

# **Tragverhalten stählerner Atriumstützen unter lokaler Brandbeanspruchung**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Philip C. Cohrs, MEng.

2016

Promotionskommission:

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß

Kommissionsmitglied: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Tag der Promotion: 15. Januar 2016

## Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation werden die Untersuchungen zum Einfluss der Atriumbauweise auf das Tragverhalten von Stahlstützen unter lokaler Brandbeanspruchung vorgestellt. Dabei steht im Fokus, ob die Übertragung der Standardbemessung im Brandfall auf Stützen in brandlastarmen Eingangsbereichen von Atrien und Foyers zu konservativen Ergebnissen führt und verschiedene Systemreserven unberücksichtigt bleiben.

Zunächst werden dazu die Charakteristika des betrachteten Gebäudebereiches analysiert, die diesen Bereich von anderen hochbauüblichen Standardsituationen signifikant unterscheidet. Atrien und Foyers zeichnen sich generell durch großzügige Raumvolumina aus, die entgegen hochbauüblichen Nutzungseinheiten überwiegend nur lokal-konzentrierte und keine flächig-verteilten Brandlasten aufweisen. Überdies werden die baurechtlichen Fragen geklärt, um daraus die Bauteilanforderungen für den Brandfall abzuleiten.

Da für Atrien und Foyers in Deutschland keine Bestandsdaten vorliegen, erfolgt eine Datenerhebung auf Basis der Delphi-Methode, um die Besonderheiten, die die Atriumbauweise für brandlastarme Eingangssituationen mit sich bringt, zu erfassen. Ferner werden hieraus realistische Grundlagen für die numerischen Untersuchungen abgeleitet. Dabei haben sich drei bestimmte Kategorien von Eingangssituationen herauskristallisiert, die sich vor allem in der Geometrie, der Geschossigkeit und der statischen Auflast unterscheiden.

Mit dem Fokus auf strukturmechanische Bauteiluntersuchungen im Brandfall erfolgt im Rahmen numerischer Untersuchungen die Simulation der lokalen thermischen Einwirkungen im Brandfall unter Naturbrand. Die lokalen Brandszenarien werden sowohl mit vereinfachten als auch allgemeinen Methoden (bspw. FDS) näher untersucht. Im Anschluss daran erfolgt die thermische und mechanische Analyse der Stahlstützen, um das strukturmechanische Tragverhalten unter lokaler Brandeinwirkung zu untersuchen. Hier kommen ebenfalls vereinfachte als auch allgemeine Rechenverfahren (bspw. SAFIR) zum Einsatz. Dabei zeigte sich, dass bereits geringe Achsabstände bis zu einem Meter zwischen der Bauteilachse und der Flammenachse in Verbindung mit einem Temperaturgradienten über die Stützenlänge dazu führen, dass auch für filigrane, ungeschützte Stahlstützen rechnerisch ein Nachweis unter lokaler Brandbeanspruchung erbracht werden kann. In weiteren Untersuchungen wird für ungeschützte Stahlstützen unter lokaler Brandbeanspruchung die Gültigkeit des

statischen Systems der *Pendelstütze* überprüft. Es zeigt sich, dass bei ungeschützten, schlanken Stahlstützen mit geringer Auflast unter lokaler Brandbeanspruchung bei Zugrundelegung des statischen Systems *Pendelstütze* eine thermische Zwangskraft unberücksichtigt bleibt, die bei den untersuchten Fällen mit lokaler Brandbeanspruchung eine Größenordnung von bis zu 17 % der Gesamtlast einnehmen kann und somit bemessungsrelevant ist.

Insbesondere ungeschützte respektive partiell geschützte Stahlstützen sind auch bei ästhetischer, filigraner Architektur in brandlastarmen Umgebungen trotz ihres geringen Erwärmungswiderstandes unter bestimmten Voraussetzungen nachweisbar. Es zeigte sich, dass der Einfluss des lokalen Brandszenarios (Heskestad-Delichatsios-Modell) in Verbindung mit geringen Abständen bis zu einem Meter sowie der Berücksichtigung eines Temperaturgradienten in Stützenlängsrichtung die maßgebenden Einflussfaktoren darstellen.

**Stichworte:** Atriumbauweise, Stahlstützen, Eingangssituationen, Brandlast, Datenerhebung, Naturbrand, lokaler Brand

## Abstract

In this thesis the studies about the influence of atrium construction on the structural behavior of steel columns during a local fire scenario are presented. It is investigated whether using the standard design methodology for columns in fire in entrance areas of atriums and foyers with low fire loading, leads to conservative results where as various system reserves are not utilized.

First, the characteristics of the considered building zone are defined. These will significantly distinguish the area from other standard construction setups. Atriums and foyers are generally characterized by spacious volumes with mostly locally concentrated and no widely distributed fire loading contrary to standard construction units. Moreover the structural requirements for the relevant component in fire are derived from the German building codes.

In the absence of empirical data of atriums and foyers in Germany, the Delphi method is used for data collection in order to identify typical features of atrium design for small fire scenarios. Based thereon, a realistic basis for numerical examination is derived in addition. From there, three specific categories of entrance configurations have emerged, which differ mainly in geometry, number of floors and static loading. Numerical simulations are used to examine local thermal effects for a natural fire load case with regard to a subsequent structural analysis of the component. Local fire scenarios are studied more closely with both simplified and advanced methods (e. g. FDS). This is followed by a thermal and mechanical analysis of the steel columns to determine the structural behavior during local fire exposure. Again, simplified and advanced calculation methods (e. g. SAFIR) are used. It can be shown that even small distances of up to one meter between the part center line and the flame center line in connection with a temperature gradient along the length of the column lead to the computation of positive margins even for slender, unprotected steel columns in local fires. In further studies, it is investigated whether the static system of a pin-ended column under axial loading is applicable for unprotected steel columns in fire. It turns out that if unprotected, slender steel columns with low axial loads are subjected to local fire while utilizing the before mentioned static system an internal constraining force due to thermal effects is not taken into account. This constraining force can be up to 17 % of the total load and is therefore relevant for design.

In particular, the design of unprotected and partially protected steel columns, even if aesthetically pleasing and of filigree structure can be verified under certain conditions

for low fire load scenarios. It was found that the influence of the local fire load scenario (Heskestad-Delichatsios model) in combination with small distances of up to one meter and a temperature gradient in axial column direction are the main drivers.

**Keywords:** atrium construction, steel columns, entrance situations, fire load, data-collection, natural fire, local fire

*Structural behavior of steel columns in atria during local fire*

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand berufsbegleitend während meiner Tätigkeit als Tragwerksplaner und Brandschutzingenieur.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann, der die Berichterstattung übernahm und diese Arbeit durch seine fachliche Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen in besonderer Weise förderte und mir dadurch, insbesondere als externer Doktorand, die Möglichkeit zur Promotion einräumte.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß danke ich für seinen fachlichen Rat sowie die Übernahme des Koreferates und der damit verbundenen Mühe.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad danke ich für die Bereitschaft, mein Promotionsverfahren wissenschaftlich zu begleiten sowie seinen fachlichen Rat.

Den ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern der Brandschutzabteilung des Institutes für Stahlbau, Dr.-Ing. Jörg Sothmann, Dr.-Ing. Thomas Kirsch, Dr.-Ing. Florian Tabeling sowie Dipl.-Ing. Inka Kleibömer und Dipl.-Ing. Waldemar Weisheim danke ich sehr herzlich für das freundliche und kollegiale Miteinander, was ich besonders als „Externer“ sehr geschätzt habe.

Außerdem danke ich Inka Kleibömer und Waldemar Weisheim sowie Angela Cohrs, Lars Hoffmann-Sell und Dr. Monika Siegfanz für das mühevoll Korrekturlesen. Ferner danke ich allen Fachkollegen, die freundlicherweise an den Expertenbefragungen im Rahmen der Delphi-Methode teilgenommen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Das Verständnis, die Geduld und die Unterstützung meiner lieben Frau, Stefanie Cohrs sowie die Aufmunterung zum richtigen Zeitpunkt unserer Kinder, Maximilian und Emilia, haben besonders in schwierigen Phasen zum Gelingen beigetragen.

Außerdem möchte ich meinem Vater Karl-Heinz Cohrs herzlich danken, der mir als mein jetziger Arbeitgeber besonders in der Endphase die nötigen Freiräume verschaffte, ohne die *mein Projekt* nicht „ausführbar“ gewesen wäre.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Herleitung der Aufgabenstellung .....	1
1.2 Problemformulierung und korrespondierende Fragen .....	3
1.3 Zielsetzung und Methodisches Vorgehen .....	4
<b>2 Stand der Erkenntnisse in Wissenschaft, Normung und Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1 Einleitung .....	6
2.2 Stand des Baurechtes und der Normung .....	7
2.2.1 Brandschutzanforderungen an Atrien und Foyers – Bauordnungsrecht.....	7
2.2.2 Normung und Baurecht in Deutschland .....	11
2.2.3 Normung und Baurecht international am Beispiel von Großbritannien .....	13
2.3 Thermische Analyse.....	14
2.3.1 Allgemeines.....	14
2.3.2 Grundlagen der Brandentstehung.....	14
2.3.3 Arten der Wärmeübertragung.....	17
2.3.4 Brandszenarien für die Bemessung von Stützen .....	28
2.3.5 Ermittlung von Brandraumtemperaturen .....	33
2.3.6 Ermittlung von Bauteiltemperaturen .....	39
2.3.7 Sicherheitskonzept im Brandfall.....	40
2.4 Mechanische Analyse .....	42
2.4.1 Allgemeines.....	42
2.4.2 Stützenbemessung bei Raumtemperatur.....	43
2.4.3 Hochtemperatureigenschaften von Baustoffen .....	43
2.4.4 Konstruktiver Brandschutz von Stahlstützen.....	44
2.4.5 Stützenbemessung im Brandfall .....	45
2.4.6 Robustheit im Brandfall .....	46
2.5 Spezielle Nutzung: Atrium als Foyer .....	48
2.5.1 Besonderheiten der Nutzung.....	48
2.5.2 Typische Geometrien.....	49
2.5.3 Statische Systeme von Stützen in Geschossbauten.....	53



2.5.4	Brandlasten in Eingangssituationen .....	57
2.5.5	Brandentstehung .....	63
2.6	Zusammenfassung .....	65
<b>3</b>	<b>Erhebung von Kenndaten über Atrien und Foyers .....</b>	<b>66</b>
3.1	Einleitung .....	66
3.2	Varianten der Datenerfassung .....	66
3.3	Wesentliche Parameter der Datenerhebung .....	67
3.4	Vorgehen bei den in-situ-Beobachtungen .....	67
3.5	Vorgehen bei der Delphi-Methode .....	68
3.6	Ergebnisse und Auswertung .....	71
3.6.1	Geometrie der Foyers .....	71
3.6.2	Umfassungsbauteile der Foyers .....	74
3.6.3	Öffnungsflächen von Foyers .....	75
3.6.4	Baustoffe von Foyerstützen .....	78
3.6.5	Nachweismethoden des Feuerwiderstandes .....	78
3.6.6	Kompensationen im Brandschutzkonzept .....	81
3.6.7	Brandlasten und deren Verteilung .....	82
3.6.8	Anlagentechnik .....	83
3.6.9	Stichprobengröße – Projektumfang .....	85
3.7	Ergänzende Befragungen von Versicherungen und Feuerwehren .....	87
3.7.1	Befragung der Versicherungen .....	87
3.7.2	Befragung der Feuerwehren .....	87
3.7.3	Wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtungen .....	89
3.8	Zusammenfassung .....	91
<b>4</b>	<b>Numerische Untersuchungen .....</b>	<b>92</b>
4.1	Einleitung .....	92
4.2	Abmessungen, Geometrie und Öffnungen der Foyers .....	94
4.3	Mechanische Einwirkungen .....	95
4.4	Brandlast und Brandszenario .....	96
4.4.1	Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels Zonenmodell .....	96
4.4.2	Ermittlung der Temperaturen im Brandfall nach Heskestad .....	97
4.4.3	Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels H-D-Modell .....	100
4.4.4	Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels FDS .....	102
4.5	Modellbildung .....	109
4.5.1	Stützentyp und statisches System .....	109

4.5.2	Knicklänge im Brandfall .....	122
4.6	Bauteilbemessung .....	124
4.6.1	Bemessungsverfahren .....	124
4.6.2	Kategorie 1: Kleines Foyer mit Stahlstütze .....	125
4.6.3	Kategorie 2: Mittleres Foyer mit Stahlstütze .....	132
4.6.3.3	Bemessung im Brandfall (Level 3).....	136
4.6.4	Kategorie 3: Großes Atrium mit Stahlstütze .....	137
4.6.4.1	Bemessung bei Raumtemperatur .....	137
4.6.4.2	Bemessung im Brandfall (Level 2).....	138
4.6.4.3	Bemessung im Brandfall (Level 3).....	143
4.7	Zusammenfassung .....	147
<b>5</b>	<b>Auswertung und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>150</b>
5.1	Einleitung .....	150
5.2	Brandraumtemperaturen .....	150
5.2.2	Einfluss des Bemessungsmodells.....	151
5.2.3	Einfluss des Abstands zwischen Brandquelle und Bauteil .....	157
5.3	Bauteiltemperaturen .....	159
5.3.1	Einfluss des Profilmfaktors.....	159
5.3.2	Einfluss des Temperaturgradienten.....	161
5.4	Einfluss des thermischen Zwangs .....	162
5.5	Brandschutzmaßnahmen im Vergleich.....	164
5.6	Zusammenfassung und Fazit .....	166
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>170</b>
6.1	Zusammenfassung.....	170
6.2	Ausblick.....	173
<b>7</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>176</b>
7.1	Quellen- und Literaturverzeichnis .....	176
7.2	Normen-, Richtlinien- und Vorschriftenverzeichnis .....	190
7.3	Abbildungsverzeichnis .....	194
7.4	Tabellenverzeichnis .....	201
7.5	Bezeichnungen.....	203
	Abkürzungen.....	203
	Lateinische Bezeichnungen .....	203
	Griechische Bezeichnungen.....	205
	<b>Persönliche Erklärung.....</b>	<b>207</b>

---

<b>Lebenslauf.....</b>	<b>208</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>209</b>
Anhang A    Brandkenngrößen.....	210
Anhang B    Phasen eines Schadenfeuers (Naturbrand).....	213
Anhang C    Zünd- und Brandtemperaturen von Brennstoffen und Zündquellen.....	215
Anhang D    Wärmestromanteile aus Strahlung und Konvektion.....	217
Anhang E    Sicherheitskonzepte in der Literatur (Überblick) .....	221
Anhang F    Atrien, Foyers und Eingangshallen im Bauordnungsrecht .....	222
Anhang G    Brandlasten im Bauwesen – Erhebungen, Quellen und Veröffentlichungen .	227
Anhang H    Fragebogen der Expertenbefragung .....	234
Anhang I    Lastzusammenstellung .....	238
Anhang J    Brandlastermittlung .....	241
Anhang K    Lokaler Brand nach Heskestad gemäß Eurocode 1 .....	244
Anhang L    Lokaler Brand mit dem H-D-Modell .....	246
Anhang M    Lokaler Brand mit FDS .....	249
Anhang N    Steifigkeitsverhältnisse von Riegel-Stiel-Anschlüssen im Atrium und Foyer ..	255
Anhang O    Stützenbemessung bei Raumtemperatur .....	256
Anhang P    Stützenbemessung im Brandfall nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren .....	258
Anhang Q    Stützenbemessung im Brandfall nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren .....	266



# 1 Einleitung

## 1.1 Herleitung der Aufgabenstellung

Die Architektur vieler Bürogebäude zeichnet sich durch einen höherwertigen Eingangsbereich aus, welcher als Foyer ausgebildet wird. Häufig führen Rettungswege durch diesen Bereich, weshalb er in der Regel brandlastfrei sein muss. Gleichzeitig werden an die tragenden Bauteile in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse gemäß [MBO 2002] entsprechende Anforderungen an den Feuerwiderstand gestellt. Einem bauordnungsrechtlich geforderten und entsprechend der [DIN 4102-2] sowie der [DIN 13501-2] klassifizierten Feuerwiderstand liegt dabei immer die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) als Prüfgrundlage zugrunde, welche ursprünglich aus einer rechnerischen Überlagerung von Extrembrandszenarien resultiert [DIN 4102-3:1934]. Durch Forderung eines bestimmten Feuerwiderstands wird auch für brandlastfreie oder brandlastarme Foyers implizit eine unverhältnismäßig hohe Brandlast unterstellt und bei der Bemessung im Brandfall angesetzt. Der Widerspruch zwischen einem mittels der ETK klassifizierten Bauteil und einer brandlastarmen Nutzung wird umso größer, je geringer die tatsächliche Brandlast ist. In [Cohrs2008] wurde auf den Widerspruch zwischen *brandlastarmen Bereichen* versus *Feuerwiderstand gemäß der ETK* hingewiesen, welcher in der täglichen Bemessungspraxis immer wieder für Irritationen bei den Beteiligten sorgt - beim Aufstellen statischer Berechnungen wie auch bei der bautechnischen Prüfung.

Für Stützen, die in Stahlbetonbauweise oder Stahlverbundbauweise errichtet werden und dadurch ein relativ langsames Erwärmungsverhalten aufweisen, führt der Sachverhalt in der Regel zu höheren Bewehrungsgraden gegenüber der statischen Bemessung bei Raumtemperatur. Für den Ingenieurverstand ist schwer nachvollziehbar, dass sich die erforderliche Bewehrung einer Stütze auch in brandlastarmer Umgebung nicht aus der klassischen, statischen Bemessung bei Raumtemperatur ergibt, sondern dass hier der Lastfall Brand maßgebend wird.

Für Stahlstützen hingegen, deren Erwärmung im Brandfall gegenüber den Stahlbetonstützen wesentlich schneller verläuft, gilt dieser Sachverhalt im Besonderen. Hier führt der Ansatz der ETK bei der Bemessung nicht nur zu geringfügig größeren notwendigen Querschnitten, sondern zum schnellen Erreichen der kritischen Bauteiltemperatur. Da wirtschaftlich bemessene Stahlstützen erfahrungsgemäß keinen klassifizierten Feuerwiderstand über 15 Minuten erzielen, scheiden ungeschützte Stahlstützen, unabhängig von der statischen Beanspruchung, oftmals aus.

Entgegen dieser normativen Tatsache zeigten Brandereignisse der Vergangenheit jedoch immer wieder, dass Stahlbauteile durchaus auch ungeschützt einen gewissen Feuerwiderstand aufweisen. Als markante Beispiele hierfür seien das historische Großfeuer im Stahlskelettbau *ARA* 1931 in Prag [Merlan1931] sowie der 4,5-stündige Vollbrand im Bürogebäude *Phase-8* 1990 in Broadgate genannt [Broadgate1991]. Aufgrund solcher Ereignisse sowie der Erkenntnisse aus Brandversuchen, wurden bereits in der Vergangenheit alternative Bemessungsansätze zum konservativen Ansatz der ETK entwickelt. Bereits in den 1950er Jahren gab es in der Schweiz Überlegungen, bei denen unter der Voraussetzung der Einhaltung bestimmter Brandlasten sogar ungeschützte Stahlbauteile möglich waren ([Geilinger1950], [Geilinger1955] und [Kollbrunner1959]). Weiterhin gab es in den 1970er Jahren den Großbrandversuch von *Leipzig* [Marx1975], bei dem Erkenntnisse über die Auswirkungen von verschiedenen Brandlastdichten auf den Brandverlauf gewonnen wurden. Ferner wurden für mehrgeschossige Gebäude in Stahlbauweise nachgewiesen, dass ungeschützte Stahlkonstruktionen bis zu einer Brandlastdichte von  $20 \text{ kg/m}^2$  (Holzäquivalent) nicht gefährdet sind. In den 1990er Jahren fand die Brandversuchsserie von *Cardington* [Green2002] statt, aus dem das große europäische Forschungsvorhaben *Natural Fire Safety Concept* (NFSC) [Schleich2001] hervorging. Dieses beinhaltet unter anderem die Grundlagen für das Sicherheitskonzept im Brandfall. Mittlerweile haben diese Ansätze auch in die heutigen Bemessungsnormen Einzug gehalten – in der breiten Praxis sind sie jedoch noch nicht etabliert.

Die Methoden des Brandschutzingenieurwesens, insbesondere die Ermittlung der Einwirkungen für die thermische Analyse, stellen im Einzelfall einen verhältnismäßig großen Aufwand dar, der bisher nur bei sehr wenigen Bauwerken in Anspruch genommen wird. Erscheint der Aufwand der Bemessung auf Grundlage von Naturbrandszenarien nicht angemessen und ist Anlagentechnik wie z.B. eine Sprinkleranlage nicht vorgesehen, bleibt für Stahlstützen nur noch die brandschutztechnische Ertüchtigung – entweder über wenig ästhetische, kastenförmige Ummantelungen oder über kosten- und zeitintensive, intumeszierende Anstriche.

