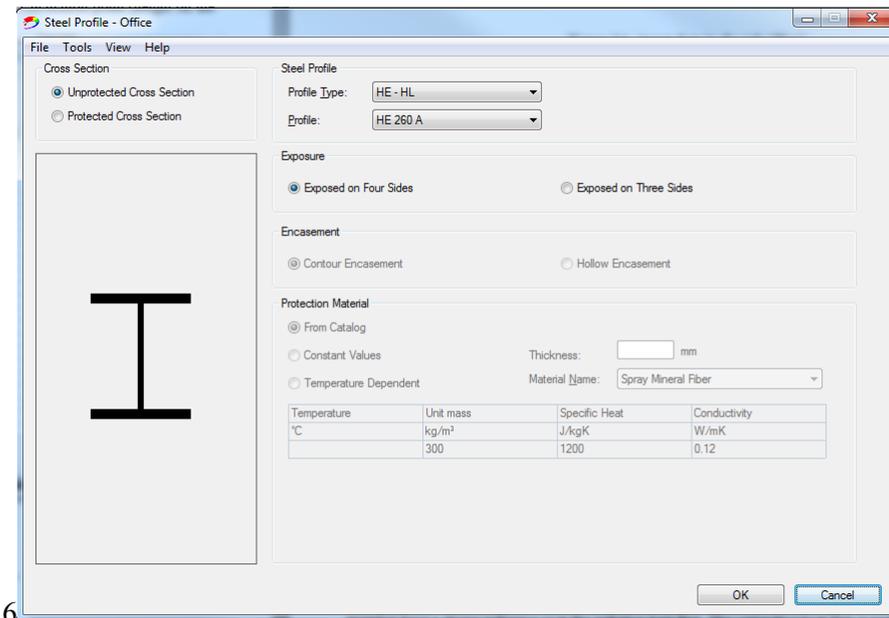


Bild D.10 Eingabedaten der Maske „Stahlprofil“

D.2.3.2 OZone-Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Temperatur und Wärmestromdichten von Segmenten alle 0,5 m entlang der Stütze (d.h. bei 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m, 3,0 m und 3,5 m) sind in Bild D.11 dargestellt. Die maximale berechnete Temperatur ist 250 °C bei 0,5 m und 1,0 m, das bedeutet, dass die Temperatur wahrscheinlich höher ist bei 0,75 m. In der heißen Rauchschicht erreicht die Temperatur 260 °C.

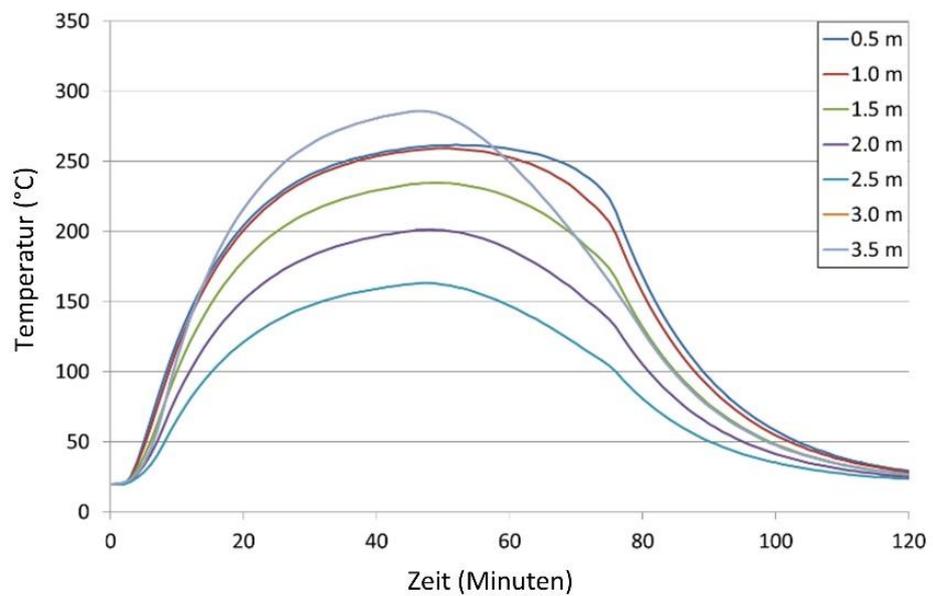
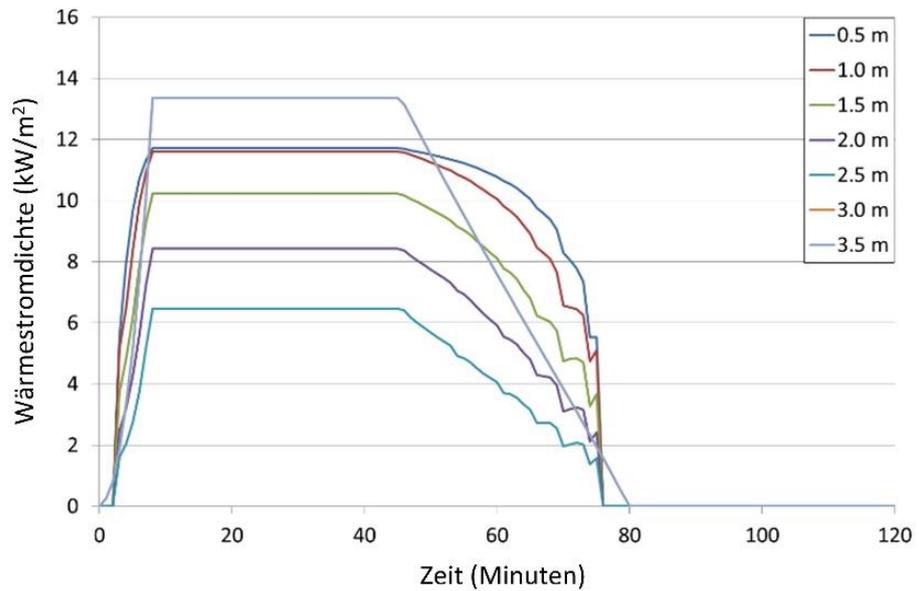