Der Vollständigkeit halber sei in diesem Zusammenhang noch auf die Möglichkeit des bewussten Überdimensionierens des Stützenquerschnittes hingewiesen. Da die Erwärmung von Stahlbauteilen maßgebend von deren Massigkeit abhängt, führt eine entsprechende Überdimensionierung des Querschnittes zu einer Reduktion der Lastausnutzung im Brandfall. Je nach Grad der Überdimensionierung lassen sich so auch entsprechende Feuerwiderstandsdauern nachweisen. Allerdings ist das Erzielen von Tragwerksreserven für den Brandfall über den Einsatz größerer Stahlquerschnitte

zur Bemessung auf Grundlage der ETK aufgrund der sich dadurch ergebenden, signifikant höheren Stahlkosten in der Regel wirtschaftlich nicht vertretbar und demzufolge für Regelbemessungen als rein akademisch zu bezeichnen. Infolge höherer Stahlkosten relativieren sich einige positive Nebeneffekte ungeschützten Stahls, wie das Einsparen der Kosten für brandschutztechnische Bekleidungen. So ist bei der Entscheidung, welche Bauart und Ausführungsweise bei Stützen letztendlich eingesetzt werden, der Brandschutz oft ausschlaggebend, unabhängig von deren Einbauort.

## 1.2 Problemformulierung und korrespondierende Fragen

Die Hypothese, dass die Atriumbauweise als Eingangssituation das Tragverhalten von Stützen im Brandfall beeinflusst, sofern Naturbrandszenarien zugrunde gelegt werden, führt zu Überlegungen hinsichtlich der maßgebenden Einflussfaktoren. Mit dem Titel der Arbeit *„Tragverhalten stählerner Atriumstützen unter lokaler Brandbeanspruchung“* wird daher folgende zentrale Frage verknüpft: „Führt die Übertragung der Standardbemessung im Brandfall auf Stützen in brandlastarmen Eingangsbereichen von Atrien und Foyers zu konservativen Ergebnissen, wobei verschiedene Systemreserven unberücksichtigt bleiben?“

Dabei sind Reserven auf Seite der Einwirkungen genauso von Interesse, wie auf Seite der Bauteilwiderstände. Das gilt für die thermische Analyse ebenso wie für die mechanische Analyse. Im weiteren Verlauf sind die quantitativen Auswirkungen auf die besondere Bemessungssituation in brandlastarmen Foyers zu untersuchen. Ferner ist fraglich, in wie weit sich diese für eine Bemessung im Brandfall berücksichtigen lassen. Zur Beantwortung dieser Fragen ergeben sich eine Reihe von Teilfragen, die es zu klären gilt.

Dabei stellt sich zunächst die Frage nach den Methoden und Standardverfahren für die Stützenbemessung im Brandfall. Hierbei ist zu ergründen, ob die gegenwärtigen Bemessungsansätze auch geeignet sind, für diese spezielle Nutzung realistische Ergebnisse zu liefern. In dem Zusammenhang ist zu klären, welche Hilfsmittel, Bemessungsansätze und Rechenverfahren für die Fragestellungen zur Verfügung stehen und welche theoretischen Grundlagen und Randbedingungen den jeweiligen Hilfsmitteln zugrunde liegen. Für die Untersuchung von Foyerstützen ist zunächst zu beantworten, welche Baustoffe und statischen Systeme zugrunde gelegt werden können sowie welche Brandschutzanforderungen vorliegen. Denkbare realistische Brandszenarien sind erforderlich, um daraus die unmittelbaren Umgebungs-

temperaturen bzw. lokalen Brandraumtemperaturen ermitteln zu können. Dabei ist von Interesse, wie die Bauteile, im Besonderen die Stützen, auf diese Szenarien reagieren, um daraus die maßgebenden Bauteiltemperaturen ableiten zu können. Für das Aufstellen maßgebender Brandszenarien sind zunächst Kenntnisse über die Umgebung der zu bemessenden Bauteile erforderlich. Für die Untersuchungen sind daher grundlegenden Charakteristiken von Atrien und Foyers festzustellen. Dahingehend ist zu beantworten, ob generelle Daten über Atrien und Foyers als Eingangsbereiche vorliegen, beispielsweise unter anderem über die Art und Verteilung der Brandlasten. Daraus ist abzuleiten, welche Auswirkungen sich auf die Feuerwiderstände von Bauteilen für die Stützenbemessung ergeben. Dabei ist der Einfluss von Abständen zwischen Brandquelle und Bauteil sowie möglicher Grenzbrandlasten zu untersuchen. In wieweit damit im Brandfall auch ungeschützte Stahlstützen für Foyer- und Atriumsituationen rechnerisch möglich sind, ist fraglich. Das bestehende Sicherheitsniveau soll dabei nicht unterschritten werden. Daher stellt sich auch die Frage, ob sich aus gewonnenen Erkenntnissen wahrscheinlichkeitstheoretische Aussagen treffen lassen. Im Rahmen dieser Arbeit stellt sich zudem die Frage, ob sich Typisierungen von Atrien und Foyers vornehmen lassen, um einfacher qualitative und quantitative Unterschiede zu anderen Gebäudebereichen für die Fragestellung herauszuarbeiten. Hierbei ergibt sich die Frage, ob sich aus diesen Betrachtungen allgemeingültige Aussagen für die lokale Bemessung von Stützen im Brandfall ableiten lassen. Eine Übertragbarkeit der Ansätze zu ähnlichen, räumlichen Situationen bei anderen Nutzungen ist daher zu diskutieren.

### **1.3 Zielsetzung und Methodisches Vorgehen**

Aufgrund der in Kapitel 1.1 beschriebenen Widersprüchlichkeiten bei der Stützenbemessung im Brandfall in brandlastarmen Einbausituationen, wie Eingangsbereiche in Atrien und Foyers von Büro- und Verwaltungsgebäuden oder vergleichbaren charakteristischen Situationen, sollen im Rahmen dieser Arbeit die zugehörigen Grundlagen, Randbedingungen und Zusammenhänge näher erforscht werden. Das bedeutet, dass für die Bemessung von Stützen im Brandfall in bestimmten Umgebungen oder Gebäudeteilen Erkenntnisse gewonnen werden sollen, um mögliche Systemreserven auf Seiten der Einwirkungen oder bei der Reaktion der Bauteile zu analysieren.



Der Ansatz zur Lösung des Problems (siehe auch Kapitel 1.2) wird in der besonderen Charakteristik des Einbauortes gesehen. Dieser führt zu besonderen Annahmen hinsichtlich der Brandszenarien im Vergleich zu hochbauüblichen Nutzungseinheiten mit flächig verteilten Brandlasten. Dafür wird im Rahmen des Literaturstudiums zunächst der aktuelle Stand der Erkenntnisse herausgearbeitet (Kapitel 2), um die offenen Fragen gemäß Kapitel 1.2 zu klären. Darauf aufbauend werden im Rahmen von eigenen Datenerhebungen (Kapitel 3) Grundlagen für realistische Brandszenarien und Bemessungssituationen geschaffen. Dazu werden Expertenbefragungen mittels der Delphi-Methodik durchgeführt. Im Anschluss folgt ein numerischer Teil (Kapitel 4), in dem die Einflussfaktoren auf die thermische und mechanische Analyse bei der Stützenbemessung untersucht und quantifiziert werden. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 ausgewertet und diskutiert. Abschließend wird ein Fazit gezogen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit werden zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere, zu betrachtende Fragestellungen gegeben (Kapitel 6).

## 2 Stand der Erkenntnisse in Wissenschaft, Normung und Technik

### 2.1 Einleitung

Bauaufsichtliche Klassifizierungen von Bauteilen in Feuerwiderstandsklassen sind in der Regel anhand der Normbrandkurve, genannt *Einheits-Temperaturzeitkurve* (ETK), möglich. Diese ist je nach vorliegender Nutzung sehr konservativ. Reale Brände, nachfolgend als *Naturbrände* bezeichnet, laufen in der Regel anders als die ETK ab. Der Verlauf von Naturbränden wird maßgeblich von der Nutzung und, damit verbunden, der Brandlast und der jeweiligen Umgebung beeinflusst; siehe auch Kapitel 2.3.4.

Unter der Voraussetzung, dass in Atrien und Foyers die konstruktive Umsetzung deskriptiver Vorgaben an den Feuerwiderstand von Bauteilen wie die Ausführung in Stahlbeton- oder Stahlverbundbauweise bzw. mit einem vollständig bekleideten oder mit einem intumeszierenden Anstrich versehenen Bauteil nicht gewünscht ist, kann der Nachweis ggfs. über Ingenieurmethoden des Brandschutzes mittels Naturbrand geführt werden.

Dabei ist zunächst das Bemessungsbrandszenario festzulegen und mit der Bauaufsicht abzustimmen. Daraus resultieren die thermischen Einwirkungen auf die Bauteile. In der thermischen Analyse werden anhand der Brandraumtemperaturen die Bauteiltemperaturen ermittelt, woraus sich das thermomechanische Materialverhalten der Stütze im Brandfall berechnen lässt. In der mechanischen Analyse wird zum Beispiel eine stählerne Stütze mit den statischen Einwirkungen im Brandfall (außergewöhnliche Bemessungssituation) belastet und den infolge des Brandes reduzierten Tragfähigkeiten gegenüber gestellt. Dies erfolgt entweder anhand des vereinfachten Verfahrens (Level 2) gemäß [DIN EN 1993-1-2] in Verbindung mit dem nationalen Anhang oder mit dem allgemeinem Verfahren (Level 3) unter Berücksichtigung thermischer Dehnungen und maximaler Spannungen und Verformungen als Abbruchkriterium. Der diesbezügliche Stand der Erkenntnisse wird in diesem Kapitel dargelegt, um die relevanten Zusammenhänge und Einflussfaktoren zu erfassen.

## 2.2 Stand des Baurechtes und der Normung

### 2.2.1 Brandschutzanforderungen an Atrien und Foyers – Bauordnungsrecht

In Deutschland ergeben sich die brandschutztechnischen Anforderungen von Gebäuden respektive Bauteilen aus dem Bauordnungsrecht. Deren Umsetzung erfolgt über die Technischen Baubestimmungen. Das bedeutet, dass die Anforderungen an den Feuerwiderstand von tragenden und aussteifenden Bauteilen in den Landesbauordnungen und den jeweiligen Sonderbauverordnungen verankert sind. Hierbei gilt: Anforderungen, die sich aus bauaufsichtlich eingeführten Sonderbauverordnungen ergeben, sind gegenüber den Anforderungen aus den jeweiligen Landesbauordnungen vorrangig zu bewerten. Das gilt für Verschärfungen infolge eines höheren Risikos genauso wie für entsprechende Erleichterungen. Grundsätzlich richtet sich das brandschutztechnische Risiko nach der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß. Es ändert sich also in Abhängigkeit von der Gebäudegröße und der Gebäudehöhe sowie der Nutzung.

Um eine bessere Risikoeinschätzung von Eingangssituationen in Atrien und Foyers vornehmen zu können, wird diesbezüglich im Bauordnungsrecht recherchiert. Bezüglich des Vorkommens der Begrifflichkeiten *Atrium*, *Foyer* oder *Eingangshalle* in bauordnungsrechtlichen Regelwerken wird zudem auf den Anhang F verwiesen. Hier ist eine vollständige Liste aller Paragraphen von bauordnungsrechtlichen Muster Vorschriften und Kommentaren enthalten, in denen *Atrium*, *Foyer* oder *Eingangshalle* Erwähnung finden. Dabei ist für deren bauordnungsrechtliche Zuordnung die Tatsache von Interesse, dass in der Musterbauordnung [MBO2002] selber keiner der drei Begriffe verwendet wird. Das *Foyer* findet neben der Hochhausrichtlinie [MHHR] vor allem in der Versammlungsstättenverordnung [MVStättV] vielfache Erwähnung. Die *Eingangshalle* wiederum gibt es nur in der Musterkrankenhausbauverordnung [KhBauVO] und das *Atrium* taucht in gar keinem übergeordneten Regelwerk auf. Lediglich in einem Hamburger Bauprüfdienst<sup>1</sup> (BPD 05/2012 Brandschutztechnische Auslegungen) wird das *Atrium* explizit erwähnt, siehe folgenden Ausschnitt:

---

<sup>1</sup> Bauprüfdienste (BPD) sind Arbeitsmittel, mit denen die Hamburger Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bauprüfabteilungen Empfehlungen und Erläuterungen zur Anwendung der jeweiligen Rechtsvorschriften gibt. Eine bindende Wirkung in irgendeiner Form, weder verwaltungsintern noch für die am Bau Beteiligten, kommt ihnen nicht zu.

### Anforderungen an Glasbauteile und -fassaden über Rettungswegen

[...] Die Bauteile dieser Konstruktionen dürfen im Brandfall innerhalb eines Zeitraums von 30 Minuten nicht großflächig abfallen, um eine Gefährdung von Personen beim Verlassen des Gebäudes zu vermeiden. Gleiches gilt für Versammlungsstätten und **Atrien**.

Im deutschsprachigen Ausland gibt es dazu einige Regelungen. In der *Schweizer Brandschutznorm* sowie der Erläuterung *Atriumbauten* [VKF2003b] sind Vorgaben zu Rettungswegen und zum Raumabschluss von Atrien vorhanden. Jedoch sind auch dort keine zusätzlichen Angaben zu tragenden Bauteilen enthalten (vgl. Kapitel 2.5.2).

In Deutschland werden die Brandschutzanforderungen an tragende Wände und Stützen in Abhängigkeit von den Gebäudeklassen gestellt: In Gebäuden der Gebäudeklasse 3 (Gk3) müssen diese feuerhemmend (R30) sein, in Gebäuden der Gk4 hochfeuerhemmend (R60), in Gebäuden der Gk5 feuerbeständig (R90) und in Hochhäusern > 60 m hochfeuerbeständig (R120). Für tragende Bauteile in eingeschossigen Versammlungsstätten gelten die Anforderungen an feuerhemmende Bauteile (R30), vgl. Gk3, und für tragende Bauteile mehrgeschossiger Versammlungsstätten entsprechend Anforderungen an feuerbeständige Bauteile, vgl. Gk5. Anforderungen an die tragenden Teile von Dächern werden bei Standardgeschossbauten nicht gestellt (R0). Das Tragwerk der Dächer über Versammlungsstätten und Verkaufsstätten ist jedoch feuerhemmend auszubilden (R30).

Weitergehende Brandschutzanforderungen sowie auch die unterstellten, gemittelten Brandlasten eines Bereiches werden häufig mit der Tatsache verbunden, dass es sich um einen Aufenthaltsraum handelt. Die bauordnungsrechtliche Bedeutung von Aufenthaltsräumen wird auch an anderen Stellen deutlich, zum Beispiel bei den Brandschutzanforderungen an Geschossdecken. Gelten für Decken im Hochbau geschossweise Anforderungen an den Feuerwiderstand und das bauordnungsrechtliche Prinzip des Raumabschlusses, werden diese Grundsatzanforderungen unterhalb von Geschossen ohne Aufenthaltsräume wieder aufgehoben. Denn die Brandschutzanforderungen an Geschossdecken in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse gelten gemäß §31 (1) [MBO2002] für Geschosse im Dachraum nur, wenn darüber Aufenthaltsräume möglich sind. Das lässt im weiteren Verlauf den Schluss zu, dass sich die bauordnungsrechtlichen Schutzziele ausdrücklich auf Aufenthaltsräume sowie deren Nutzung, Erschließung, Brandlasten und das damit einhergehende Risiko beziehen. Im Umkehrschluss könnten unter bestimmten Voraussetzungen gewisse Erleichterungen für reine Durchgangsräume zugelassen werden.

Definitionsgemäß ist ein Aufenthaltsraum nach §2 (5) [MBO2002] zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt oder geeignet. Unabhängig von einer Gebäudenutzung, wie der Wohn- oder Büronutzung sowie der Nutzung als Krankenhaus, Beherbergungs- oder Versammlungsstätte, kann ein Atrium oder Foyer Aufenthaltsräume enthalten oder, vergleichbar mit einem notwendigen Flur, nur die Funktion eines reinen Durchgangsraumes übernehmen. Im Gegensatz zu einem notwendigen Flur, der immer ein elementarer Bestandteil des Rettungswegesystems ist, müssen über ein Foyer als Durchgangsraum nicht notwendigerweise auch Rettungswege führen.

Foyers dienen als Verkehrsfläche zwischen innen und außen grundsätzlich der Erschließung von angrenzenden Nutzungseinheiten und Aufenthaltsräumen. Je nach Art und Nutzung des Gebäudes sind Foyers auch Empfangs- und Pausenräume für Besucher. Befindet sich ein Foyer jedoch in einer Versammlungsstätte, handelt es sich automatisch um einen Versammlungsraum gemäß [MVStättV]. Versammlungsräume sind Räume für Veranstaltungen oder Aufenthaltsräume für den Verzehr von Speisen und Getränken. Sobald ein Foyer zu einem Versammlungsraum erklärt wird, erfolgt für das Foyer auch automatisch die inhaltliche Verknüpfung mit einem Aufenthaltsraum und alle damit in Verbindung stehenden Anforderungen und Brandlasten. Dadurch unterscheidet sich ein Versammlungsraum signifikant von einem bloßen Durchgangsraum. Während infolgedessen ein Aufenthaltsraum widerspruchsfrei auch ein Durchgangsraum sein kann, handelt es sich bei einem definierten Durchgangsraum im bauordnungsrechtlichen Sinne um keinen Aufenthaltsraum. Das bedeutet, durch ein Foyer in einer Versammlungsstätte wird der Sonderbautatbestand gemäß §2 (4) [MBO2002] ausgelöst, woraufhin sich das Anforderungsniveau zusätzlich zur [MBO2002] auch aus der [MVStättV] ergibt.

Im bauordnungsrechtlichen Sinne ist ein Atrium oder ein Foyer nicht automatisch ein definierter Sonderbau, sofern nachfolgende Randbedingungen ausgeschlossen werden können:

- Das Foyer beherbergt keine Verkaufsflächen, insbesondere keine, mit Ladenstraßen größer als 800 m<sup>2</sup> (§2 (4), Nr.4 [MBO2002]).
- Das Foyer enthält keinen Raum, der einzeln für die Nutzung durch mehr als 100 Personen bestimmt ist (§2 (4), Nr.6 [MBO2002]).
- Das Foyer ist kein Versammlungsraum und auch nicht Teil einer Versammlungsstätte mit Versammlungsräumen, die insgesamt mehr als 200 Besucher fassen (§2 (4), Nr.7 [MBO2002]).

Foyers in anders genutzten Gebäuden (zum Beispiel Eingangshallen in Büro- und Verwaltungsgebäuden) sind dann Versammlungsräume, sofern sie für Veranstaltungen im Sinne der [MVStättV] genutzt werden. Ausstellungsräume von Museen sind vom Geltungsbereich der [MVStättV] explizit ausgeschlossen (siehe §1 (3) 3. [MVStättV]). Verfügt ein Museum jedoch zusätzlich zu den Ausstellungsräumen noch über Veranstaltungsräume oder Empfangs- und Pausenräume für den Verzehr von Speisen und Getränken, die jeweils für mehr als 200 Personen ausgelegt sind, ist die [MVStättV] wiederum anzuwenden. Das gilt also nur, wenn der Raum entsprechend groß genug ist und im funktionalen Zusammenhang mit Veranstaltungen oder dem Konsum von Speisen und Getränken steht. Das lässt folgende Schlüsse zu:

- 1.) Eine Ausstellung in einem Foyer führt alleine nicht zur Anwendung der [MVStättV], unabhängig von der Größe des Foyers.
- 2.) Gleichzeitig bedeutet es für Bürogebäude, dass ein Foyer mit einer Grundfläche < 100 m<sup>2</sup> unabhängig von der Nutzung kein Foyer im Sinne der MVStättV ist.
- 3.) Unter diesen beiden Randbedingungen bleibt ein Foyer ein Durchgangsraum und ist kein Aufenthaltsraum. Ergo ist die Frage nach nutzungsbedingten Brandlasten gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] für diesen Bereich nicht beantwortet.

Für derartige Anwendungsfälle existiert daher keine rechtliche Grundlage, die Anforderungen im Sinne der [MVStättV] umzusetzen. Sofern folglich ein Foyer in einem anders genutzten Gebäude als eine Versammlungsstätte nicht ausdrücklich für Veranstaltungen mit mehr als 200 Personen vorgesehen ist, wird aus diesem Foyer kein Versammlungsraum und damit auch kein Aufenthaltsraum, sondern es bleibt ein Durchgangsraum. Ob es sich in der weiteren Folge auch um einen Rettungsweg handelt, ist wiederum unabhängig davon zu beurteilen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Atrien oder Foyers im Sinne einer Eingangssituation einen besonderen Gebäudeteil darstellen, der jedoch unabhängig von einer Gebäudenutzung in verschiedenen Gebäudeformen vorkommen kann. Vermutlich sind Atrien daher bauordnungsrechtlich auch nicht eindeutig geregelt. Fehlen für ein brandschutztechnisch zu bewertendes Tragwerk oder Bauteil innerhalb des betreffenden Brandabschnittes bauaufsichtliche Bezugsregelungen, wie beispielsweise für die Atriumbauweise, sind schutzzielorientierte Festlegungen zu treffen. Anders als die Anforderungen an Rettungswege, den Raumabschluss oder an die brandschutztechnische Infrastruktur (Anlagentechnik) ergibt sich der erforderliche

Feuerwiderstand tragender Stützen allein aus der Gebäudeklasse, unabhängig von der Raumhöhe, der Nutzung oder von der Tatsache, ob es sich um einen Durchgangsraum oder Aufenthaltsraum handelt. Das Schutzziel ist daher eindeutig formuliert, für dessen Umsetzung implizit die ETK unterstellt wird. Sofern von der ETK abgewichen werden soll, sind für die Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz zunächst die entsprechenden Brandlasten festzulegen, um daraus die resultierenden Bemessungsbrandszenarien zu formulieren.