Bild D.11 Empfangene Wärmestrahlungsdichte (oben) und Temperatur (unten)

D.2.4 Bemessung der Stütze

Ist die Temperatur bekannt, kann die Stütze bemessen werden. Das Gebäude in diesem Beispiel wurde aus der Veröffentlichung *Eurocodes: Background & Applications - Structural Fire Design - Worked examples* entnommen, die von der Europäischen Kommission erhältlich ist ^[19].

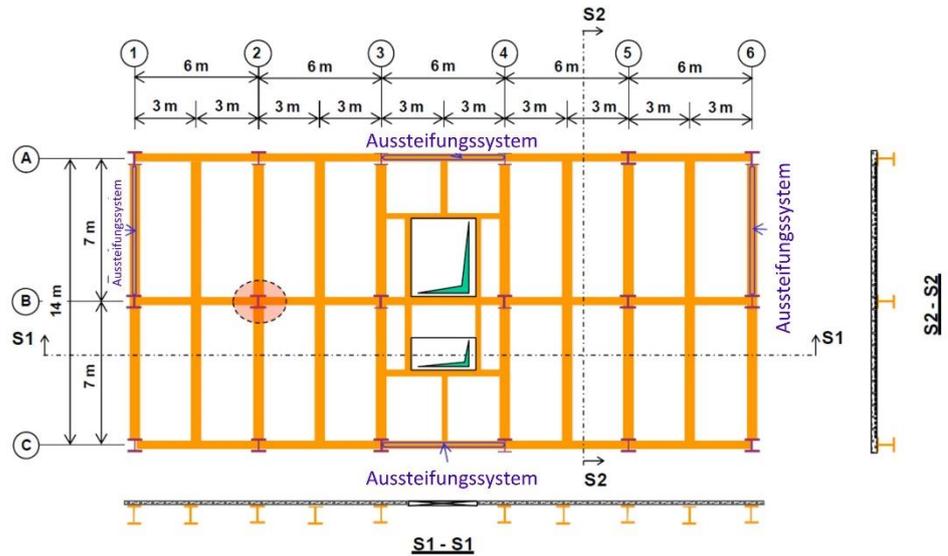


Bild D.12 Lage der Stütze

D.2.4.1 Einwirkende Belastung

Auf jedem Stockwerk unterliegt diese Stütze konzentrierte Belastungen von zwei einfach unterstützten Nebenträgern und zwei in der Mitte einfach unterstützten Hauptträgern. Im Brandfall sind die auf die einfach unterstützten Nebenträger einwirkenden Lasten gleichmäßig verteilt mit einem Wert von $14,105 \text{ kN/m}$. Die einwirkenden Lasten auf die einfach unterstützten zentralen Hauptträger sind eine konzentrierte Last in der Mitte der Spannweite mit einem Wert von $202,4 \text{ kN}$ und eine gleichmäßig verteilte Last mit einem Wert von $1,12 \text{ kN/m}$. Daher beinhaltet die auf dieser Stütze einwirkenden konzentrierten Last die Auflagerreaktionen sowohl von dem darüber liegenden Nebenträger als auch dem Hauptträger. Neben der oben genannten Last sollte das Eigengewicht der Stütze mit $1,15 \text{ kN/m}$ berücksichtigt werden.

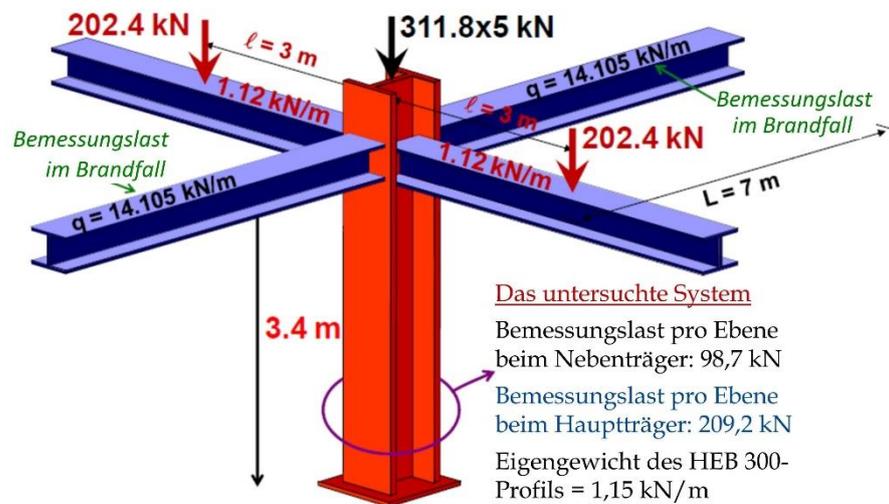


Bild D.13 Belastung der Stütze im Erdgeschoss