### 2.2.2 Normung und Baurecht in Deutschland

In Deutschland steht die oberste Bauaufsicht der Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz bislang noch immer sehr kritisch gegenüber. Noch zur bauaufsichtlichen Einführung der Eurocodes im Jahr 2012 war der Naturbrand gemäß Anlage 1.2/1 [MLTB2011] von der Anwendung vollständig ausgenommen. Auch wenn diese drastische Einschränkung mit der [MLTB2012] wieder zurückgenommen wurde, so stellt die Anwendung von Naturbrandmodellen auch weiterhin noch eine Abweichung dar. Anlage 1.2/1 [MLTB2014] führt dazu folgendes aus:

*Das Ergebnis der Bemessung des Feuerwiderstands (Brandeinwirkung und Nachweis) tragender oder aussteifender Bauteile auf der Grundlage von Naturbrandmodellen bedarf einer Abweichung nach §67 Abs. 1 MBO. [...]*

Das bedeutet, selbst einige normative Teile der nationalen Anhänge der Eurocodes tragen demgemäß nicht vollumfänglich den Status einer eingeführten Technischen Baubestimmung. Als Beispiel in Bezug auf Naturbrände sei hier das vereinfachte Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände im Anhang AA (normativ) aus [DIN EN 1991-1-2/ NA:2010-12] genannt. Hier ergibt sich ein gewisser Widerspruch, da das Anwenden von Naturbrandmodellen gemäß Eurocode dem Tatbestand einer Abweichung nach §67 [MBO2002] unterliegt. Gemäß §3 (3) [MBO2002] kann allerdings von den Technischen Baubestimmungen abgewichen werden, wenn mit einer anderen Lösung im gleichen Maße die allgemeinen Anforderungen des Absatzes 1 erfüllt werden:

*Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.*

Genau diese Gleichwertigkeit im Sinne der Bauordnung ist aber laut Anlage 1.2/1 [MLTB 2012] offenbar nicht gegeben, wodurch formal jegliche Rechts- und Planungssicherheit entfällt:

*Bauteilbemessungen auf der Grundlage von Naturbrandmodellen stellen auf die jeweilige konkrete Nutzung und Ausgestaltung eines Raums oder Gebäudes unter Berücksichtigung der vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur ab. Eine solche Bauteilbemessung deckt das auf Feuerwiderstandsklassen ausgerichtete, globale bauaufsichtliche Anforderungssystem (Gebäudeklassen, Höhenlage der Geschosse, Gebäudeart) nicht vollständig ab.*

Der Brandschutzplaner ist hier auf positive (Einzelfall-) Entscheidungen im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens angewiesen. Weiterhin wird in [MLTB2012] ausführlich dargelegt, welche möglichen Einschränkungen und Konsequenzen sich für die Nutzung ergeben und wie bzw. durch wen die tatsächlichen Brandlasten in welchen Intervallen zu kontrollieren sind:

*Dazu ist im Bauantrag oder in den Bauvorlagen anzugeben, weshalb es einer ETK-Brandbeanspruchung nicht bedarf und darzustellen, dass (und weshalb) das gewählte Brandmodell für das Vorhaben geeignet ist und wie die damit zwangsläufig verbundene eingeschränkte Nutzung der Anlage (z.B. aufgrund begrenzter Brandlasten) sichergestellt werden soll [...].*

Zweifelsohne ist die Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz komplex. Jedoch werden Vorbehalte bei den Bauaufsichten oder der Baupraxis dadurch eher forciert, wodurch diese Einschränkung vermutlich nicht zur raschen Verbreitung der Ingenieurmethoden im Brandschutz führen wird. Denn bei Anwendung der brandschutztechnischen Eurocodes werden ohne die Option *Naturbrandmodell* bei weitem nicht die Ergebnisse erzielt, die möglich wären. Der Erkenntnisgewinn aus dem Stand der Wissenschaft der letzten Jahrzehnte bleibt, verbunden mit einem gewissen bürokratischen Aufwand, nur wenigen Bauvorhaben vorbehalten. Die positiven Effekte aus den Innovationen der Eurocodes werden sich sowohl in architektonischer als auch in monetärer Hinsicht vermutlich nicht im gewünschten Umfang einstellen. Zumindest bleiben sie für Deutschland weit hinter dem theoretisch Möglichen zurück.



### 2.2.3 Normung und Baurecht international am Beispiel von Großbritannien

Ganz anderes bzw. deutlich aufgeschlossener sieht dies offensichtlich die Bauaufsicht beispielsweise in England und Wales. Hier werden nach [Wallasch2013] Ingenieurmethoden seit einigen Jahren nicht nur geduldet, sondern für bestimmte Fragestellungen explizit gefordert und der Stand der Wissenschaft mit einbezogen. Anders als in Deutschland mit seinen deskriptiven Vorgaben der Landesbauordnungen werden in England und Wales mit den sogenannten *Building Regulations* [BuildReg2010] lediglich Schutzziele als qualitative Vorgaben definiert. Ähnlich zur dreistufigen Bemessung der Eurocodes stellt der Gesetzgeber für England und Wales im Weiteren die Richtlinien für die quantitativen Festlegungen zur Verfügung.

- Level 1: Das *Approved Document B* [AD-B:2007] enthält deskriptive Standardauslegungen für kleinere Bauvorhaben (Regelfall).
- Level 2: Im *British Standard 9999* [BS9999:2008] werden erweiterte Vorgehensweisen für 20 verschiedene Gebäudearten detailliert dargestellt. Dabei handelt es sich um vereinfachte Nachweise jedoch bereits mit den Grundprinzipien von Stufe 3. Spezielle Kenntnisse in der Anwendung von Ingenieurmethoden werden dabei jedoch bewusst nicht vorausgesetzt, damit diese Regeln nicht nur von Spezialisten angewendet werden können, so [Wallasch2012]. Letztendlich erweitert der etwas wissenschaftlichere [BS9999:2008] das eher empirische [AD-B:2007].
- Level 3: Allgemeine Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Anwendungen ingenieurmäßiger Nachweisverfahren im Brandschutz stehen den Planern bereits seit den 90er Jahren zur Verfügung, z.B. *Draft for Development, Fire Safety Engineering in Buildings* [DD BS 240:1997] oder *Fire safety engineering* [BS ISO 13387:1999]. Neben der grundsätzlich möglichen, parallelen Anwendung kann es unter bestimmten Voraussetzungen gemäß [AD-B:2007] *Fire safety engineering* sogar explizit erforderlich sein, Ingenieurmethoden des Brandschutzes anzuwenden, insbesondere, wenn es wie bei großen, komplexen Bauvorhaben die einzige Nachweismethode ist, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen. Weiterhin wird im [AD-B: 2007] explizit auf den [BS 7974:2002] *Application of fire safety engineering principles to design of buildings* verwiesen.

Das bedeutet, in England und Wales darf auf die anerkannten Regeln der Technik respektive den aktuellen Stand der Wissenschaft zurückgegriffen werden. Seitens des Gesetzgebers sind Ingenieurmethoden des Brandschutzes als gleichwertige, teilweise als einzige Nachweismethode bereits akzeptiert und anerkannt. Mit einem erfolgreichen Abbau an Bürokratie und der Förderung des Brandschutzingenieurwesens sowie der expliziten Forderung danach unterscheidet sich die baurechtliche und normative Situation von Großbritannien signifikant von der Situation in Deutschland.

## **2.3 Thermische Analyse**

### **2.3.1 Allgemeines**

Mit dem Fokus auf die Besonderheiten von Brandszenarien in brandlastarmen Eingangsbereichen von Gebäuden werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Brandentstehung, der Wärmeübertragung und der Brandweiterleitung erläutert. Neben einigen grundlegenden Informationen zum Sicherheitskonzept im Brandfall wird auf die Grundzüge der Ermittlung von Bauteiltemperaturen eingegangen. Das genannte Sicherheitskonzept dient der Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten, welche maßgebend für die Bemessungsbrandszenarien sind.

### **2.3.2 Grundlagen der Brandentstehung**

Ein Verbrennungsvorgang ist gemäß [Pasch1994] eine schnell ablaufende, exotherme Redoxreaktion aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, wobei chemische Enthalpie in Wärme und Licht umgewandelt wird (siehe auch Anhang A). Damit ein Feuer entstehen kann, sind drei wesentliche Komponenten erforderlich: Brennstoff, Sauerstoff und Wärme. Nur wenn alle drei Bestandteile gleichzeitig und im richtigen Mengenverhältnis zueinander vorhanden sind, kommt es zur Brandentstehung. Fehlt eine dieser Komponenten, findet keine Entzündung statt und es kommt nicht zu einem Brand. Die Wegnahme des Brennstoffes ist während eines Löscheinsatzes sicherlich selten realisierbar, jedoch hat sie insbesondere im vorbeugenden Brandschutz ihre Bedeutung. Die Brandentstehung und Brandausbreitung kann durch die Verwendung nichtbrennbarer Baustoffe oder definierter Freiflächen verhindert werden. Für eine

quantitative Bewertung von Brandkenngrößen wird nachfolgend auf die einzelnen Komponenten näher eingegangen:

### Brennstoff (Brandlast)

Die Menge des verfügbaren Brennstoffes wird mit Brandlast bezeichnet. Die Brandlast ist gemäß [DIN EN ISO 13943:2000-10] definiert als: „Summe der Wärmeenergie, die bei der Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem Gebäudebereich einschließlich der Bekleidung von Wänden, Decken und Fußböden sowie aller brennbaren Gebäudeinhalte frei werden könnte“. Die Art und Menge der Brandlast werden entweder deterministisch, über die Masse und den Heizwert, bezogen auf eine Bezugsfläche beschrieben oder statistisch, über nutzungsbedingte Brandlastdichten, wie in Kapitel 2.5.4 dargelegt. Eine allgemeine Schreibweise der Brandlast geht beispielsweise auf [Pettersson1976] zurück:

$$q = \frac{\sum m_v \cdot H_v}{A_t} \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (2-1)$$

$m_v$	Gesamtmenge aller brennbaren Stoffe	[kg],
$H_v$	Spezifischer Heizwert des jeweiligen Stoffes	[MJ/kg],
$A_t$	Gesamte Oberfläche des Brandraumes (hier Boden <u>inkl.</u> Decke und Wände)	[m <sup>2</sup> ].

Um darüber hinaus die Art der Verbrennung eines Stoffes näher zu beschreiben, wurde ein dimensionsloser Faktor eingeführt, der als Verbrennungseffektivität bezeichnet wird. Dadurch wird bei Brandlasten gewichtet, wie vollständig ein Brennstoff abbrennt oder ob eine vollständige Verbrennung zu erwarten ist. Ausgedrückt wird dies in [DIN EN 1991-1-2/NA:2010] durch die Formel:

$$q_{f,d} = \frac{\sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \chi_i \cdot \Psi_i}{A_f} \cdot \gamma_{f,q} \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (2-2)$$

$M_{k,i}$	Menge des brennbaren Stoffes	[kg],
$H_{ui}$	Spezifischer Heizwert (Nettverbrennungswärme)	[MJ/kg],
$\chi_i$	Verbrennungseffektivität, für Feststoffe $\chi = 0,8$	[-],
$\Psi_i$	Kombinationsbeiwert zur Berücksichtigung geschützter Brandlasten	[-],
$A_f$	Grundfläche des Brandraumes	[m <sup>2</sup> ].

Zur näheren Erläuterung der Begriffe wird auf Anhang A Brandkenngrößen verwiesen. Bezüglich des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{f,q}$  siehe Kapitel 2.3.7 Sicherheitskonzept im Brandfall.

Im Industriebau, wo rechnerische Nachweise in Deutschland bereits vor der Einführung der Eurocodes eine gewisse Tradition hatten, wird zur Definition einer Brandlast die Normenreihe [DIN 18230] zugrunde gelegt. Neben einer anderen Einheit wird das Brandverhalten von Stoffen, welches durch die Lagerungsart und die Lagerungsdichte beeinflusst wird, über den Abbrandfaktor  $m$  in Analogie zur Verbrennungseffektivität gemäß der Eurocodes definiert. Grundsätzlich unterliegen Brandlasten gewissen Streuungen. Bei der Brandlastermittlung sind daher Unsicherheitsfaktoren zu berücksichtigen. Entsprechend [DIN18230-1:2010] ist stets eine rechnerische Mindestbrandbelastung von  $q_R = 15 \text{ kWh/m}^2$  zugrunde zu legen. Der Eurocode sieht für unvorhergesehene Brandlasten ebenfalls einen Mindestbemessungswert in gleicher Größenordnung vor. Dieser beträgt  $q_{f,d,\min} = 50 \text{ MJ/m}^2$ , was etwa  $14 \text{ kWh/m}^2$  entspricht.

### **Sauerstoff (Ventilation)**

Durch die Ventilationsverhältnisse wird in einem Brandraum das für die Verbrennung erforderliche Sauerstoffangebot definiert. Steht ausreichend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung, wird der Brand als *brandlastgesteuert* bezeichnet. Wird die Wärmefreisetzungsrates durch ein zu geringes Sauerstoffangebot limitiert, wird der Brand als *ventilationsgesteuert* bezeichnet (siehe auch Anhang A Brandkenngrößen). Die Ventilation ist von der Beschaffenheit des Brandraumvolumens und dessen Öffnungen abhängig. Daher sind neben der Grundfläche und der Höhe eines Brandraumes die Anzahl und Lage der Ventilationsöffnungen im unteren und oberen Raum Drittel für die Zu- und Abluft im Brandfall von Bedeutung (Kamineffekt).

### **Wärme (Zündquelle)**

Die dritte Komponente, Wärme, kann auf unterschiedliche Weise auftreten. Sie liegt entweder als entsprechende Umgebungstemperatur vor oder wird durch eine externe Zündquelle herbeigeführt. Neben den klassischen Mechanismen der Wärmeübertragung gemäß Kapitel 2.3.3 kommen als mögliche Zündquellen vor allem offene Flammen in Frage. Nach [Knetsch2006] kann davon ausgegangen werden, dass auch bei der Zündung von Feststoffen die Konzentration der Zersetzungsprodukte an der Oberfläche der Konzentration des Brennpunktes (siehe auch Anhang C) entsprechen muss, wie die folgende Abbildung zeigt:



Abbildung 1: Visualisierte Zündenergie eines Streichholzes  
(Foto mit freundlicher Genehmigung von Atelier Ralf Bauer, Köln)

Für die Entzündung von Feststoffen muss eine Zündquelle in der Lage sein, neben der Zündenergie auch die brennstoffabhängige Aufbereitungsenergie zu liefern. Dieses Erkenntnis ist für die Betrachtung von Brandrisiken bzw. Brandentstehungswahrscheinlichkeiten in Bereichen mit lokal begrenzten Brandlasten wesentlich und wird anhand nachfolgenden Beispiels verdeutlicht:

Ein Streichholz liefert z.B. als mögliche Zündquelle gemäß [Rodewald2007] eine Brandtemperatur von ca. 800 °C. Die Zündtemperatur von Holzkohle wird von [Rodewald2007] mit 350 °C, die von Hartholz (beispielsweise als Treppenstufe oder massiver Schreibtisch) mit 295 °C angegeben, siehe auch Anhang C. Theoretisch ist ein Zündholz also grundsätzlich in der Lage, Holz oder Holzkohle zu entzünden. Liegen diese beiden Feststoffe jedoch weder thermisch aufbereitet noch mechanisch zerkleinert vor, wird es bei Raumtemperatur trotzdem nicht gelingen, diese nur mit einem brennenden Streichholz zu entzünden. Bezogen auf diese beiden Feststoffe verfügt ein Streichholz mit seiner begrenzten Brennzeit zwar über eine ausreichende Zündenergie (siehe Abbildung 1) jedoch nicht über eine ausreichende Aufbereitungsenergie.

### 2.3.3 Arten der Wärmeübertragung

Für nachfolgende Untersuchungen über die Auswirkungen von lokalen Bränden auf die unmittelbare Umgebung ist die Kenntnis bzw. das Verständnis über die Arten der Wärmeübertragung von Bedeutung. Dabei geht es um den Wärmetransport von der

Brandquelle zur Bauteiloberfläche und von dort weiter ins Bauteilinnere. In diesem Kapitel werden daher die Prinzipien der Wärmeübertragung erläutert.

Streng theoretisch betrachtet, gibt es entgegen vieler Standardwerke der Literatur zur Physik bzw. Thermodynamik, wie beispielsweise *Thermodynamik für Ingenieure* [Langeheinecke2013], *Wärme- und Stoffübertragung* [Baehr2013], *Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler* [Povh2014] oder *Lehrbuch der Bauphysik* [Willems2013] nicht drei Arten der Wärmeübertragung bzw. bei Unterteilung der Konvektion in freie und erzwungene Konvektion sogar vier Arten der Wärmeübertragung, sondern nur zwei. Die eine Form der Wärmeübertragung erfolgt mit Materie (Wärmeleitung bzw. Konduktion) und die andere ohne (Wärmestrahlung bzw. Radiation). Die sogenannte dritte Form, Konvektion, ist daher nur eine Unterform der Wärmeleitung, nämlich die Wärmeübertragung von einer Oberfläche zu einem bewegten Fluid. Darauf hat Nußelt bereits 1915 in seiner Veröffentlichung *Das Grundgesetz des Wärmeüberganges* [Nußelt1915] hingewiesen. Jedoch ist der konvektive Wärmeübergang die maßgebende Form der Wärmeübertragung aus einer Brandquelle. Sie macht je nach Brandgut im Mittel etwa 70 % der Wärmefreisetzung aus.<sup>2</sup> Denn gemäß [Schneider2008] wird nur etwa 30 % der Brandenergie durch Flammen in Form von Strahlungswärme freigesetzt. In [DIN EN 1991-1-2:2010] wird sogar von nur etwa 20 % ausgegangen. Außerdem entspricht beispielsweise aufsteigender Rauch im Brandfall genau dieser Wärmeübertragungsform. Daher wird die Konvektion hier gleichwertig mit aufgeführt. Im Folgenden wird zwischen Konduktion, Konvektion und Radiation unterschieden:

### 1a) Konduktion (Wärmeleitung)

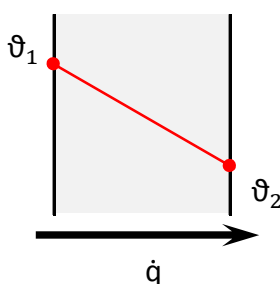


Abbildung 2: Wärmeleitung im Festkörper oder ruhendem Fluid

Wärmeleitung oder Wärmediffusion entsteht in Feststoffen (Bauteilen) und ruhenden Fluiden, wenn in ihnen ein Temperaturgradient vorhanden ist, siehe Abbildung 2. Der Wärmestrom  $\dot{q}$  verläuft dabei stets von der höheren zur niedrigeren Temperatur. Beim Übertragungsmechanismus Wärmeleitung wird nach [Langeheinecke2013] der Transport von Energie durch Vorgänge im molekularen Bereich verursacht.

<sup>2</sup> Bezogen auf den Nettowärmestrom sei in diesem Zusammenhang erwähnt, dass sich die einzelnen Anteile aus Konvektion und Strahlung bei genauerer Betrachtung im Laufe eines Brandes zueinander temperaturabhängig verändern.

Die kinetische Energie wird dabei zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen ohne Materialtransport übertragen, wie beispielsweise durch Gitterschwingungen oder Elektronendiffusion. Bei den ungerichteten Zufallsbewegungen von Teilchen bewegen sich im statistischen Mittel thermisch bedingt mehr Teilchen vom höher konzentrierten Energieniveau zum niedriger konzentrierten Energieniveau als umgekehrt. In Summe führt dieser irreversible Prozess zu einem makroskopischen Stofftransport (Wärmetransport). Die Fähigkeit eines Stoffes dazu, ausgedrückt durch den temperaturabhängigen Proportionalitätskoeffizienten  $\lambda$  mit der Einheit [W/mK] wird als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet.

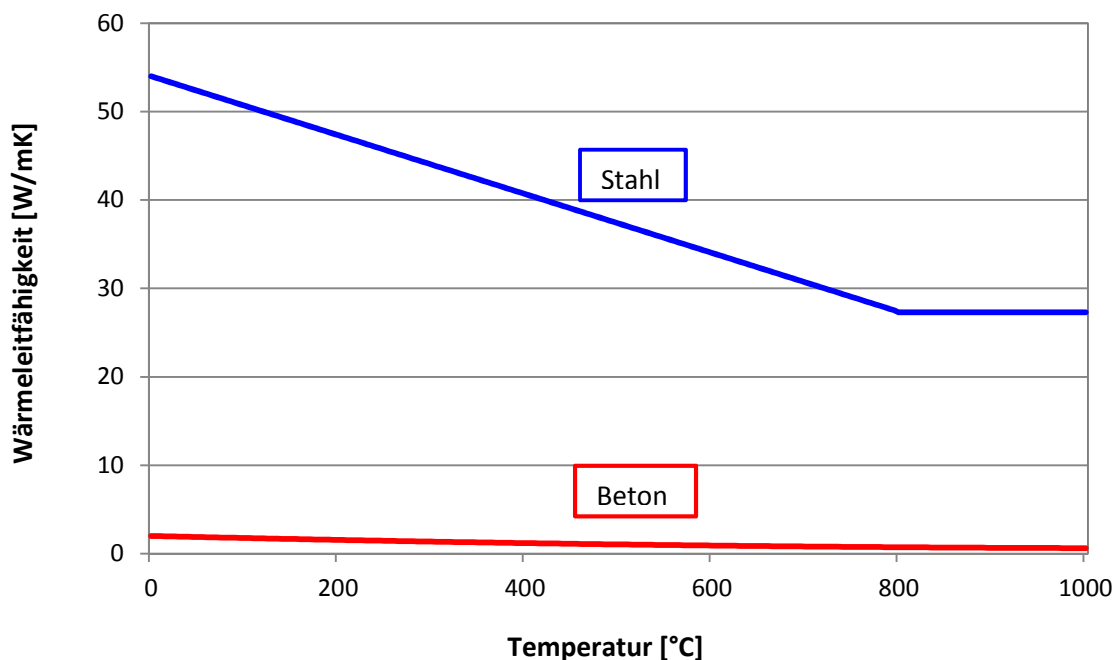


Abbildung 3: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Stahl und Beton (obere Grenze) im Vergleich nach [DIN EN 1994-1-2]

Stahl ist ein Beispiel für einen Baustoff mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit. Wie Abbildung 3 zu entnehmen, beträgt die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Stahl im Vergleich zu Beton zwischen dem 27-fachen und dem 45-fachen des Wertes. Das Phänomen der Wärmeleitung wird durch die *Fouriersche Differentialgleichung* beschrieben, welche besagt, dass Wärmestrom pro Fläche  $\dot{q}$  als vektorielle Größe dem Gradienten der Temperatur  $\text{grad } T$  entgegen gerichtet ist, siehe auch Kapitel 2.3.6 Ermittlung von Bauteiltemperaturen.

### 1b) Konvektion (Wärmeströmung)

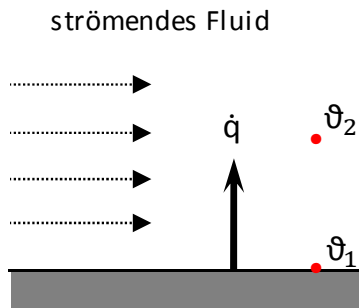


Abbildung 4: Konvektiver Wärmeübergang

Bei der Konvektion wird nach [Willems2012] Wärme von einem strömenden Fluid als innere Energie oder Enthalpie mitgeführt. Konvektion funktioniert daher nur bei strömungsfähigen Stoffen, wie etwa Luft oder Wasser. Daher wird Konvektion auch als Wärmeströmung bezeichnet. Wie bei der Wärmeleitung muss auch bei der Konvektion ein stofflicher Träger für die transportierte Energie vorliegen. Allerdings wird die Wärmeenergie hier zusammen mit dem Stoff

transportiert. Nach [Baehr2013] beinhaltet Konvektion die Überlagerung von Energietransport durch das strömende Fluid und der Wärmeleitung. Denn durch den Strömungsvorgang wird nach [Doering2012] eine ständig wechselnde Teilchenbewegung unterschiedlicher Temperaturen hervorgerufen, zwischen denen Energieübertragung durch Wärmeleitung stattfindet. Überdies wird Konvektion nach der Ursache der Strömung in freie Konvektion und erzwungene Konvektion unterteilt. Bei erzwungener Konvektion entsteht die Strömung gemäß [Glück1990] durch eine äußere Druckdifferenz, verursacht durch beispielsweise Ventilatoren oder Pumpen. Bei freier Konvektion hingegen entsteht Strömung ohne äußere Einflüsse, sondern bedingt durch Temperatur- und damit durch korrespondierende Dichteunterschiede im Fluid. Die freie oder auch natürliche Konvektion beschreibt daher den natürlichen Auftrieb im Brandfall, siehe Abbildung 5.

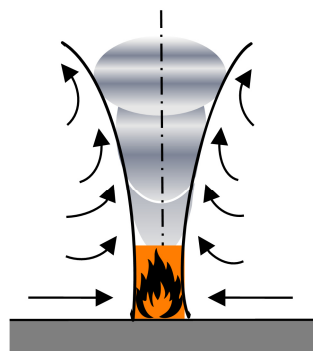


Abbildung 5: Prinzip der freien Konvektion im Brandfall

Bezogen auf Bauteile im Brandfall tritt der Wärmeübergang durch Konvektion gemäß [Glück1990] dann auf, wenn ein strömendes Fluid Wärme an eine Oberfläche abgibt oder von ihr aufnimmt.



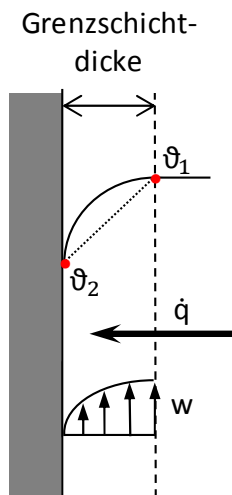


Abbildung 6: Konvektiver Wärmeübergang am Bauteil

In der Nähe eines Bauteils wird der Durchmischungseffekt eines Fluids entsprechend geringer als in gewisser Entfernung. Unmittelbar am Bauteil bildet sich eine Grenzschicht aus ruhenden oder laminar strömenden Fluidteilchen, wodurch die Wärme über Wärmeleitung vom Fluid ins Bauteilinnere gelangt (siehe Abbildung 6). Die Intensität des Wärmeübergangs am Bauteil je Kelvin Temperaturgefälle wird durch den Proportionalitätsfaktor  $\alpha$  mit der Einheit  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  beschrieben, genannt Wärmeübergangskoeffizient oder Wärmeübergangszahl.

Dieses ist jedoch keine Stoffkonstante, sondern abhängig von der Art der Strömung, der Strömungsgeschwindigkeit sowie von der Temperatur, der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit des Fluids sowie den geometrischen Verhältnissen und der Oberflächenbeschaffenheit. Er ist unabhängig von Materialkennwerten des Bauteils. Der formelmäßige Zusammenhang des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  wird über die dimensionslose Nußelt-Zahl  $Nu$  hergestellt:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (2-3)$$

Nu	Nußelt-Zahl	[-],
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$[\text{W}/\text{mK}]$ ,
l	Schichtdicke	$[\text{m}]$ .

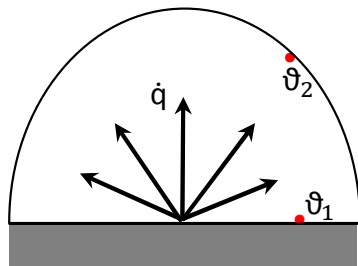
Je größer  $\alpha$  ist, desto ungünstiger ist die Wärmedämmwirkung an der Stoffgrenze. In der Literatur werden für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  durch freie Konvektion bei ruhenden oder mäßig bewegten Luftschichten an senkrechten Wänden Größenordnungen von 5 bis  $50 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  angegeben, siehe auch [Kurzweil2008]. Wenn genauere Informationen über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nicht vorliegen, kann beispielsweise bei Naturbränden gemäß [DIN EN 1991-1-2: 2010]  $\alpha_c = 35 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  verwendet werden. Für die vom Brand abgekehrte Oberfläche darf  $\alpha_c = 9 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  zugrunde gelegt werden. Bei Anwendung der ETK beträgt  $\alpha_c = 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . Damit lässt sich der *Newton'sche Ansatz* für die Wärmestromdichte formulieren, welche proportional zur Temperaturdifferenz ist. Dieser Ansatz ist auch in die aktuelle

Normung [DIN EN 1991-1-2:2010] mit eingeflossen und wird dort als konvektiver Anteil des Netto-Wärmestroms bezeichnet:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-4)$$

$\alpha_c$	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion	$[\text{W/m}^2\text{K}]$ ,
$\theta_g$	Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils	$[\text{°C}]$ ,
$\theta_m$	Oberflächentemperatur des Bauteils	$[\text{°C}]$ .

## 2.) Radiation (Wärmestrahlung)



strahlender Körper im Halbraum

Abbildung 7: Wärmestrahlung

Mit Strahlung wird der Wärmetransport zwischen Körpern über elektromagnetische Wellen bezeichnet, welche durch eine Temperaturdifferenz der Oberflächen hervorgerufen wird. Anders als bei den Mechanismen Wärmeleitung und -strömung, die an ein Trägermedium gebunden sind, wird für den Strahlungswärmetransport keine Materie benötigt. Dieser Wärmetransport kann also auch im Vakuum stattfinden.

Strahlung wirkt in alle Richtungen, auch seitlich der Wärmequelle, wie in Abbildung 7 veranschaulicht wird. Anders als die strömungsabhängige Konvektion, wirkt sie auch entgegen der Strömungsrichtung. Die Wärmestrahlung ist ein Bestandteil des elektromagnetischen Wellenspektrums und wird im Wesentlichen durch Infrarotstrahlung transportiert, welche als langwellig gilt, hat aber auch gewisse Anteile des sichtbaren sowie des ultravioletten Spektrums, siehe auch Abbildung 8. Dass der Wellenbereich, der als Wärmestrahlung zu bezeichnen ist, in der Literatur unterschiedlich beziffert wird, ist jedoch kein Widerspruch, sondern lediglich eine Frage der Intensität. Der Einfluss der Temperaturstrahlung ist abhängig von der Wellenlänge. Bei kurzweiliger Strahlung spielt die Farbe der Oberfläche eine wesentliche Rolle, denn dunkle Flächen absorbieren kurzweilige Strahlung stärker und erwärmen sich dadurch schneller als helle Flächen. Bei langweiliger Strahlung ist es jedoch von untergeordneter Bedeutung, welche Farbe eine Oberfläche aufweist [Homann1997]. Außerdem hat die Farbe einer Stahlstütze im Hochtemperaturbereich auf dessen Erwärmung im Brandfall ohnehin keinen Einfluss, da jegliche Farben auf Stahlprofilen zu diesem Zeitpunkt bereits verbrannt sind.

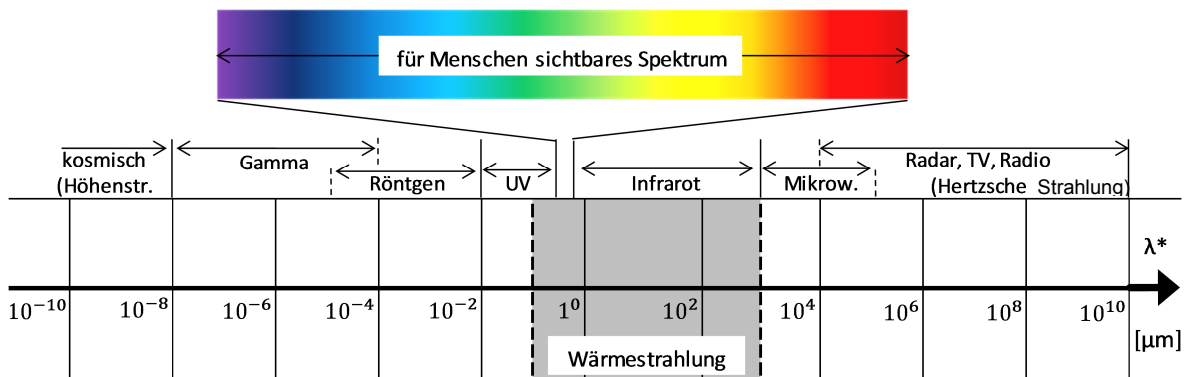


Abbildung 8: Wärmestrahlung (grau hinterlegt) innerhalb des elektromagnetischen Wellenspektrums, in Anlehnung an [Herwig2009]

Wärmestrahlung wird von fester, flüssiger oder gasförmiger Materie durch Umwandlung innerer Energie (beispielsweise durch Gitterschwingungen) abgegeben. Die Strahlen bewegen sich durch die Luft, bis sie auf ein Material treffen. Die dort ankommende Strahlung wird je nach Material und Wellenlänge zu einem Teil von der Oberfläche absorbiert, teilweise reflektiert sowie anteilig transmittiert (siehe Abbildung 9).

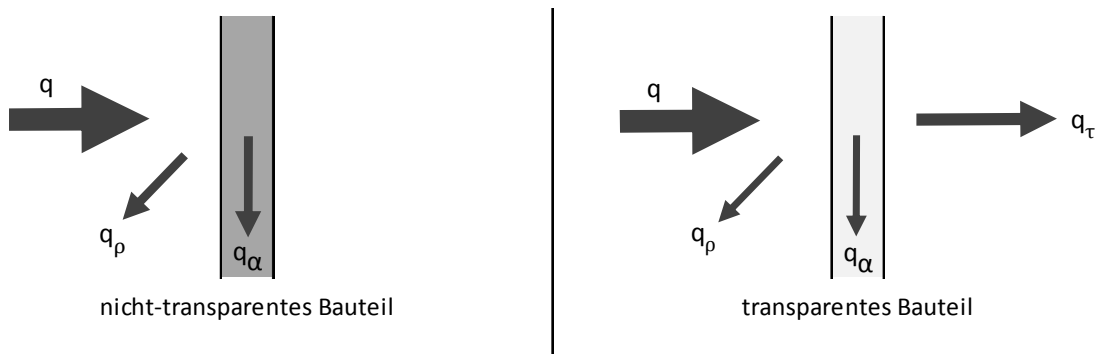


Abbildung 9: Absorption ( $\alpha$ ), Reflexion ( $\rho$ ) und Transmission ( $\tau$ ) am nicht-transparenten (links) und am transparenten Bauteil (rechts) nach [Homan1997]

Die Summe der Strahlungsanteile ( $\alpha$ ,  $\rho$  und  $\tau$ ) ist gemäß [Rodewold2007] immer 100 %, bei nicht-transparenten Bauteilen nähert sich  $q_\tau$  entsprechend dem Null-Wert an.

$$\alpha + \rho + \tau = 1,0 \quad [-] \quad (2-5)$$

Gleichzeitig strahlt jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, der bei  $-273,15$  °C liegt, auch selber Energie ab. Dieses wird als Emission bezeichnet. Hierbei sind folgende idealisierte Grenzfälle zu unterscheiden, welche mit *schwarzer*

und *weißer Strahler* benannt werden. Ein schwarzer Strahler hat definitionsgemäß einen Emissionsgrad  $\varepsilon$  von  $\varepsilon = 1$  und emittiert mit der größtmöglichen spektralen Strahlungsdichte und das bei jeder Temperatur, Wellenlänge und Richtung. Ein weißer Strahler hat einen Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0$  und emittiert gar keine Strahlung (idealer Reflektor). Ein realer Strahler hat einen Emissionsgrad zwischen 0 und 1 und wird als *grauer Strahler* bezeichnet, dessen Emissionsgrad unabhängig von der Wellenlänge definiert ist. Dessen spezifische Abstrahlung (Strahlungsleistung) wird durch das *Stephan-Boltzmann-Gesetz* beschrieben. Bezogen auf einen schwarzen Strahler, beschreibt es anteilig die Strahlungsleistung, welche zur vierten Potenz der Temperatur proportional ist.

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma_B \cdot \theta^4 \quad [\text{W}] \quad (2-6)$$

$\varepsilon$	Emissionsgrad des Strahlers	[-],
A	Oberfläche des Körpers	[m <sup>2</sup> ],
$\sigma_B$	Stephan-Boltzmann-Konstante: $5,6704 \cdot 10^{-8}$ (Strahlungskoeffizient des schwarzen Strahlers)	[W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ],
$\theta$	absolute Temperatur an der Oberfläche	[K].

Im Vergleich zur Konvektion wird hierbei deutlich, warum der Strahlungsanteil  $\dot{Q}_S$  beim Wärmetransport mit zunehmender Temperatur überproportional ansteigt, siehe dazu auch Abbildung 10. Teilweise wird in der Literatur nicht der Strahlungsstrom, sondern die Strahlungsstromdichte  $\dot{q}$  beschrieben, welche in folgendem Zusammenhang steht:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-7)$$

$\dot{Q}$	Strahlungsstrom	[W],
A	Oberfläche des Körpers	[m <sup>2</sup> ].

Diese Formulierung wurde auch in die aktuelle Normung [DIN EN 1991-1-2:2010] übernommen und dort als radiativer Anteil des Netto-Wärmestroms  $\dot{h}_{\text{net},r}$  bezeichnet:

$$\dot{h}_{\text{net},r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-8)$$

$\phi$	Konfigurationsfaktor nach Anhang G [DIN EN 1991-1-2:2010]	[-]
$\varepsilon_m$	Emissivität der Bauteiloberfläche	[-]
$\varepsilon_f$	Emissivität des Feuers	[-]
$\sigma$	Stephan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\theta_r$	wirksame Strahlungstemperatur des Brandes	[°C]
$\theta_m$	Oberflächentemperatur des Bauteils	[°C]

Anhand des nachfolgenden Diagramms (siehe Abbildung 10) kann entsprechend dem obigen Wärmetransportansatz des Eurocodes für jeweils eine konstante Oberflächentemperatur der zugehörige Strahlungsanteil im Brandfall in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz entnommen werden. Vereinfacht beträgt hier  $\phi = 1$  (konservativ).

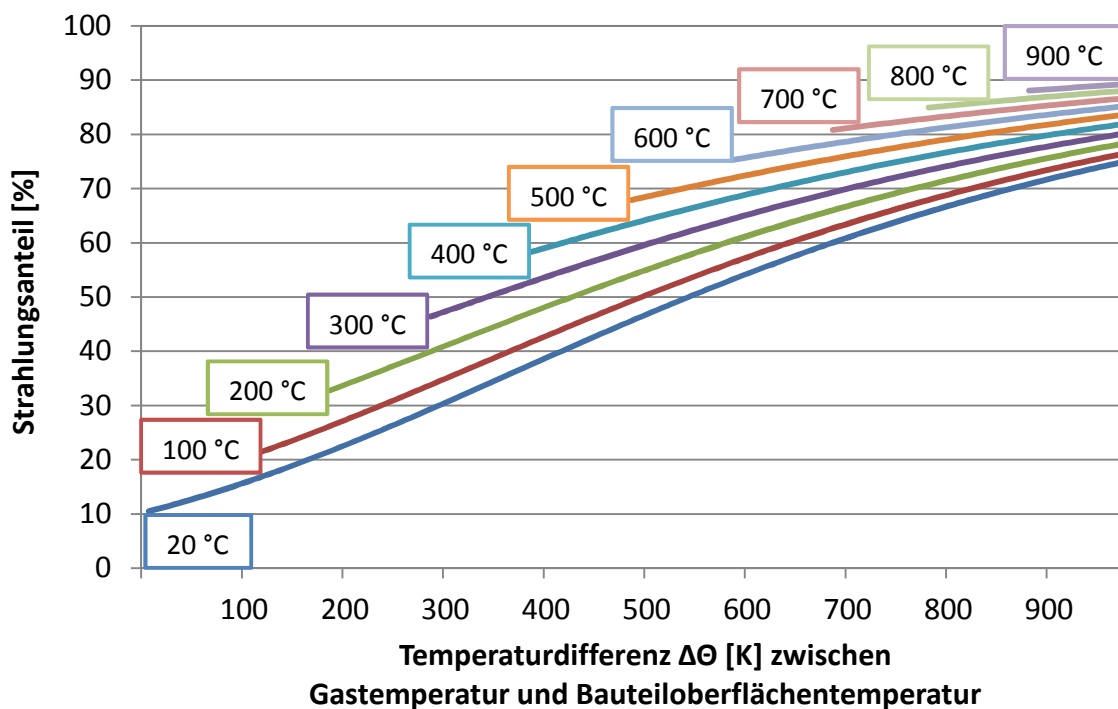


Abbildung 10: Strahlungsanteile am Gesamtwärmestrom  $\dot{h}_{\text{net}}$  im Brandfall für bestimmte Oberflächentemperaturen, abhängig von  $\Delta\theta$  gemäß [DIN EN 1991-1-2:2010]

Eine entsprechende Tabellenübersicht als Grundlage dieses Diagramms befindet sich in Anhang D. Dabei wird ersichtlich, dass die Temperaturdifferenz zwischen der einwirkenden Brandtemperatur und der Bauteiloberfläche normativ den größten Einfluss auf den Strahlungsanteil hat. Außerdem zeigt sich hier, dass der Strahlungsanteil generell bei höheren Temperaturen gegenüber der Konvektion überproportional ansteigt (siehe auch Gleichung (2-6)).