Daher kann die einwirkende Belastung auf dieser Stütze wie folgt berechnet werden. Auf jedem Stockwerk ist die konzentrierte Belastung des Trägers:

$$P_{fi,d,t} = \Sigma(G_{k,1} + \psi_{2,1}Q_{k,1}) = 14,105 \times 7 + 202,4 + 112,6 \approx 307,9 \text{ kN} \quad (\text{D.2})$$

Das Eigengewicht der Stütze pro Stockwerk (konservativ mit dem gleichen Querschnitt über die ganze Höhe des Gebäudes) ist:

$$q_{fi,d,t} = 1,148 \times 3,4 \approx 3,9 \text{ kN/m} \quad (\text{D.3})$$

Daher ist die gesamte einwirkende axiale Belastung der Stütze:

$$N_{fi,d,t} = (307,9 + 3,9) \times 6 = 1870,8 \text{ kN} \quad (\text{D.4})$$

D.2.4.2 Klassifizierung der Stütze

Bei einem Querschnitt unter Druckbeanspruchung kann diese Stütze mit Hilfe von EN 1993-1-1 Tabelle 5.2 in Kombination mit EN 1993-1-2 Abschnitt 4.2 klassifiziert werden.

Die Abmessungen des HEB 300-Querschnitts der Stütze sind in Bild D.14 zusammengefasst.

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$t_w = 11 \text{ mm}$$

$$t_f = 19 \text{ mm}$$

$$r = 27 \text{ mm}$$

$$h_w = 262 \text{ mm}$$

$$d = 208 \text{ mm}$$

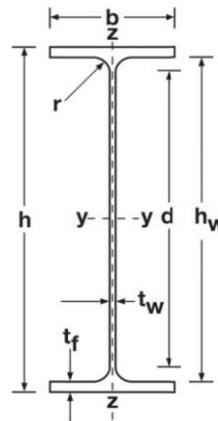


Bild D.14 Abmessungen und Bezeichnung des I- oder H-förmigen Stahlprofils

Nach Abschnitt 4.2 der EN 1993-1-2:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y} = 0,786 \text{ bei der Stahlgüte S275} \quad (\text{D.5})$$

Nach EN 1993-1-1 Tabelle 5.2 sind die Kriterien für die Klasse 1 bei Flanschen und Stege:

$$\text{Steg: } \frac{c}{t_w} \leq 33\varepsilon \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 33\varepsilon = 25,9$$

$$\text{Flansch: } \frac{c}{t_f} \leq 9\varepsilon \Rightarrow \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} \leq 9\varepsilon = 7,07$$

Mit diesen Abmessungen:

$$\begin{aligned} \text{Steg: } \quad \frac{d}{t_w} &= \frac{208,0}{11} = 18,9 < 25,9 \\ \text{Flansch: } \quad \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} &= \frac{\left(\frac{300}{2} - \frac{11,0}{2} - 27\right)}{19} = 6,18 < 7,07 \end{aligned}$$

Die Stütze wird dann als Klasse 1 klassifiziert.

D.2.4.3 Berechnung der Beanspruchbarkeit unter Anwendung des LOCAFI-Modells

Die Beanspruchbarkeit der Stütze kann auf der Basis der Temperatur und der Querschnittseigenschaften ermittelt werden.

Es wird angenommen, dass die Bemessungstemperatur 275 °C beträgt. Diese ist die von OZone vorausgesetzte Temperatur, wie in Bild D.11 dargestellt. Die Abminderungsfaktoren des Werkstoffes können dann aus EN 1993-1-2 Tabelle 3.1 entnommen werden:

$$k_{y,\theta} = 1,0 \tag{D.6}$$

$$k_{E,\theta} = 0,825$$

Es wird auch angenommen, dass der Trägheitshalbmesser des Querschnitts beträgt:

$$i = 75,8 \times 10^{-3} \text{ m} \tag{D.7}$$

Ferner wird angenommen, dass im Brand die effektive Länge 70 % der Geschosshöhe beträgt, wie in Bild 5.2 dargestellt. Die Abminderungsfaktoren des Werkstoffes können dann aus EN 1993-1-2 Tabelle 3.1 entnommen werden:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}} = \frac{(0,7 \times 3,4)}{(75,8 \times 10^{-3})} \frac{1}{93,9 \sqrt{\frac{235}{275}}} = 0,361 \tag{D.8}$$

Die Schlankheit bei erhöhter Temperatur wird wie folgt berechnet:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,361 \sqrt{\frac{1,0}{0,825}} = 0,398 \tag{D.9}$$

Der Abminderungsfaktor für das Knicken der Stütze bei der erhöhten Temperatur kann dann mittels der nachfolgenden drei Gleichungen berechnet werden:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,60 \tag{D.10}$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} (1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta) = \frac{1}{2} (1 + 0,6 \times 0,398 + 0,398) = 0,819 \tag{D.11}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,819 + \sqrt{0,819^2 - 0,398^2}} = 0,652 \tag{D.12}$$

Die Beanspruchbarkeit bei erhöhter Temperatur kann dann wie folgt berechnet werden:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,652 \times \frac{14908}{1000} \times 1,0 \times \frac{275}{1,0} = 2672,3 \text{ kN} \quad (\text{D.13})$$

D.2.4.4 Vergleich zwischen der Beanspruchbarkeit und der aufgetragenen Last

Der letzte Schritt der Berechnung ist dann die Beanspruchbarkeit bei erhöhter Temperatur mit der aufgetragenen Last zu vergleichen:

$$\mu_e = \frac{1871}{2672} = 0,70 \quad (\text{D.14})$$

Die Berechnung zeigt, dass die Stütze genügend Beanspruchbarkeit beim gegebenen Brandszenario leistet.

D.3 Offenes Parkhaus

D.3.1 Bemessungsbrandfall

Bei der Bemessung wird von einem offenen Parkhaus ausgegangen, mit einer Länge von 60 m, einer Breite von 45 m und einem Standardraster von 10 m × 15 m. Die Deckenhöhe beträgt 3,5 m (siehe Bild D.15). Die Hauptträger sind 0,50 m breit. Die Stützen des Parkhauses bestehen aus Stahlprofile HEA 300. Die Parkplätze haben Standardabmessungen von 2,5 m × 5 m, mit einer Fläche von 12,5 m², die einem lokalen Brand mit einem Durchmesser von 4 m entspricht. Die Träger sind so angebracht, dass sie eine Ausbreitung des Rauches unter der Decke kontrollieren.