Emission und Absorption treten so lange in Interaktion bis ein Körper mit seiner Umgebung thermisch im Gleichgewicht steht. Abhängig von der Wellenlänge und der Temperatur entspricht nach dem *Kirchhoffschen Strahlungsgesetz* der Absorptionsgrad  $\alpha$  eines Stoffes bei Temperaturstrahlung auch dem Emissionsgrad  $\varepsilon$ :

$$\alpha = \varepsilon = \text{const.} \quad [-] \quad (2-9)$$

Danach sind Absorption und Emission einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda^*$  gleich groß. Die Differenz aus absorbiertes und emittierter Strahlung wird als Wärme in das Bauteilinnere geleitet.

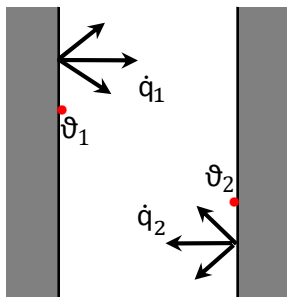


Abbildung 11: Wärmestrahlung korrespondierender Flächen

Stehen sich ein wärmerer und ein kälterer Körper parallel gegenüber, so zählt am Schluss die Wärmebilanz, was bedeutet, dass der kältere Körper vom wärmeren mehr Strahlungswärme empfängt, als er selber abgibt. Die Temperaturdifferenz wird insgesamt ausgeglichen. Im Gegensatz zu den beiden anderen Arten des Wärmetransports muss für die korrekte Energiebilanz die Rückstrahlung der Umgebung berücksichtigt werden. Gemäß dem

*Stephan-Boltzmann-Gesetz* und einem Strahlungsaustauschkoeffizienten  $C_{12}$  kann der Wärmestrom anhand folgender Beziehung ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A \cdot (\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad [\text{W}] \quad (2-10)$$

$C_{12}$	Strahlungsaustauschkoeffizient	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$ ,
$A$	Oberfläche des betrachteten Körpers	$[\text{m}^2]$ ,
$\theta_1$	Oberflächentemperatur 1	$[^\circ\text{C}]$ ,
$\theta_2$	Oberflächentemperatur 2	$[^\circ\text{C}]$ .

Bei parallelen Flächen ist  $C_{12}$  lediglich abhängig von den Emissionsgraden und der Strahlungskonstanten, siehe Gleichung (2-11). Nach [Homann1997] wird dabei unterstellt, dass der Abstand zwischen den Flächen gegenüber den Flächen klein ist:

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2-11)$$

Ist der Abstand entsprechend größer oder es sind nicht-parallele Flächen am Strahlungsaustausch beteiligt, wird beim Ausdruck für  $C_{12}$  der räumlichen Anordnung der Oberflächen zueinander durch die Einstrahlzahl  $\varphi_{12}$  Rechnung getragen, welche dem Konfigurationsfaktor  $\phi$  in Gleichung (2-8) entspricht. Neben der Bezeichnung Einstrahlzahl oder Konfigurationsfaktor wird in der Literatur auch der Begriff Sichtfaktor verwendet, wodurch bereits die Wirkung des Faktors treffend beschrieben wird. Da Strahlen nur auf direktem Wege wirken, ergeben sich je nach Oberflächenformen und geometrischer Lage beider Flächen zueinander gewisse Abschattungseffekte, die die Strahlungswirkung entsprechend reduzieren. Denn gemäß [Herwig2009] geht es unter dem Gesichtspunkt des Strahlungsaustausches vor allem um die Frage, welcher Anteil einer Fläche von der jeweils anderen aus sichtbar ist, da dies darüber entscheidet, wieviel der gesendeten Strahlung beim Empfänger respektive Absorber in spe ankommt. Da die konkreten geometrischen Verhältnisse oft schwer zu bestimmen und die Winkelbeziehungen zueinander kompliziert sind (siehe auch [Howel2010], *A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration View Factors*), wird der Faktor in der Literatur und nahezu bei allen Beispielen konservativ auf 1,0 gesetzt. Der allgemeine Fall des Strahlungsaustausches zweier infinitesimaler Oberflächen ist in Abbildung 12 dargestellt und befindet sich im Anhang G von [DIN EN1991-1-2:2010].

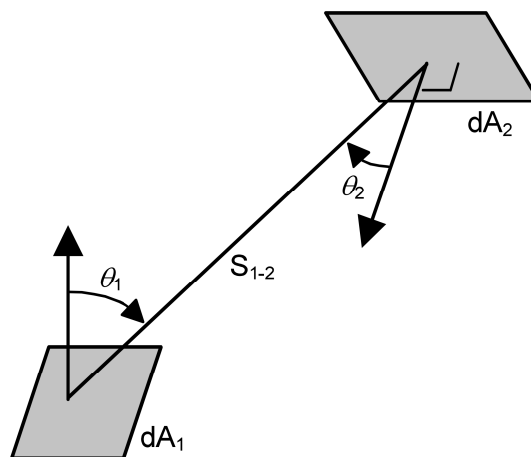


Abbildung 12: Erläuterung zum Konfigurationsfaktor beim Strahlungsaustausch zwischen zwei infinitesimalen Flächen  $dA$  im Abstand  $S_{1-2}$

Die mathematische Beziehung lautet:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S_{1-2}^2} dA_2 \quad [-] \quad (2-12)$$

Daraus wird deutlich, dass nicht nur Abschattungseffekte aus Winkelbeziehungen einen Einfluss auf den Strahlungstransport haben, sondern insbesondere der Abstand, was in anderen Bereichen der Physik durch ähnliche mathematische Beziehungen berücksichtigt wird<sup>3</sup>. Entsprechend reduziert sich die beim Brand anfallende Wärmestrahlung mit entsprechendem Abstand physikalisch in gleicher Weise. Auf dieser Erkenntnis wird in den numerischen Untersuchungen in Kapitel 4 aufgebaut und dabei auf die Temperatur in gewissen Abständen zur Brandquelle fokussiert.

#### 2.3.4 Brandszenarien für die Bemessung von Stützen

Bemessungsbrandszenarien sind theoretische aber durchaus mögliche Szenarien, welche eine Vielzahl denkbarer Brandverläufe auf der sicheren Seite liegend erfassen. Gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] gilt für Bemessungsbrände das 90 %-Quantil, wodurch Größen berücksichtigt werden, die während 90 % der Nutzungsdauer nicht überschritten werden. Als Brandszenario kommt in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen grundsätzlich entweder ein Vollbrand oder ein örtlich begrenzter Brand in Betracht. Weiterhin besteht die Möglichkeit, einen Normbrand oder einen Naturbrand zugrunde zu legen.

Klassische Brandszenarien für die Bauteilbemessung im Hochbau sind Normbrandszenarien, welchen ein Vollbrand zugrunde liegt. Die Normbrandkurve oder auch *Einheits-Temperaturzeitkurve* für Innenbauteile gemäß Abbildung 13 entspricht einem solchen Vollbrandszenario. Sie gilt als sehr konservativ, da sie die Brandentstehungsphase überspringt und direkt mit dem Flashover beginnt (siehe Begriffe im Anhang B Phasen eines Schadenfeuers (Naturbrand)). Außerdem setzt sie eine unendliche Brandlast bei optimaler Ventilation voraus. Sie stellt zudem die Grundlage für Bauteilprüfungen dar. Der klassifizierte Feuerwiderstand eines Bauteils unterliegt dieser Kurve. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die beiden anderen Normbrandkurven wie die *Externe Brandkurve* für Außenbauteile sowie auf die *Hydrokarbonbrandkurve*

<sup>3</sup> Im Bereich der Nuklearmedizin gibt es das *quadratische Entfernungsgesetz* zur Wirkungsreduktion von Röntgenstrahlung und im Bereich der Optik wird die reziproke, quadratische Reduktion der Strahlungswirkung durch das *photometrische Grundgesetz* beschrieben.



für Brände von Kohlenwasserstoffen nicht weiter eingegangen, da sie gemäß [DIN EN 1991-1-2/ NA] nicht für hochbauübliche Mischbrandlasten anzuwenden ist.

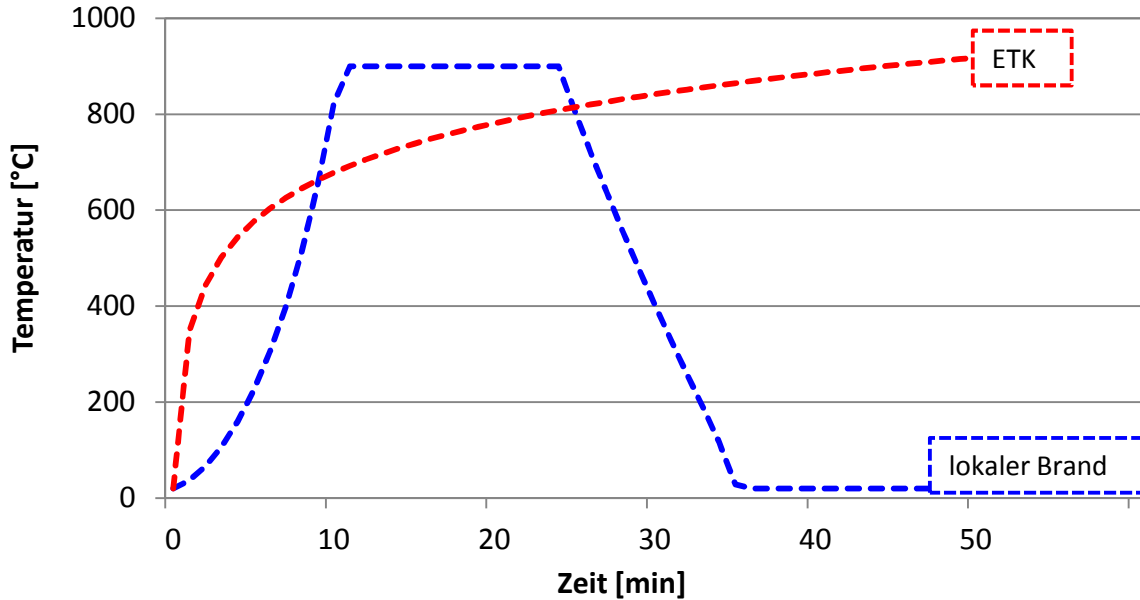


Abbildung 13: Normative Temperaturzeitkurve (ETK) und Naturbrandszenario (lokaler Brand) im Vergleich

Wie in Abbildung 14 dargestellt, laufen Naturbrände jedoch in der Regel anders ab. Sofern keine Explosion vorausgeht, entwickelt sich ein Brand zunächst und beginnt nicht direkt mit einem Feuerübersprung in die Vollbrandphase.

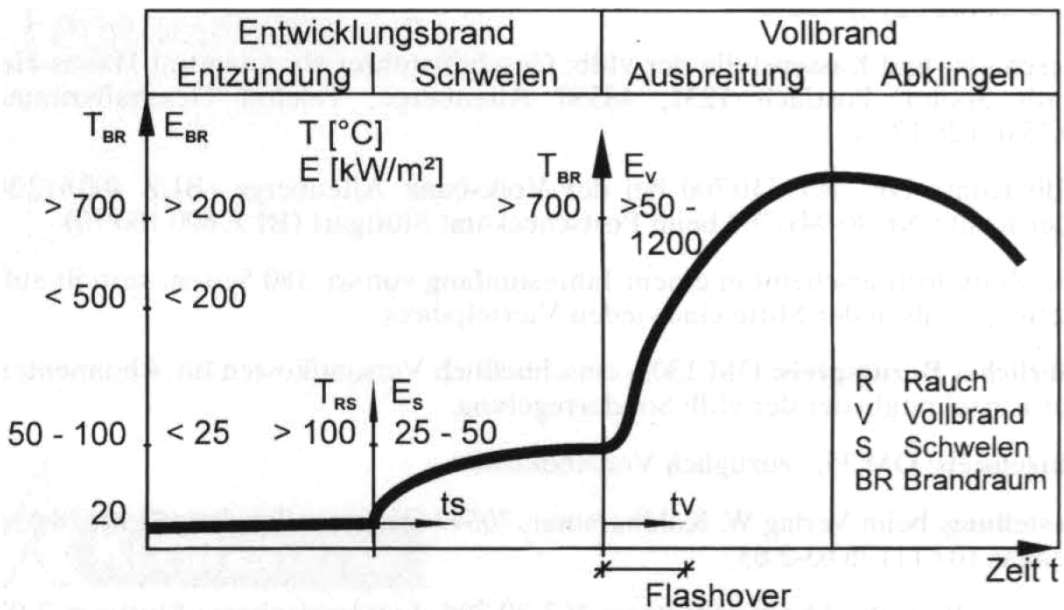


Abbildung 14: Brandphasen eines ungelöschten Naturbrandes gemäß [Schneider1995]

Da die Temperatur bei Vollbrandszenarien im gesamten Brandraum idealisiert als einheitlich angenommen wird, werden solche Szenarien auch mit 1-Zonen-Modellen abgebildet (vergleiche Abbildung 15). Wann beziehungsweise ob sich ein Brand zu einem Vollbrand entwickelt oder auf dem Niveau eines lokalen Brandes bleibt, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel der vorhandenen Brandlast oder den Ventilationsverhältnissen in Abhängigkeit des Raumvolumens. Daraus ergeben sich wiederum die maximalen Brandraumtemperaturen.

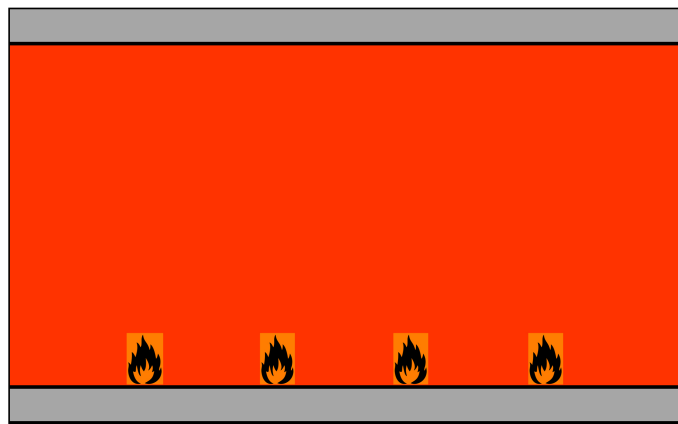


Abbildung 15: Ein-Zonenbetrachtung bei einem Vollbrand mit einheitlicher Temperatur

Brände sowie korrespondierende Gastemperaturen können bei gleicher Brandlast sehr unterschiedlich verlaufen, je nachdem, ob ein Brand auf dem Niveau eines Schwelbrandes bleibt oder er sich schnell entwickelt. Die Brandlast begrenzt dabei die Energiemenge, die insgesamt freigesetzt wird. Zum Einfluss der Ventilation siehe Kapitel 2.3.2.

Bezogen auf die zu bemessenden Bauteile erhält deren jeweilige Lage im Brandraum, in Abhängigkeit des gewählten Brandszenarios, einen unterschiedlich großen Einfluss auf die Umgebungstemperaturen. Bei Vollbrandszenarien ist es nicht erforderlich, nach unterschiedlichen Bauteilarten bzw. dessen Lage im Brandraum zu differenzieren, da im gesamten Brandraum eine einheitliche Temperatur unterstellt wird. Bei Naturbränden und insbesondere bei lokalen Bränden ist die Lage eines Bauteils durchaus bemessungsrelevant, da in den verschiedenen Zonen (siehe Abbildung 16) jeweils sehr unterschiedliche Temperaturen vorliegen.

Im unmittelbaren Bereich des Brandes bildet sich eine Rauchgassäule, welche in der Literatur als *Plume* bezeichnet wird. Auftriebsbedingt bildet sich im Deckenbereich eines Brandraumes eine anwachsende Rauchgasschicht, welche von hohen Temperaturen gekennzeichnet ist. Abgesehen vom lokal begrenzten Plumbereich befindet sich unter der Rauchgasschicht idealisiert die Kaltgasschicht, dessen mittlere

Temperatur sich nur geringfügig erwärmt. Die unmittelbare Flammennähe (Plumbereich) ist hingegen von lokalen Temperaturspitzen gekennzeichnet.

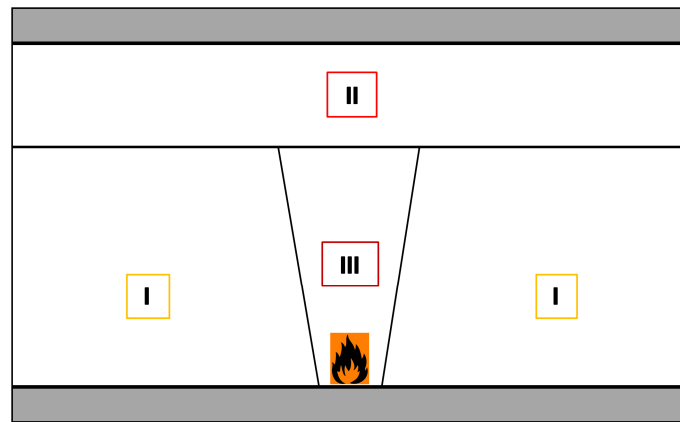


Abbildung 16: Qualitative Einteilung der Zonen bei einem Naturbrand: Kaltgasschicht (I), Heißgasschicht (II) und Plumbereich (III) nach [Schneider2007]

Im Gegensatz zu Unterzügen oder Fachwerkträgern, welche sich bereits während eines Entstehungsbrandes in der Heißgaszone befinden, stehen Stützen bei nicht vollständig entwickelten Bränden überwiegend in der Kaltgasschicht (I) und ragen partiell in die Heißgasschicht (II). Jedoch wird beim Ansetzen einer gemittelten Temperatur aus der Kaltgasschicht die Situation möglicherweise unterschätzt. Hingegen führt eine vollständige Berücksichtigung der Heißgastemperatur über die gesamte Stützenhöhe mutmaßlich zu einer Überschätzung der bemessungsmaßgebenden Umgebungstemperatur. Das gilt insbesondere bei größeren Volumina des Brandraumes. Das gedankliche Verschieben einer Stützenachse direkt in die Flammenachse (bezeichnet mit *Plume-Centerline*) vergrößert diesen Effekt noch, wie Kapitel 4.4 zeigt. Eine für die Bemessung auf der sicheren Seite liegende und trotzdem wirtschaftliche Temperaturermittlung kann aus gemittelten Zonentemperaturen folglich nur schwer abgeleitet werden. Daher werden für Stützen, sofern realistisch, entweder vereinfachte Vollbrandszenarien zugrunde gelegt, oder es erfolgt eine genauere Betrachtung des Plumbereiches (III) im Rahmen lokaler Brände. Der qualitative Aufbau eines Plumes kann Abbildung 17 entnommen werden.

Da ein Feuerüberschlag in brandlastarmen und gleichzeitig großvolumigen Räumen unwahrscheinlich ist [DIN EN 1991-1-2:2010], werden die thermischen Einwirkungen für Stützen im Rahmen dieser Arbeit aus einem örtlichen respektive lokal begrenzten Brand abgeleitet (siehe auch nachfolgendes Kapitel). Im Rahmen der thermischen

Analyse von nicht vollständig entwickelten Bränden gibt es jedoch einige Besonderheiten, die einen Bezug zur Fragestellung aufweisen.

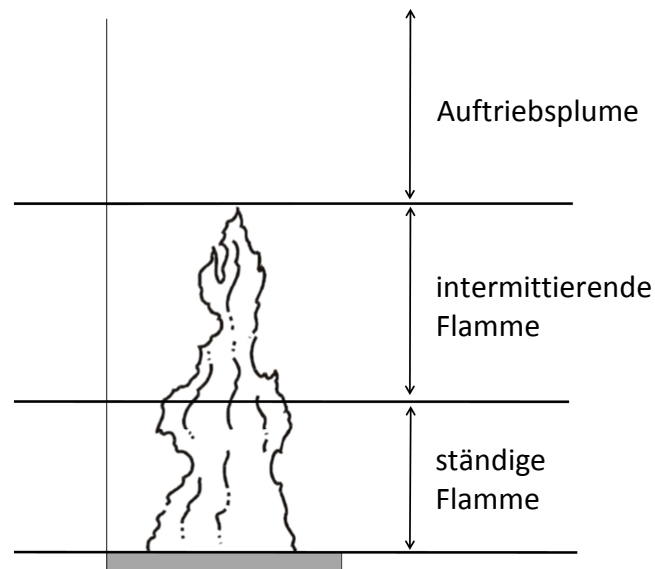


Abbildung 17: Die drei Zonen eines Auftriebsplumes nach [Karlsson2000]

Im vorbeugenden Brandschutz wird für Regelgeschossbauten unterstellt, dass deren Brandlasten überwiegend flächig verteilt vorliegen, wodurch ein Vollbrand grundsätzlich möglich ist. Traditionelle Bemessungsbrandszenarien für die Bauteilbemessung beruhen, sofern es sich explizit nicht um lokal begrenzte Brände handelt, daher auf Vollbrandszenarien. Das gilt für Normbrandkurven, wie der ETK oder den parametrische Naturbrandkurven gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010], welche auf [Zehfuß2004] zurückgehen, genauso wie für Temperaturkurven aus Naturbrandszenarien, die über Zonen- oder Feldmodelle simuliert werden.

Auch Vollbrandszenarien beginnen zunächst mit einem lokalen Entstehungsbrand. Über eine entsprechende Brandübertragung auf angrenzende Objekte im Brandraum breitet sich ein Feuer aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Brand an mehreren Stellen gleichzeitig ausbricht, ist jedoch vernachlässigbar gering. Im vorbeugenden Brandschutz wird daher grundsätzlich unterstellt, dass ein Brand immer nur an einer Stelle im Gebäude entsteht. Beginnt ein Brand an mehreren Stellen gleichzeitig, spricht vieles für Brandstiftung, welche nicht Gegenstand von Bemessungsbrandszenarien ist. Sind Brandlasten nicht flächig verteilt oder bestehen definierte Freiflächen, wie planmäßig bei bestimmten Industriebauten vorgesehen, ist es unwahrscheinlich, dass sich Brände vom Entstehungsort über den gesamten Brandraum respektive Brandabschnitt ausbreiten.

Wenn aber die Bedingungen im Brandraum trotz flächiger Brandlasten für einen Feuerübersprung auf alle Materialien und Gase nicht gegeben sind, gibt es das Phänomen der sogenannten *Travelling Fires*. Diese treten bei lokalen Bränden mit flächig verteilten Brandlasten dann auf, wenn die Randbedingungen nicht für einen Vollbrand ausreichen. Dabei breitet sich ein Brand über einen größeren Bereich aus, jedoch nicht gleichzeitig über den Brandraum im Sinne eines Vollbrandes, sondern zeitversetzt. Als klassisches Beispiel seien Garagen und Parkhäuser genannt. Dieses Phänomen ist in [Stern2011], [Stern2012a] und [Stern2012b] ausführlich beschrieben. Da eine Brandweiterleitung über brandlastfreie Flächen generell nicht möglich ist, kann das Phänomen der *Travelling Fires* für die betrachtete Fragestellung außer Acht gelassen werden. In klassischen Durchgangsräumen wie Atrien und Foyers sind keine lokalen Freistreifen zwischen Teilflächen mit flächig verteilten Brandlasten vorhanden, sondern überwiegend brandlastfreie Bereiche mit nur lokalen Brandlasten. Daher können keine *Travelling Fires* auftreten und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Eine weitere Besonderheit von lokalen Bränden wurde gemäß [Wilk2013a] bei einigen Brandversuchen beobachtet. Trotz nicht vorhandenem Vollbrand im Brandraum kam es auf einer Teilfläche zu einem örtlich begrenzten, vollentwickelten Brand, welcher lokal die gleichen Merkmale zeigte, wie ein klassischer Vollbrand. Dieses Phänomen wird von [Wilk2013a] als *lokaler Flashover* bezeichnet und trat immer dann auf, wenn die Form der Brandlast einen Hitzestau begünstigte, wie bei einem Verkaufsstand, einem Schreibtisch oder einer Garderobe. Ein *lokaler Flashover* leitet die maximale Wärmefreisetzung der lokalen Brandlast ein.

### 2.3.5 Ermittlung von Brandraumtemperaturen

In Analogie zur Staffelung der Eurocode-Bemessungsverfahren stehen für numerische Simulationen der Brandszenarien nach Kapitel 2.3.4 verschiedene Berechnungsverfahren zur Verfügung. Das beinhaltet einfache *Formeln* für nominelle oder parametrische Temperaturzeitkurven sowie vereinfachte Brandmodelle für Energiefreisetzungsraten oder explizite Temperaturen sowie erweiterte Wärmebilanzmodelle, wie *Zonenmodelle* und *Feldmodelle*. Im Rahmen dieser Arbeit wird diesbezüglich lediglich ein Überblick gegeben. Es wird auf die Grundzüge der Verfahren eingegangen, soweit es für die Fragestellung erforderlich ist. Für tiefere Erläuterungen wird auf die Literatur verwiesen (wie [Brein2001], [Hosser2013], [Knaust2009],

[Schneider2007] oder [Schneider2009]). Je nach Relevanz für die Fragestellung werden einzelne Phänomene näher erläutert.

Die Normbrandkurven basieren auf übersichtlichen **Gleichungen** und stellen die einfachste und häufig auch konservativste Methode dar, um Brandraumtemperaturen zu berechnen. Dies kann am Beispiel der folgenden ETK-Formel, welche der [DIN 4102-2:1994], [DIN EN1991-1-2:2010] oder [ISO834] entnommen werden kann und auf Abbildung 13 dargestellt ist, verdeutlicht werden:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10} (8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2-13)$$

$\theta_g$  Brandgastemperatur  $[^{\circ}\text{C}]$ ,  
 t Zeit [min].

Im Rahmen von vereinfachten, ingenieurmäßigen Berechnungsverfahren können einzelne physikalische Fragestellungen, wie Rauchgasmassenströme oder auch gemittelte Temperaturen über einen bestimmten Bereich zu einem definierten Zeitpunkt überschlägig berechnet werden. Dies geschieht über parametrische Temperaturzeitkurven, wie das vereinfachte Naturbrandmodell für voll entwickelte Raumbrände nach [Zehfuß2004] gemäß Anhang AA [DIN EN1991-1-2/NA:2010] oder über empirische Plume-Formeln, welche mittels Ähnlichkeitstheoretischer Kriterien aus Versuchen abgeleitet wurden. Sie kommen entweder für gezielte Fragestellungen oder als Grundlage für Zonenmodelle oder zur überschläglichen Prüfung von Feldmodellberechnungen zum Einsatz. Je nach Art der Brandquelle, ihrer Lage im Raum oder differenziert nach der Tatsache, ob es sich um einen Freistrahler handelt oder um eine Flamme, die die Decke erreicht, stehen jeweils andere Plumeformeln zur Verfügung. Einen Überblick über Plumeformeln und ihre Anwendungsgrenzen gibt zum Beispiel [Brein2001]. Für lokale Brände wurde der *Heskestad*-Ansatz in die aktuelle Normung mit aufgenommen (siehe Anhang C gemäß [DIN EN1991-1-2:2010]). Unter der Voraussetzung, dass ein Vollbrand nicht zu erwarten ist und die Flammenlänge  $L_f$

$$L_f = -1,02 \cdot D + 0,0148 \cdot Q_c^{2/5} \quad [\text{m}] \quad (2-14)$$

die Deckenhöhe  $H$  nicht erreicht ( $L_f < H$ ), können die thermischen Einwirkungen nach diesem Verfahren höhenknotenabhängig bestimmt werden.

$$\theta(z) = 20 + 0,25 \cdot Q_c^{2/3} (z-z_0)^{-5/3} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2-15)$$

$Q_c$	konvektiver Anteil der Wärmefreisetzungsrate: $0,8 Q$	[W],
$Q$	Wärmefreisetzungsrate des Brandes	[W],
$z$	Höhe entlang der Flammenachse	[m],
$z_0$	gedachter, virtueller Ursprung	[m].

Entsprechend dem nationalen Anhang [DIN EN1991-1-2/NA:2010] ist hierbei zu berücksichtigen, dass das vereinfachte Verfahren nur für lokal konzentrierte Brandlasten mit einer Wärmefreisetzungsrate von  $\geq 250 \text{ kW/m}^2$  gilt. Außerdem wird die Temperatur bis zu einer Höhe von  $z \leq 1 \text{ m}$  auf  $\theta(z) = 900 \text{ °C}$  festgelegt. Eine weitere Einschränkung dieses vereinfachten Verfahrens besteht in der Tatsache, dass Temperaturen nur in der Plumeachse berechnet werden können. Zur Visualisierung der Begrifflichkeiten wird auf Abbildung 18 verwiesen.

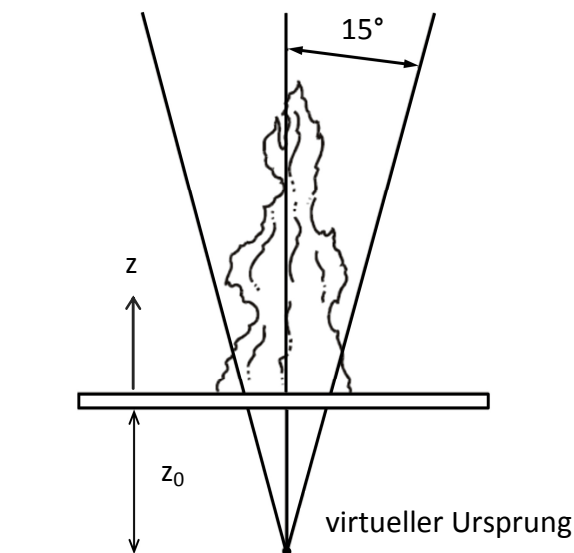


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Plumes mit virtuellem Ursprung der Punktquelle nach [Schneider2008]

Damit wird implizit unterstellt, dass sich eine zu bemessende Stütze stets mittig im Plume befindet. Aussagen zu Temperaturen außerhalb des Plumes können hierüber nicht getroffen werden. Das bedeutet, dass die Plume-Centerline der lokalen Brandlast und die Stützenachse direkt übereinander liegen. Diese wesentliche Annahme trifft jedoch nur unter ganz bestimmten Randbedingungen zu. Entweder müsste eine Brandlast direkt um eine Stütze herum angeordnet sein oder aber die Stütze befindet sich direkt über einer Wanne aus einer brennbaren Flüssigkeit. Beides erscheint für Brandlasten im klassischen Geschossbau nicht realistisch. Hochbauübliches Mobiliar wie ein Sofa oder ein Schreibtisch besteht im Wesentlichen aus Feststoffen und weist

immer einen gewissen Achsabstand zu einer Bauteilachse auf. Flüssigkeitsbrände hingegen, bei denen sich eine Stütze mittig über einer gefüllten Wanne mit brennbarer Flüssigkeit befindet, sind eher bei Industriebauten anzutreffen, wie auch dem nachfolgenden, schwedischen Versuchsaufbau zu entnehmen ist (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Versuchsaufbau einer Stütze mit flüssiger Brandlast aus [Sjöström2013]

Auf der Konferenz *Structures in Fire 2012* gab es diesbezüglich einen Beitrag von [Byström2012]. Unter der Leitung von Prof. Wickström wurden die Stützentemperaturen infolge lokaler Einwirkungen von Flüssigkeitsbränden aus Heptan und Diesel untersucht. Diese wurden mit den Temperaturen nach dem Verfahren aus dem Anhang C gemäß [DIN EN1991-1-2:2010] verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass der Eurocode-Ansatz die Temperaturen insbesondere im unteren Bereich, bis zu einer Höhe von 2,20 m, teilweise um mehrere Hundert Grad Celsius überschätzt. Hinzu kommen Effekte, wie eine ungleichmäßige Flammenausbildung, die dazu führt, dass um die Stütze herum, auf derselben Höhe Temperaturdifferenzen von mehreren Hundert Grad Celsius auftreten.

Vor dem Hintergrund, dass trotz der konservativen, zentrischen Lage der Brandlast zur Stütze die Temperaturen im Versuch signifikant unter denen des Eurocode-Ansatzes lagen, lässt sich unter baupraktischen Aspekten feststellen, dass das Brandszenario *lokaler Brand* gemäß Anhang C aus [DIN EN1991-1-2:2010] für Stützen konservative



Randbedingungen unterstellt. Der quantitative Einfluss wird in Kapitel 4 näher untersucht.

Eine Erweiterung zum *Heskestad-Ansatz* aus dem Eurocode ist das *Heskestad-Delichatsios-Modell* (H-D-Modell). In diesem Modell können neben vertikalen Abständen zur Brandquelle auch horizontale Abstände berücksichtigt werden. Das Verfahren wird in [Hosser2013] beschrieben und stammt ursprünglich aus [Heskestad1978]. Es gilt für horizontale Rauchgasströme im Deckenbereich (*Ceiling-Jets*) für den Zeitraum vor der Ausbildung einer Rauchgasschicht. In Kapitel 4 wird untersucht, ob das Verfahren auch geeignet ist, unterhalb horizontaler Rauchgasströme sinnvolle, auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse zu liefern. Der Ansatz zur Berechnung der Temperaturerhöhung an einem bestimmten Punkt lautet:

$$\Delta T_p = T_\infty \cdot (\dot{Q}^*)^{2/3} \cdot \left(0,188 + 0,313 \cdot \frac{r}{z}\right)^{-4/3} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2-16)$$

$\Delta T_p$	Änderung der Plume-Temperatur	[K],
$T_\infty$	Plume-Temperatur	[K],
$r$	radialer Abstand zur Plume-Achse	[m],
$z$	vertikaler Abstand zur Brandquellenoberfläche	[m],

$$\dot{Q}^* = \frac{(1-\chi_r) \cdot \dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z^{5/2}} \quad [-], \quad (2-17)$$

$\chi_r$	radiativer Anteil der Wärmefreisetzungsrate	[-],
$\dot{Q}$	Wärmefreisetzungsrate des realen Brandherdes	[W],
$\rho_\infty$	Dichte der Umgebungsluft	[kg/m <sup>3</sup> ],
$c_p$	spezifische Wärmekapazität der Kaltgasschicht	[kJ/kgK],
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ].

**Zonenmodelle** sind ein erweitertes Instrument, um überwiegend Aussagen zu Entrauchungsfragestellungen zu treffen. Dabei können verschiedene Brandverläufe rechnerisch simuliert werden, sowohl lokale Brände als auch voll entwickelte Brände. Innerhalb der jeweiligen Zonen, insbesondere der Heißgasschicht, werden über die Zeitschritte gemittelte Temperaturen ermittelt. Daher empfiehlt sich beispielsweise für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen in Deckennähe eine

Überlagerung von globaler Zonentemperatur und lokaler Plumetemperatur im Deckenbereich vorzunehmen. Zonenmodelle basieren auf den empirischen Plumeformeln der vereinfachten Berechnungsverfahren. Für verschiedene Randbedingungen liegen den Zonenmodellen unterschiedliche Plumeformeln zugrunde. Um damit den möglichen Übergang eines lokalen Brandes in einen Vollbrand zu simulieren, werden in Zonenmodellen bestimmte Übergangsbedingungen formuliert, wie zum Beispiel Senkung der Rauchsicht auf einen bestimmten Wert oder Ansteigen der mittleren Raumtemperatur auf 450 – 550 °C. Beim Erreichen der Vollbrandkriterien wird so der Übergang eines 2-Zonenmodells, mit einer Heißgasschicht (Rauchgasschicht) und einer Kaltgasschicht (raucharmen Schicht) in ein 1-Zonenmodell berücksichtigt. Komplexe Geometrien oder lokale Einflüsse können damit jedoch nur bedingt erfasst werden.

Um genauere Aussagen zu erhalten, komplexe Geometrien oder lokale Einflüsse zu berücksichtigen, besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Brände über **Feldmodelle** zu simulieren. Feldmodelle basieren auf der numerischen Strömungsmechanik <sup>4</sup> und werden angewendet, um strömungsmechanische Fragestellungen mit numerischen Methoden approximativ zu lösen. Den dabei verwendeten Modellgleichungen liegen die Prinzipien der Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung zugrunde. Die Variablen dieser strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen (siehe [McGrattan2013]) sind über den Brandverlauf sowohl zeitlich als auch örtlich veränderlich. Das gilt für die Temperatur ebenso wie für die Druckverhältnisse oder Geschwindigkeitsvektoren. Vergleichbar mit einer klassischen, zweidimensionalen Finite-Elementberechnung in der Baustatik wird hier jedoch ein Raum dreidimensional in Zellen unterteilt. Je nach Fragestellung und zur Verfügung stehender Rechenleistung wird der Brandraum entsprechend fein diskretisiert. Für jeden Zeitschritt werden die Feldgrößen in jeder Zelle berechnet. Daraus wird bereits ersichtlich, dass sowohl der Modellierungs- als auch Rechenaufwand im Vergleich zu den bereits erwähnten Berechnungsmethoden überproportional hoch ist. Ein guter Überblick über die Möglichkeiten und Hintergründe wird unter anderem in [Knaust2009] gegeben.

---

<sup>4</sup> Numerische Strömungsmechanik, englisch: Computational Fluid Dynamics (CFD)

### Software für die Ermittlung von Brandraumtemperaturen

Die Handformeln für Normbrandkurven oder für parametrische Naturbrandkurven sowie die vereinfachten Berechnungsverfahren der Plumemodelle können auf *Excel*-Basis berechnet werden. Für die Ermittlung von Brandraumtemperaturen über Zonenmodelle stehen verschiedene Computerprogramme zur Verfügung. Beispielhaft sei hier auf *OZone*, *Elefir*, *CFAST* und *MRFC* verwiesen. Die einzelnen Zonenmodelle greifen auf jeweils unterschiedliche Plumemodelle zurück, die für die jeweiligen Anwendungsfälle ausgewählt werden können. Außerdem sind Übergangsbedingungen formuliert, die den Übergang von einem 2-Zonenmodell zu einem 1-Zonenmodell definieren. Für Feldmodelle seien hier unter anderen *FDS*, *Fluent* und *Kobra* genannt. Die Aufzählungen sind nicht abschließend.

### 2.3.6 Ermittlung von Bauteiltemperaturen

Der Temperaturanstieg in einem Stahlbauteil ist grundsätzlich von der Massigkeit, ausgedrückt durch den Profilmfaktor  $A_m/V$  [1/m], abhängig. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen brandbeanspruchter Oberfläche und dem Volumen je Längeneinheit. Unter der Voraussetzung, dass bei den betrachteten Brandszenarien Vollbrände ausgeschlossen werden, ist die lokale Umgebungstemperatur des Bauteils ausschlaggebend für die Bestimmung der Bauteiltemperatur. Die Erwärmung einer Stahlstütze wird durch das Prinzip der Wärmeleitung beschrieben (siehe auch Kapitel 2.3.3). Für isotrope Materialien wird die Wärmeleitung mathematisch über das *Fourier'sche Wärmeleitungsgesetz* ausgedrückt (siehe Gleichung (2-18)).

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (2-18)$$

$\dot{q}$	Wärmestromdichte (flächenbezogener Wärmestrom)	[W/m <sup>2</sup> ],
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK],
grad T	Temperaturgradient	[K/m].

Die Veränderung des Wärmehaltes eines Bauteils fließt dabei als Wärmestrom durch dessen Hülle in die Umgebung und umgekehrt, jeweils in Richtung des größten Temperaturabfalles. Der Temperaturgradient grad T wirkt der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  entgegen, wodurch sich das negative Vorzeichen in Gleichung (2-18) ergibt. Auf dessen Herleitung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf die Literatur verwiesen.

In [DIN EN1993-1-2:2010] sind zudem vereinfachte Ansätze enthalten, anhand derer der Temperaturanstieg je Zeitintervall in Stahlbauteilen berechnet werden kann. Dabei ist zwischen geschützten und ungeschützten Stahlbauteilen im Innen- und Außenbereich zu differenzieren. Für die vorliegende Fragestellung ist nachfolgend der Ansatz für innenliegende, ungeschützte Stahlbauteile gemäß [DIN EN1993-1-2:2010] beschrieben:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad [K] \quad (2-19)$$

$k_{sh}$	Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt	[-],
$A_m/V$	Profilfaktor des ungeschützten Stahlbauteils	[1/m],
$A_m$	dem Brand ausgesetzte Oberfläche pro Längeneinheit	[m <sup>2</sup> /m],
$V$	Volumen des Bauteils pro Längeneinheit	[m <sup>3</sup> /m],
$c_a$	spezifische Wärmekapazität von Stahl	[J/kgK],
$\rho_a$	Rohdichte von Stahl	[kg/m <sup>3</sup> ],
$\dot{h}_{net,d}$	flächenbezogener Bemessungswert des Nettowärmestroms	[W/m <sup>2</sup> ],
$\Delta t$	Zeitintervall	[s].

### 2.3.7 Sicherheitskonzept im Brandfall

Bei Bauteilbemessungen im Brandfall auf Grundlage von Naturbrandszenarien werden dieselben Anforderungen an die Zuverlässigkeit gestellt, wie bei klassischen Normbrandszenarien. Einer Vergleichbarkeit der geforderten Zuverlässigkeit wird über Sicherheitskonzepte Rechnung getragen. Die ersten Überlegungen dieser Art stammen bereits aus den 1940er und 1950er Jahren des 20. Jahrhunderts (siehe Anhang E). Mittlerweile ist ein Sicherheitskonzept zur Berücksichtigung des Naturbrandes in die aktuellen Normung [DIN EN1991-1-2/NA:2010] mit eingeflossen. Nähere Informationen und Hintergründe zum Eurocode-Sicherheitskonzept werden unter anderem in [Dehne2003], [Hosser2008a], [Hosser2008b], [Weilert2008] und [Hosser2013] gegeben. Der Fokus auf die Stahlbauweise wird diesbezüglich in [Fouad2011] durch [Schaumann2011] gegeben.

Dem semi-probabilistischen Eurocode-Sicherheitskonzept obliegt der folgende Grundgedanke. Bei einer dem Bauordnungsrecht zugrunde liegenden Nutzungseinheit eines Bürogebäudes wird implizit unterstellt, dass die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit

eines Entstehungsbrandes ( $p_1$ ) in dieser Nutzungseinheit mit zunehmender Bezugsgröße ( $A_f$ ) qualitativ ansteigt ( $p_1 \approx a \cdot A_f$ ). Gleichzeitig gelten folgende Annahmen: Die durchschnittliche Größe dieser Nutzungseinheit entspricht dem üblichen Geltungsbereich der Musterbauordnung [MBO2002]. Ferner wird implizit unterstellt, dass die Nutzungseinheit mit nutzungsspezifisch üblichen Brandlasten nach [DIN EN1991-1-2/NA:2010] versehen ist, deren Verteilung überwiegend flächig angenommen wird. Dies ist bei klassischen Büronutzungen üblich.