Das Brandszenario umfasst vier Fahrzeuge um eine Stütze. Drei der Fahrzeuge sind große Autos und das vierte Fahrzeug ist ein kleiner Lieferwagen. Dies ist eins der Szenarien, die in den französischen gesetzlichen Bestimmungen berücksichtigt werden. Die entsprechende HRR ist in Bild D.16 gezeigt. Für die größeren Fahrzeuge wurde die HRR bei französischen Untersuchungen im Jahr 1996 in Maizières-lès-Metz gemessen aber die Lieferwagen-Kurve basiert auf einer Risikoanalyse und entspricht extrem schweren Bedingungen (als Brandlast entspricht sie 1000 kg brennendem Holz). Der Brand geht von Pkw 1 aus und verbreitet sich gleichzeitig aus zu den Pkws 2 und 3 nach 12 Minuten. Nach weiteren 12 Minuten hat der Brand Pkw 4 angezündet.

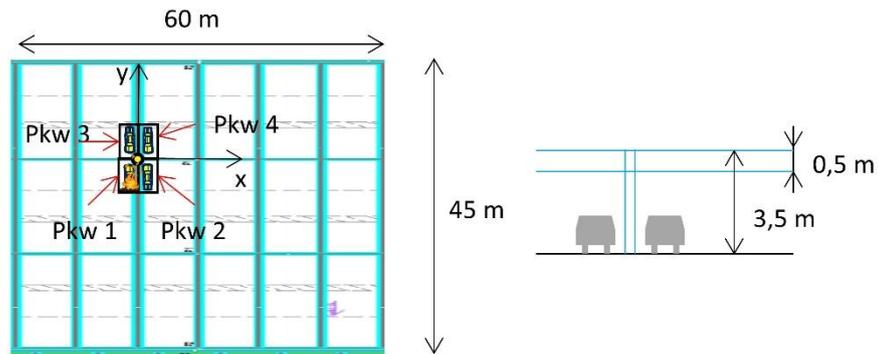


Bild D.15 Offenes Parkhaus mit den Positionen der Pkws

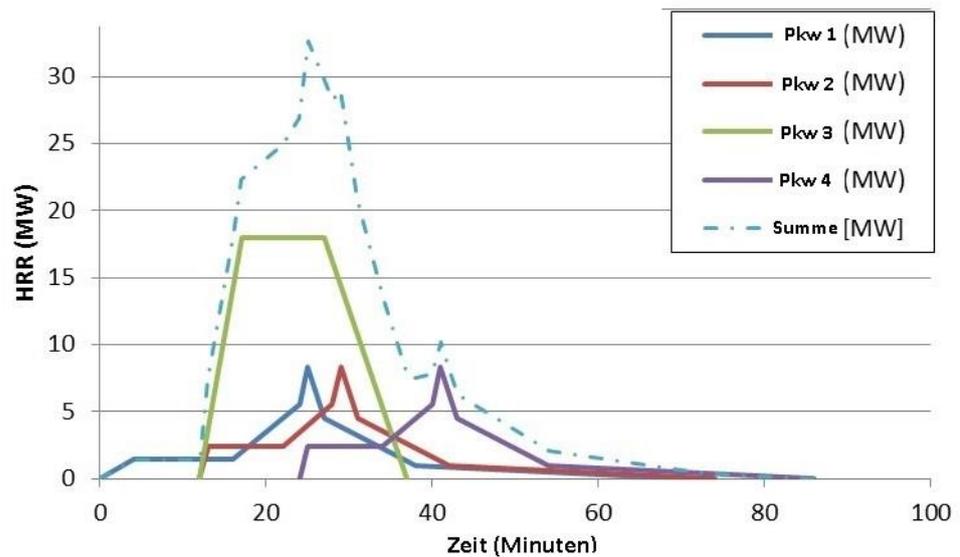


Bild D.16 HRR für die Pkws

D.3.2 OZone-Eingabedaten

Um Daten einzugeben muss der Nutzer auf der Schaltfläche „Brand“ klicken und dann die Schaltfläche „Lokaler Brand“ auswählen. Bild D.21 zeigt Details der Daten, die der Nutzer ausfüllen muss:

- die Anzahl der Brände (in diesem Beispiel vier),
- die Position und HRR-Kurve jeder Brandquelle,
- die Höhe des Brandabschnittes (3,5 m),
- die Höhe der heißen Zone (0,5 m),
- die Höhe entlang der Stützenachse, wo der Nutzer die Berechnung durchführen will.