Wird obiger Risikogrundsatz auf ein Atrium bzw. Foyer eines Bürogebäudes übertragen, so muss konstatiert werden, dass selbst der Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit pro Quadratmeter und Jahr nach Anhang BB gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] mit  $a = 5,9 \cdot 10^{-5}$  für diese spezielle Nutzung noch immer deutlich zu groß erscheint. Denn das Charakteristische eines Atriums oder Foyers ist, dass es unabhängig von der Grundfläche überwiegend von unterdurchschnittlich großen und nicht flächig verteilten Brandlasten geprägt ist. Dieses steht jedoch der Grundannahme des Sicherheitskonzepts über die Größe und Verteilung von Brandlasten in Bürogebäuden entgegen.

Der nutzungsbezogene Pauschalwert des Risikos beträgt gemäß Tabelle BB.3 [DIN EN1991-1-2/NA:2010] für Bürogebäude je Nutzungseinheit  $p_1 = 6,2 \cdot 10^{-3} [a^{-1}]$ . Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit  $a = 5,9 \cdot 10^{-5}$  beträgt, und dass dem Pauschalwert der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes  $p_1$  eine Bezugsgröße von etwa  $100 \text{ m}^2$  zugrunde liegt. Außerdem kann festgestellt werden, dass Brandlasten von Atrien und Foyers im Vergleich zu sonstigen Nutzungen deutlich unterproportional zu deren Bezugsfläche zunehmen, was qualitativ auch für deren Auftretenswahrscheinlichkeiten von Entstehungsbränden festzuhalten ist. Bei einer erforderlichen Zuverlässigkeit im Brandfall  $\beta_{fi}$  wäre daher zu diskutieren, ob der für eine Nutzung im Rahmen des Sicherheitskonzeptes enthaltene Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{fi}$  für die der Brandeinwirkung zugrunde liegenden Auftretenswahrscheinlichkeit ( $a$  bzw.  $p_1$ ) realistisch ist oder zu reduzieren wäre. Dieses erscheint für Nutzungen wie Eingangssituationen in Atrien/ Foyers in Anbetracht der Beobachtungen und Erfahrungen in Kapitel 3 durchaus sinnvoll. In der Literatur finden sich jedoch keine wahrscheinlichkeitstheoretischen Aussagen zur Brandentstehung in Atrien und Foyers. In diesem Zusammenhang wird beispielhaft auf die nachfolgende Versuchsbeobachtung [Wilk2013c] verwiesen. Die Versuchsanordnung einer lokalen Brandlast (hier: „Empfangstresen“) sollte planmäßig über einen Papierkorb in Brand gesetzt werden, was jedoch erst durch mehrfaches Nachzünden gelang (siehe Abbildung 19).

Zündinitial: 1000 g Knüllpapier in einem Papierkorb mit offener Flamme entzündet, Nachzündung in der 7. Prüfminute mit 100 ml Isopropanol

Prüfminute	Versuchsbeobachtungen
1.	Zündung von 1000 g Knüllpapier in einem Papierkorb unterhalb der Schreibtischplatte mit einer offenen Flamme – Zündung von oben
2.	Flammen verlöschen eigenständig
3.	Nachzündung mit einer offenen Flamme - Zündung im unteren Drittel des Papierkorbs
4. - 6.	langsam Ausbreitung des Brandes innerhalb des Papierkorbs, Entflammung der Sitzfläche des Drehstuhls aus Kunststoff
7.	Nachzündung mit 100 ml Isopropanol

Abbildung 20: Auszug aus einem Versuchsbericht von [Wilk2013c]

Ob diese Beobachtung zufällig ist oder ob es möglicherweise einen Zusammenhang mit den Erfahrungen der Feuerwehren gemäß Kapitel 3.7.2 gibt, lässt sich nicht eindeutig sagen. Festzustellen ist, dass diese Tatsache offenbar gut in den Kontext passt. Daher werden die Auswirkungen von reduzierten Auftretenswahrscheinlichkeiten auf die Bemessungsbrandlasten gemäß Sicherheitskonzept im Rahmen einer Sensitivitätsstudie in Kapitel 3.7.3 untersucht.

Um für diese besondere Nutzung statistische Aussagen treffen zu können, wurden Versicherungen und Feuerwehren über Besonderheiten und Erfahrungen mit Atrium- und Foyerbränden in den letzten Jahren respektive Jahrzehnten befragt (siehe Kapitel 3.7). Diesbezügliche Angaben sind auch über wahrscheinlichkeitstheoretische Ansatzpunkte hinaus interessant, beispielsweise für die Validierung von Brandschutzkonzepten. Dabei ist insbesondere interessant, ob die bauordnungsrechtlichen Schutzziele durch die Brandschutzmaßnahmen, die den Brandschutznachweisen im Baugenehmigungsverfahren zugrunde liegen, mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit in der Praxis erfüllt werden. Aus solchen Informationen ließ sich das Bauordnungsrecht validieren und mögliche Reserven oder versteckte Risiken aufdecken.

## 2.4 Mechanische Analyse

### 2.4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die für die Bauteilbemessung im Brandfall erforderlichen Grundlagen erläutert. Im Vorwege der mechanischen Analyse wird kurz auf die

Ermittlung der Stützenquerschnitte und auf die Hochtemperatureigenschaften von Baustoffen eingegangen. Im Anschluss daran wird ein Überblick über konstruktive Möglichkeiten bei der brandschutztechnischen Klassifizierung von Stahlstützen gegeben. Die mechanische Analyse kann anhand des mehrstufigen Bemessungssystems des Eurocodes erfolgen, dessen Grundzüge werden erläutert. Am Ende des Kapitels erfolgen Robustheitsbetrachtungen für Stützen im Brandfall.

### **2.4.2 Stützenbemessung bei Raumtemperatur**

Angesichts von statischen Erfordernissen scheiden bestimmte Baustoffe für die Anwendung bei Atriumstützen materialbedingt bereits aus (siehe auch Kapitel 2.5.3). Aufgrund der erforderlichen Traglasten in Verbindung mit architektonisch erforderlichen Schlankheiten kommen für realistische Stützenbaustoffe lediglich Stahl- bzw. Stahlverbund- und Stahlbetonstützen in Frage. Mauerwerk, Holz oder Aluminium sind daher von untergeordneter Bedeutung (siehe hierzu auch die Umfrageergebnisse in Kapitel 3.6.4).

Der Stand der Erkenntnisse zur Bemessung von Stahlstützen bei Raumtemperatur ist in die vereinfachten und allgemeinen Berechnungsverfahren der Eurocodes [DIN EN1993-1-1] mit eingeflossen. Je nach Querschnittsklasse werden die entsprechenden Spannungs- und Stabilitätsnachweise geführt. Die Grundlagen statischer Nachweise im Stahlbau können der einschlägigen Stahlbauliteratur wie [Pettersen1980], [Roik1983] und anderen entnommen werden und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. In diesem Zusammenhang wird auf die berechneten Beispiele in Kapitel 4 verwiesen.

### **2.4.3 Hochtemperatureigenschaften von Baustoffen**

Infolge von hohen Temperaturen reduzieren sich die Festigkeitseigenschaften von Baustoffen im Brandfall. Je nach gewähltem Baustoff variiert das Erwärmungsverhalten von Bauteilen. Grundsätzlich weisen Betonbauteile ein deutlich langsames Erwärmungsverhalten auf als Stahlbauteile.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die Stahlbauweise gerichtet, da die Fragestellung besonders auf Stahlbauteile abzielt. Das thermomechanische Materialverhalten im Brandfall wird normativ durch die konstitutiven Beziehungen der Eurocodes berücksichtigt. Im Rahmen von vereinfachten Berechnungsverfahren werden diese über temperaturabhängige Abminderungsfaktoren und Knickspannungs-

linien für den Brandfall berücksichtigt. Für die allgemeinen Berechnungsverfahren werden die thermischen (spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und thermischen Dehnungen) sowie die mechanischen Materialkennwerte (Fließgrenze, Elastizitätsmodul und Rohdichte) temperaturabhängig beschrieben. Die Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Stahl im Hochtemperaturbereich gehen auf [Schaumann1984] zurück. Mit dem Fokus auf Stahlstützen im Brandfall wird diesbezüglich auf einen wesentlichen Sachverhalt hingewiesen: Die Fließgrenze von Baustahl sinkt gemäß [DIN EN 1993-1-2] erst ab einer Temperatur von 400 °C. Der Elastizitätsmodul von Stahl reduziert sich bereits ab 100 °C. Daher gilt das vereinfachte Nachweisverfahren mittels *Kritischer Temperatur* nach Abschnitt 4.2.4 von [DIN EN 1993-1-2] auch nicht, sofern Verformungskriterien oder Einflüsse aus Stabilitätsproblemen zu beachten sind.

Da die Grundlagen zum Hochtemperaturverhalten von Stahl- bzw. Stahlverbundbauteilen bereits in der Literatur ausführlich erläutert wurden, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, den Stand der Erkenntnisse diesbezüglichen noch einmal ausführlich darzulegen. Stattdessen sei auf [DIN EN 1993-1-2], [Franssen2010], [Hass1994] sowie die Beiträge von Schaumann in [Fouad2011], [Hosser2012] und [Kuhlmann2014] oder auch vom Verfasser selbst [Cohrs2003] verwiesen. Für Stahlbetonbauteile gilt dies analog. Siehe dazu [DIN EN 1992-1-2], [Kordina1999] und die Beiträge von Richter in [Fouad2011], [Hosser2012] und [Richter2009] sowie auch vom Verfasser selbst [Cohrs2008].

#### **2.4.4 Konstruktiver Brandschutz von Stahlstützen**

Stahlstützen mit einem klassifizierten Feuerwiderstand gibt es entweder als geregelte Bauart nach Norm oder produktbezogen mit entsprechendem Verwendbarkeitsnachweis. Da ungeschützte Stahlbauteile in Abhängigkeit von der Lastausnutzung und der Massigkeit nur einen Feuerwiderstand von ungefähr 10-15 Minuten nach der ETK aufweisen [Hass1994], erfolgt die Klassifizierung entweder in Kombination mit anderen Baustoffen als Stahlverbundstütze oder über Bekleidungen mit Putzen, Betonen oder Mauerwerk (historisch) sowie über kastenförmige oder profolfolgende Ummantelungen. Eine weitere Variante ist die der Beschichtung in Form von intumeszierenden Anstrichen (Dämmschichtbildner), die als reaktives System funktionieren. Der Anstrich quillt im Brandfall auf und bildet eine wärmedämmende Schutzschicht (siehe auch [Tabeling2014]). Dabei ist zu berücksichtigen, dass für eine feuerbeständige Ausführung je nach Profil eine Schichtdicke von bis zu 7500 µm



erforderlich werden kann. Je Arbeitsgang können etwa 300-500  $\mu\text{m}$  aufgebracht werden, was mehr als 15 Arbeitsgänge bedeuten kann. Als moderner Sonderfall der Beschichtung gelten Bandagen, welche bei gleicher Funktionsweise einfacher verarbeitet werden. Bei geschlossenen Querschnitten, wie Rohrprofilen, werden mit Bandagen im Vergleich zu Anstrichen nur 3-4 Schichten à 1-2 mm erforderlich. Einen seltenen Sonderfall stellen wassergekühlte Systeme dar. Die Bauteile fungieren dabei selbst als Behälter für das Kühlmedium und werden durchströmt und so im Brandfall gekühlt [Hass1995].

### 2.4.5 Stützenbemessung im Brandfall

Das 3-stufige Nachweissystem der Eurocodes gilt auch für den Brandschutznachweis von Stahlstützen [DIN EN1993-1-2]. Da ungeschützte Stahlbauteile alleine keinen klassifizierten Feuerwiderstand aufweisen, gibt es den Nachweis in der Stufe 1 mittels tabellarischer Daten nur in passiver Form gemäß Kapitel 2.4.4. Die Nachweisstufe 2 entspricht den vereinfachten Berechnungsverfahren mit entsprechenden vereinfachten und vereinfachenden Annahmen, wie unter anderem einer konstanten Querschnittstemperatur. Damit besteht die Möglichkeit, den Nachweis über die Unterschreitung der sogenannten *kritischen Temperatur* zu führen. Sofern Bauteile verformungs- oder stabilitätsgefährdet sind, ist der Nachweis auf Tragfähigkeitsebene zu führen, wodurch neben der reduzierten Festigkeit auch die reduzierte Steifigkeit berücksichtigt wird (siehe dazu auch [Somaini2012]). Das allgemeine Berechnungsverfahren (Stufe 3) wird anhand einer numerischen Simulation mit einer thermischen und mechanischen Analyse geführt. Das Bemessungsziel kann dabei je nach Fragestellung eine bestimmte Versagenszeit, eine bestimmte Traglast oder eine Maximaltemperatur sein. In Abbildung 21 ist eine qualitative Gegenüberstellung von verschiedenen Methoden der Bauteilbemessung im Brandfall dargestellt. Nach der Grundphilosophie der Bauteilbemessung im Brandfall steigt mit zunehmender X- als auch Y-Richtung neben dem Bemessungsaufwand auch die Wirtschaftlichkeit des Ergebnisses. Für Stützen gilt dieses jedoch nur bedingt, da in wirtschaftlich bemessenen Tragwerken für den Ausfall von vertikalen Haupttraggliedern keine Lastumlagerungsmöglichkeiten vorhanden sind, siehe hierzu auch die Robustheitsbetrachtungen in Kapitel 2.4.6. Dadurch führt eine Teil- oder Gesamttragwerkbetrachtung zu keiner signifikanten Steigerung der Tragfähigkeit im Brandfall. Für die Aktivierung möglicher Systemreserven von Stahlstützen im Brandfall kommt den verschiedenen Naturbrandszenarien daher eine besondere Bedeutung zu.

Die Grundlagen der einzelnen Nachweisverfahren zur Stützenbemessung im Brandfall werden im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt.

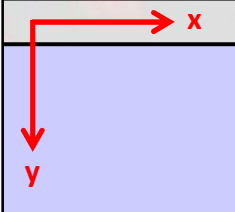
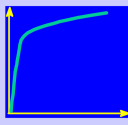
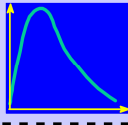

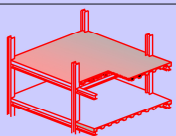
	Normativ	Nutzungsabhängig
	Normbrand 	Naturbrand 
	Klassifizierung	Brandschutz-ingenieurwesen
	Brandschutz-ingenieurwesen	Brandschutz-ingenieurwesen

Abbildung 21: Qualitative Gegenüberstellung von verschiedenen Methoden der Bauteilbemessung im Brandfall nach [Cajot2005]

Für nähere Informationen und Hintergründe wird daher auf die Literatur verwiesen (siehe [DIN EN 1993-1-2], [Franssen2010], [Hass1994] sowie die Beiträge von Schaumann in [Fouad2011], [Hosser2012] und [Kuhlmann2014]).

#### 2.4.6 Robustheit im Brandfall

Dem baustatischen Grundsatz zufolge sind kinematische Ketten in der Tragwerksplanung zu verhindern. Bauwerke unterliegen grundsätzlichen Robustheitsanforderungen, welche besagen, dass der lokale Ausfall eines Bauteils nicht zum Totalversagen des Gesamttragwerkes führen darf [DIN EN1990:2010]. Die Robustheit ist nach [DIN EN1991-1-7:2010] definiert als die Eigenschaft eines Tragwerkes, ein außergewöhnliches Ereignis, wie einen Brand, so zu überstehen, dass keine Schäden entstehen, die nicht im Verhältnis zur Schadensursache stehen. Das bedeutet, Schädigungen am Tragwerk dürfen akzeptiert werden, sofern nachgewiesen werden kann, dass die Gesamttragfähigkeit erhalten bleibt und die notwendigen Sicherungsmaßnahmen (beispielsweise durch die Feuerwehr) durchführbar sind. In Abhängigkeit von der Grundfläche, der Höhe und der Nutzung werden im Nationalen Anhang zu [DIN EN1991-1-7:2010] Versagensfolgeklassen definiert, vergleichbar mit den bauordnungsrechtlichen Gebäudeklassen. Für die sogenannte obere Risikoklasse

innerhalb der Schadensfolgeklasse 2, welche gemäß [MBO2002] der Gebäudeklasse 5 entspricht, ergibt sich, dass vertikale Tragglieder bei Überschreitung des Schadensmaßes als Haupttragelement im Sinne von [DIN EN1991-1-7:2010] auszubilden sind. Als solches sind Foyerstützen für außergewöhnliche Einwirkungen auszulegen, da sie die Stabilität des gesamten Tragwerks beeinflussen und ihr Versagen demgemäß nicht akzeptabel ist. Zur Berücksichtigung des Lastfalles Brand bedeutet dies, dass die Stützen entweder einen entsprechenden, klassifizierten Feuerwiderstand aufweisen oder andere Maßnahmen zur Risikominimierung nach Anhang B.6 gemäß [DIN EN1991-1-7:2010] ergriffen werden müssen. Feuerlöschanlagen werden hierfür als eine Möglichkeit der Risikominimierung angesehen. Diese werden in der Praxis zur Kompensation einer zu geringen Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen eingesetzt. Alternativ muss das Risiko für das Haupttragglied auf anderem Wege reduziert werden und ein Versagen dieses Bauteils verhindert werden. Dafür wird die Bemessungssituation im Rahmen dieser Arbeit genau untersucht.

Das Thema Robustheit ist mittlerweile auch in die Brandschutzforschung eingeflossen. Die Mitwirkung von Gesamttragwerken im Brandfall, wie sie bei Robustheitsbetrachtungen unter anderem von [Zanon2010], [Fang2011], [Agarwal2012] und [Garlock2012] in den Fokus der Forschung rückt, hat jedoch für Foyerstützen eine scheinbar untergeordnete Bedeutung. Das Charakteristische an Atrien und Foyers ist häufig, dass die Stützen die Architektur und das Raumgefühl so wenig wie möglich beeinträchtigen sollen. Die meistens sehr schlanken Stützen werden ästhetisch und wirtschaftlich so dimensioniert, dass sie nicht in der Lage sind, zusätzliche Lasten aus einer ausgefallenen Stütze im Sinne eines vertikalen Haupttraggliedes abzutragen. Vertikale lastabtragende Bauteile können sich, anders als Balken- und Deckenelemente, daher häufig nicht in Nachbarfelder im Sinne einer Membrantragwirkung einer Decke einhängen. Somit weisen die angrenzenden Balken-Deckenfelder um eine Stütze herum nicht ausreichend Tragreserven auf, um die vertikalen Lasten des Gebäudes abzufangen und zu den Nachbarstützen umzulagern. Wird das Abfangen eines vertikalen Haupttraggliedes im Ausnahmefall einmal planmäßig erforderlich, so wird deutlich, welcher unverhältnismäßig große Aufwand für eine Realisierung erforderlich wird. Fachwerkkonstruktionen begünstigen dabei die Lastumlagerung. Unter diesen Randbedingungen erscheint es durchaus sinnvoll, Foyerstützen nur als Einzeltragglied gemäß Eulerfall 2 (Pendelstütze) zu betrachten. Deren Ausfall erscheint insbesondere in Atrien und Foyers statisch nicht darstellbar. Bezüglich der Lagerungsbedingungen im Brandfall siehe Kapitel 4.5.1.

## 2.5 Spezielle Nutzung: Atrium als Foyer

### 2.5.1 Besonderheiten der Nutzung

Mit den Begriffen *Eingangshalle* und *Foyer* wird ein separater, besonderer Eingangsbereich eines Gebäudes benannt, wobei dessen Größe von untergeordneter Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang wird auch häufig der Begriff *Lobby* verwendet. Als *Lobby* wird ursprünglich die Wandelhalle eines britischen oder amerikanischen Parlamentsgebäudes bezeichnet. *Lobby* ist heutzutage eher als Synonym für Eingangshalle oder Foyer gebräuchlich, jedoch oftmals in Verbindung mit Hotels. Ein *Atrium* beschreibt in diesem Zusammenhang eine entsprechend große, nach oben offene Eingangshalle oder einen lichtdurchfluteten Innenhof. Die Nutzung eines Atriums ist grundsätzlich nicht auf Eingangsbereiche oder Durchgangsräume festgelegt. Atrien sind nutzungsunabhängig auch bei Einkaufszentren, Versammlungsstätten oder Flughäfen vorzufinden. Dort sind sie jedoch nicht unbedingt auf brandlastarme Eingangssituationen bezogen, so wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden. In Verbindung mit Eingangshallen und Foyers unterstreichen Atrien daher die Besonderheit dieser speziellen Gebäudebereiche.