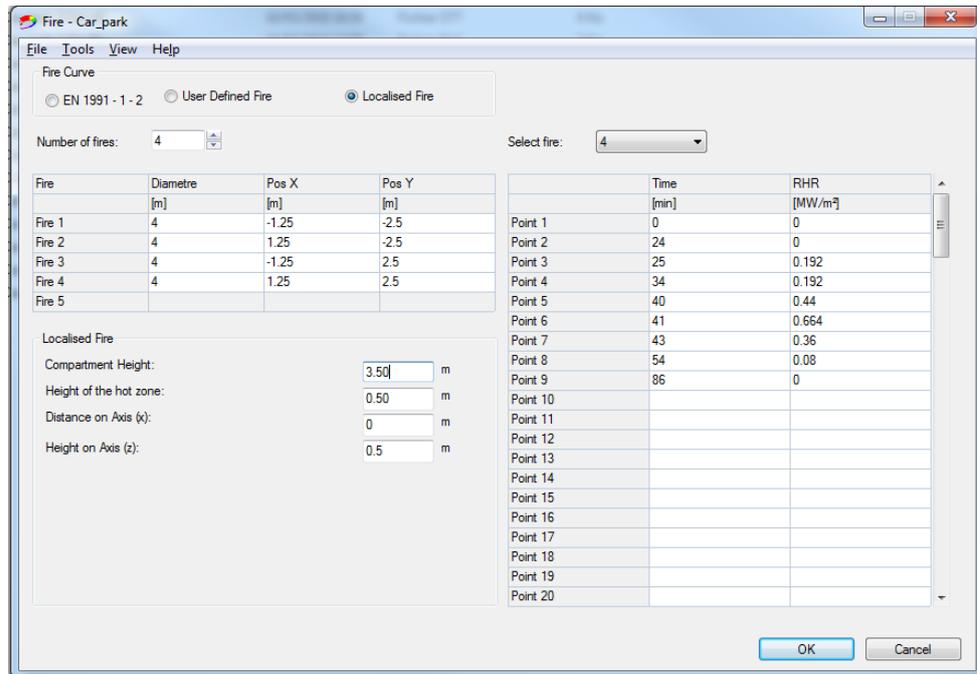


Bild D.17 Eingabedaten der Maske „Brand“

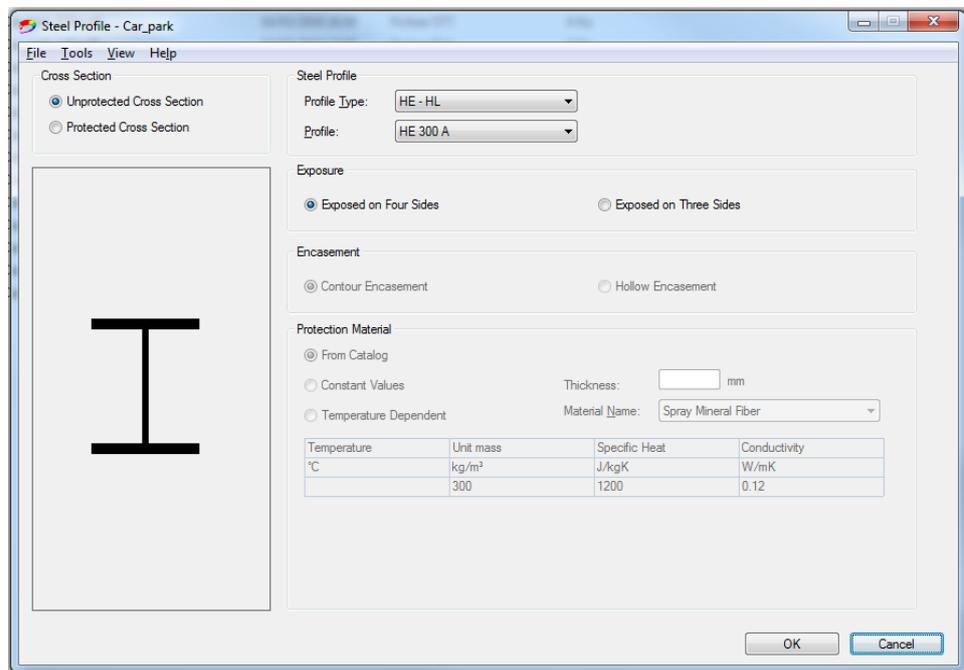


Bild D.18 Eingabedaten der Maske „Stahlprofil“

Um die Temperatur des Segmentes zu berechnen, muss der Nutzer die Stütze unter „Stahlprofil“ definieren (siehe Bild D.18) und dann durch Klicken auf der Schaltfläche „Stahltemperatur“ die Berechnung starten.

OZone bietet einen graphischen Zugang zur Temperatur des erwünschten Segmentes und die Ergebnisdateien erhalten Daten sowohl für die Temperatur als auch für die empfangene Wärmestromdichte. Bild D.19 zeigt die Ergebnisse entlang der Stütze in Abständen von 0,5 m. Außerhalb der heißen Rauchschicht ist die maximale Temperatur 500 °C in einer Höhe von 1 m, während sie einen Wert von 700 °C innerhalb der heißen Schicht (zwischen 3,0 m und 3,5 m) erreicht.

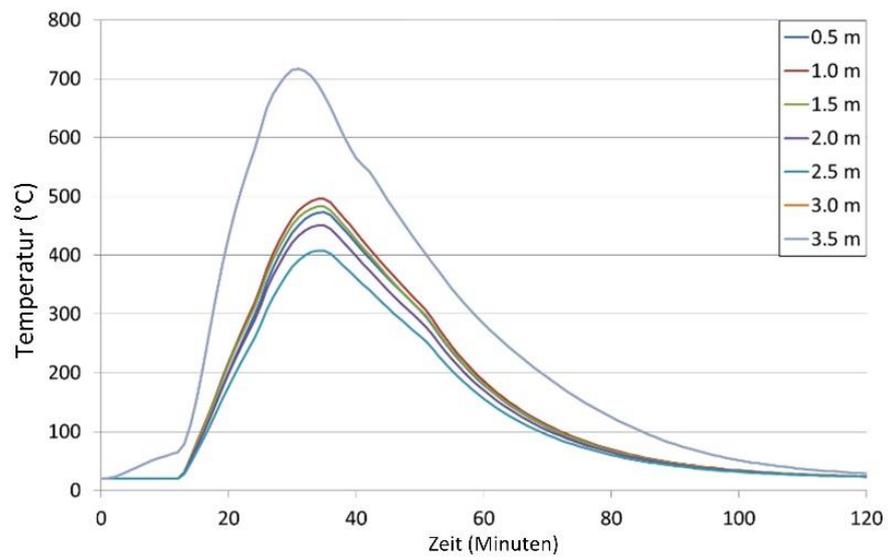
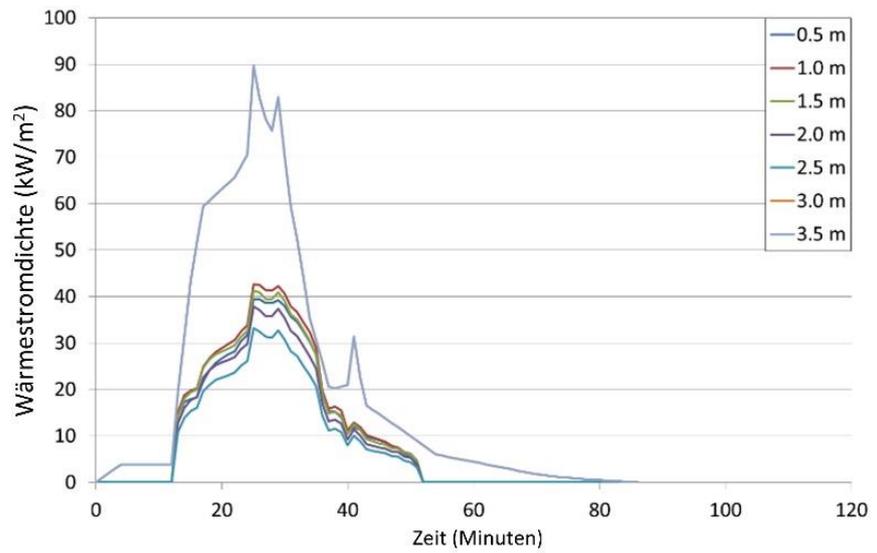


Bild D.19 Empfangene Wärmestromdichte durch Strahlung (oben) and Temperatur (unten)