Je nach der Größe und der Bedeutung eines Gebäudes wird dessen Eingangsbereich architektonisch besonders hervorgehoben, wobei ein Foyer als allgemeine Erschließungszone entsteht. Die Art und die Größe eines Foyers betonen den Charakter und die Bedeutung eines Gebäudes. Mit ansteigender Größe wird dieser Bereich architektonisch immer wesentlicher. Das heißt, es wird zunehmend mehr Fläche sowie auch mehr Raumhöhe generiert, teilweise auch aus anderen Geschossen. Mit einem hohen Anspruch an die Architektur der Eingangshallen von besonderen Büro- und Verwaltungsgebäuden geht auch oft der Wunsch nach einer schlanken, ungeschützten, sichtbaren Stahlbauweise als ästhetisches Gestaltungsmittel einher. Das Atrium nimmt die Rolle eines Aushängeschildes des Gebäudes ein und stellt sich oftmals als Bindeglied zwischen drinnen und draußen dar. Die architektonischen Anforderungen werden in Atrien auch an deren Stützen gestellt, ob im Bereich der Fassade oder bei größeren Foyers auch mitten im Raum (siehe auch Abbildung 22).

Weiterhin wird über diese Bauteile oftmals der gesamte vertikale Lastabtrag des aufgehenden Gebäudes gewährleistet, auch im Brandfall. Zudem werden über diese Räume häufig die Gebäudeteile mit den Aufenthaltsräumen wie Büros oder Wohnungen erschlossen. Auch die Flucht- und Rettungswege des Gebäudes führen teilweise über die Foyers. Dabei stellt sich auch die Frage nach der bauordnungs-

rechtlichen Einstufung dieser Nutzung und damit einhergehend auch die Frage nach den Brandschutzanforderungen, was in Kapitel 2.2.1 ausführlich diskutiert wurde.



Abbildung 22: Stahlstützen in den Atrien von *Skygarden* (links, © CA Immobilien) und der *HDI-Zentrale* (rechts, © Esch) mit freundlichen Genehmigungen der Rechteinhaber

### 2.5.2 Typische Geometrien

In Deutschland bestehen in Bezug auf die geometrischen Verhältnisse zur Grundrisstiefe oder zur Geschosshöhe von Gebäuden keine grundsätzlichen Vorgaben. Das gilt insbesondere für spezielle Gebäudeteile wie Eingangshallen, Atrien oder Foyers, welche nicht in allen Regelgeschossen vorhanden sind. An Aufenthaltsräume werden gemäß [MBO2002] über die allgemeinen und funktionalen Anforderungen (wie Mindesthöhe, Belichtung und Belüftung) hinaus, ebenfalls keine architektonischen Anforderungen gestellt. Die allgemeinen Grundrissanforderungen von Büro- und Verwaltungsbauten ergeben sich aus dem geplanten Bürokonzept. Klassische Zellen- oder Gruppenbüros bedingen beispielsweise eine geringere Grundrisstiefe als Kombibüros oder Open-Space-Büros [Neufert2012]. Demgegenüber stehen statische, bauphysikalische und nicht zuletzt wirtschaftliche Aspekte, welche den Grundriss beeinflussen. Daraus ergeben sich gewisse Mindest- als auch Maximalabmessungen der Gebäudetiefe. Sind zudem Garagengeschosse im Gebäude vorgesehen, wird das Stützenraster noch zusätzlich von Stellplatzanforderungen beeinflusst. Die Architektur von Foyers hingegen ergibt sich lediglich aus den ästhetischen Vorlieben sowie dem Budget des Bauherrn. Für die Herstellung eines großzügigen Raumgefühls besteht häufig das Bestreben, ein Foyer im Innenraum stützenfrei herzustellen. In Relation zur

Grundfläche des Eingangsbereiches sind daher überwiegend nur Randstützen oder Fassadenstützen vorhanden.

Aufgrund der Besonderheit und Individualität, die mit diesem partiellen Gebäudebereich verbunden sind, fällt es daher schwer, ad-hoc bestimmte Kategorien von Eingangshallen, Atrien oder Foyers abzuleiten. Ein deutscher oder europäischer Datenfundus hinsichtlich typischer Abmessungen von Atrien und Eingangssituationen wurde in der Literatur nicht vorgefunden. Die einzigen statistischen Daten hinsichtlich der Geometrien von Atrien beziehen sich auf Hochhäuser von Banken innerhalb Hong Kongs. Dabei wurde die prozentuale Verteilung von Hochhäusern mit einer Atriumhöhe größer oder kleiner als 40 m erfasst [Chow1993]. Deren Übertragbarkeit auf europäische respektive deutsche Verhältnisse ist jedoch zu bezweifeln. Andere Veröffentlichungen zu Atrien fokussieren überwiegend architektonische und innenarchitektonische Schwerpunkte. Dabei geht es entweder um übergeordnete Entwurfsgrundsätze, wie in [Schwehr2005] oder der Fokus wird auf Themen wie die Tageslichtausbeute gerichtet (wie in [Hung2003] oder [Schmitz2003] (siehe auch Abbildung 23).

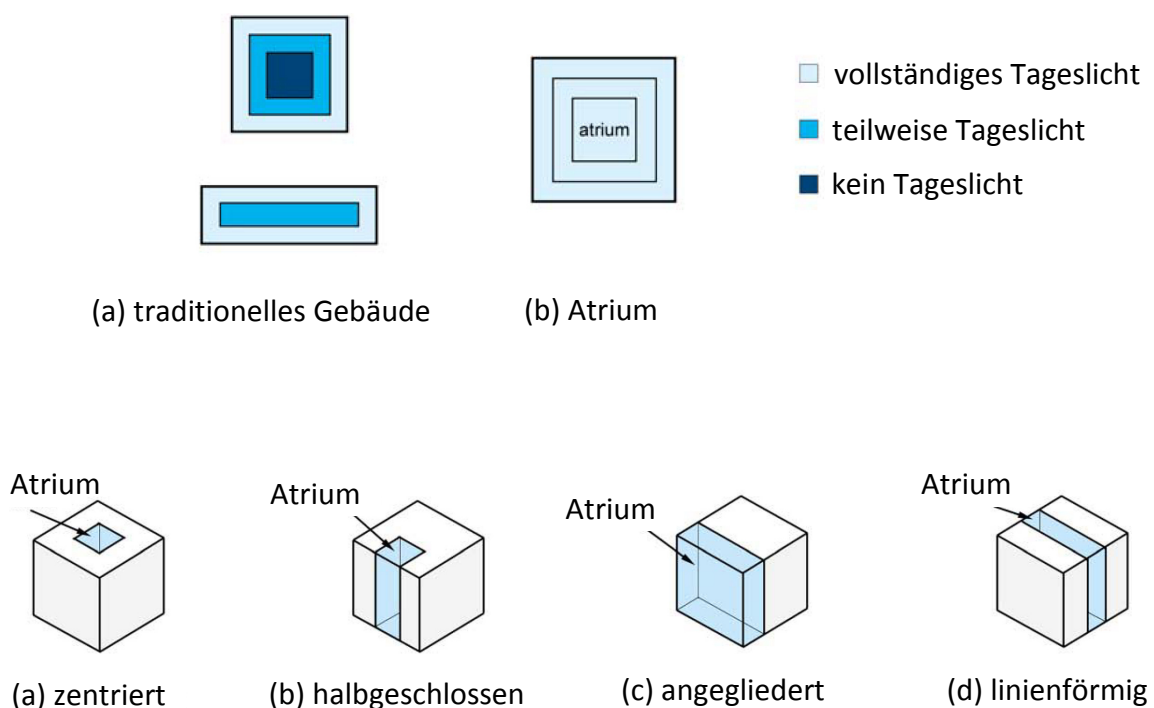


Abbildung 23: Entwurfsgrundsätze zum gezielten Einsatz von Atrien zur Verbesserung der Tageslichtverhältnisse bei bestimmten Grundrissen nach [Hung2003]

In der schweizer Veröffentlichung [VKF2003b] wird ebenfalls eine gewisse Kategorisierung von Atrien vorgenommen, wie aus Abbildung 24 ersichtlich ist. Jedoch wird auch hier auf die Schwerpunkte Rettungswege sowie Raumabschluss der angrenzenden Geschosse und entsprechende Rauchabzugsmöglichkeiten eingegangen. Zu tragenden Bauteilen werden keine Aussagen getroffen. Gleiches gilt für die Veröffentlichung [Bastings1988] (siehe Abbildung 25).

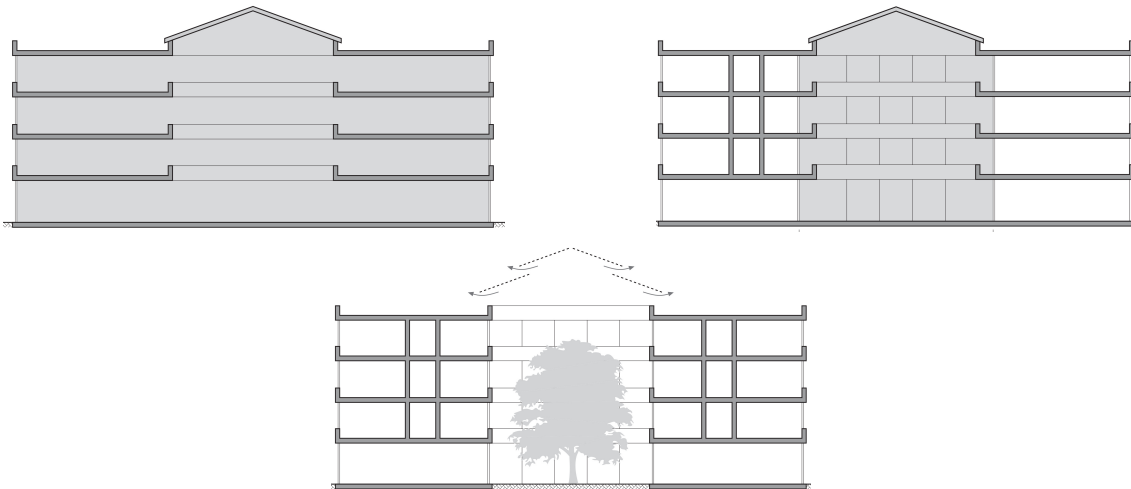


Abbildung 24: Überdachtes Atrium mit und ohne Brandabschnittsbildung in den Geschossen sowie ein oben offenes Atrium aus [VKF2003b]

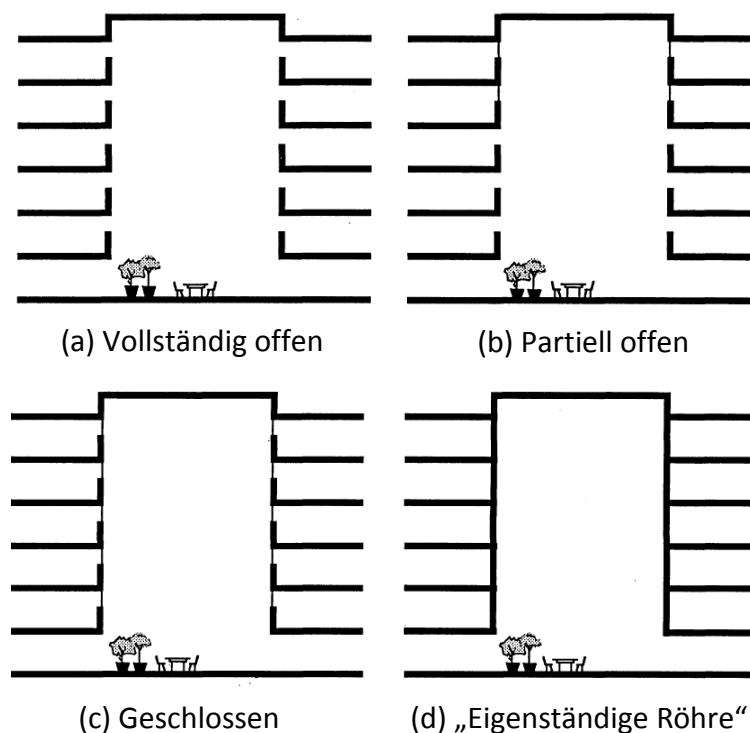


Abbildung 25: Verschiedene Ausbildungen eines Atriums nach [Bastings1988]

Aus den persönlichen Erfahrungen aus der Berufspraxis des Verfassers ergeben sich einige wiederkehrende Fakten, woraus sich gewisse Kategorien von Eingangssituationen ableiten lassen:

**Kategorie 1, kleines Foyer:** Diese Kategorie zeichnet sich dadurch aus, dass im Erdgeschoss eines aufgehenden Gebäudes ein abgeschlossener Bereich für die Eingangssituation reserviert wird, welche jedoch auf das Erdgeschoss beschränkt bleibt. Bereits das darüber liegende Geschoss weist hier wieder den Regelgeschossgrundriss auf. Bei dieser Variante geht für die repräsentative Eingangszone nur ein geringer Anteil an Nutzfläche in nur einem Geschoss verloren. Die Stützen des Atriums/ Foyers tragen die Lasten aus allen Geschossen des aufgehenden Gebäudes als Haupttragglied (siehe Abbildung 29).

**Kategorie 2, mittelgroßes Foyer:** Diese Kategorie unterstreicht die Besonderheit eines Gebäudes zusätzlich mit einer entsprechend großzügigen Höhengestaltung. Einzelne Bereiche im Grundriss des aufgehenden Gebäudes werden ausgespart, damit das Foyer über einen gewissen Bereich beispielsweise über zwei bis drei Geschosse durchläuft. Zugunsten eines einladenden Foyers mit großzügigem Raumgefühl geht auch in den oberen Geschossen Nutzfläche verloren. Durch die geschossübergreifende Ausbildung des Foyers vergrößert sich die Knicklänge der Stützen. Die Auflast der Stützen resultiert aus den darüber liegenden Regelgeschossen (Haupttragglied).

**Kategorie 3, großes Foyer, Atrium:** Diese Kategorie kommt beispielweise bei großen Firmenzentralen wie bei Abbildung 22 zum Einsatz. Ein separater, häufig eingeschossiger Gebäudeteil wird dabei geschaffen, welcher an aufgehende, mehrgeschossige Gebäudeteile anschließt. Über dieses Atrium wird häufig die Belichtung und Erschließung der angrenzenden Gebäudeteile gewährleistet. Je nach der Nutzung dieses sehr großzügigen Foyers und der Tatsache, ob Rettungswege hindurch verlaufen, ergeben sich jeweils unterschiedliche Anforderungen an den Brandschutz. Die schlanken Stützen eines Atriums weisen eine sehr große Knicklänge mit relativ geringen Auflasten aus der Dachkonstruktion auf (siehe Abbildung 30).

Bei dieser vorgenommenen Einteilung ist der Fokus auf die Bemessung der tragenden Bauteile gerichtet. Auch Stützen von Atrien gemäß Abbildung 25 lassen sich in diese Kategorien eingruppiert. Entweder handelt es sich um freistehende, hohe eingeschossige Stützen oder um Stützen am Rand in der Fassade mit entsprechender



ein- oder mehrgeschossiger Knicklänge, wie Abbildung 26 verdeutlicht. Diesbezüglich wurden statistische Daten für Deutschland erhoben, siehe Kapitel 3.

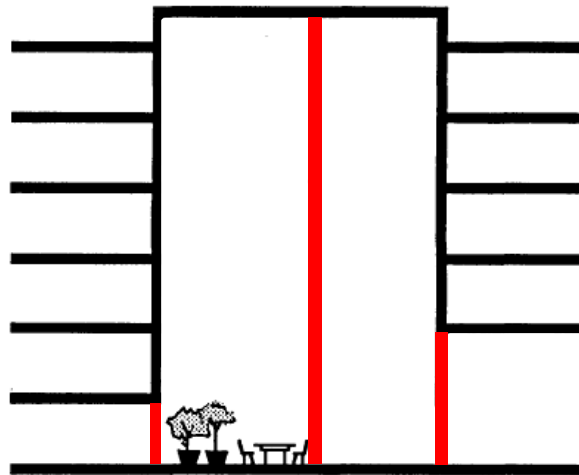


Abbildung 26: Denkbare Stützenpositionen und qualitative Stützenlängen in Atrien und Foyers in Anlehnung an [Bastings1988]

### 2.5.3 Statische Systeme von Stützen in Geschossbauten

Für die Situation einer lokalen Brandbeanspruchung in einem Atrium respektive einer typischen Foyersituation eines Büro- und Verwaltungsgebäudes ergeben sich in Abhängigkeit des statischen Systems bestimmte Charakteristika, welche Abbildung 28 entnommen werden können. Dort sind mögliche statische Systeme für Stützen gegenübergestellt. Für Kragstützen (Eulerfall 1), Pendelstützen (Eulerfall 2) und Rahmenstützen (Eulerfall 3 bzw. 4, wenn der Fußpunkt eingespannt ist) werden die Lagen der maßgebenden mechanischen und thermischen Beanspruchungen bei einem lokalen Brand miteinander verglichen. Die Lage der thermischen Einwirkung ist hier nur auf lokale Brände bezogen.

Die thermische Einwirkung wäre bei einem klassischen Vollbrandszenario wie der ETK auf der gesamten Stützhöhe anzuordnen (siehe Abbildung 27, links). Bei einem entwickelten Brand mit der Ausbildung einer Heißgasschicht befände sich die maßgebende thermische Einwirkung einer Stütze außerhalb des Brandnahbereiches entsprechend im oberen Stützenabschnitt (siehe zur Verdeutlichung Abbildung 27, Mitte). Für lokale Brände, wie hier behandelt, liegt die maßgebende thermische Beanspruchung am Fußpunkt der Stütze (siehe Abbildung 27, rechts).

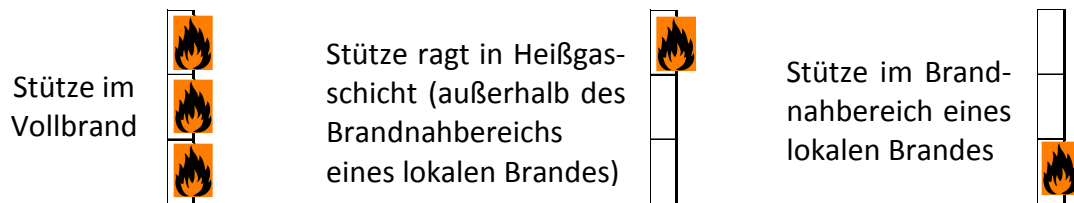






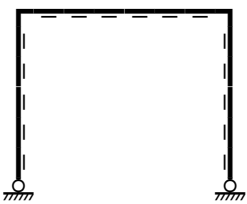

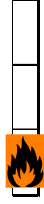


Abbildung 27: Alternative bauteilbezogene Positionen der maßgebenden thermischen Einwirkung in Abhängigkeit des Brandszenarios

Augenscheinlich ungünstig für diese brandschutztechnische Betrachtung ist die Kragstütze, da die maßgebende mechanische Beanspruchung mit der Lage der thermischen Beanspruchung bei einem unterstellten, lokalen Brand zusammenfällt. Außerdem ist die Steifigkeit bei einer Aussteifung über Kragstützen und Verbände bei einer wirtschaftlichen Bemessung mit zunehmender Höhe im Vergleich zu Stahlbetontreppenhauskernen relativ gering. Daher findet die Kragstütze in Deutschland überwiegend im Hallenbau bei nicht ausgesteiften Gebäuden ihre Anwendung, so dass ihre Bedeutung im Geschossbau von Büro und Verwaltungsgebäuden von rein akademischer Natur ist.

Ähnlich sieht es mit der Aussteifung von Geschossbauten mittels rahmenartiger Systeme aus. Damit sich eine Rahmenwirkung einstellt, sind gewisse Riegel-Stiel-Verhältnisse erforderlich, welche besonders bei hohen Gebäuden häufig zu unwirtschaftlichen Riegelquerschnitten führen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass in Bürogebäuden ohnehin mindestens ein notwendiger Treppenraum erforderlich ist. Wird dieser in Stahlbetonbauweise errichtet, zieht er aufgrund seiner großen Steifigkeit die Lasten vorrangig an. Damit erübrigt sich das Ausbilden eines verhältnismäßig aufwendigen Rahmens, welcher im Vergleich zu einem Stahlbetonkern über eine geringere Steifigkeit verfügt. Die Vorzüge der Bauart *Aussteifung über Rahmen* kommen daher häufig bei niedrigeren, nicht ausgesteiften Gebäuden, wie beispielsweise im Hallenbau, zur Geltung. Der positive Effekt, dass die maßgebende mechanische Beanspruchung nicht mit der thermischen Beanspruchung zusammenfällt, relativiert sich bei der Stabilitätsbetrachtung unter Raumtemperatur wieder.

Bei ausgesteiften Gebäuden sind Pendelstützen möglich und wirtschaftlich. Da die Gebäudeaussteifung im Geschossbau überwiegend über Treppenhauskerne, Wand- und Deckenscheiben realisiert wird, werden die Pendelstützen horizontal über diese Deckenscheiben gehalten. Bis auf kleinere Kopfmomente bei unterschiedlich großen Feldern erhalten die Stützen überwiegend Normalkräfte, weshalb es sich bei der Bemessung häufig um ein überwiegend axial beanspruchtes Bauteil handelt.

Statisches System	Lage der maßgeb. mechanischen Beanspruchung *1)	Lage der thermischen Beanspruchung *2)
 <p>Kragstütze</p>	 <p>unteres Drittel (Fußpunkt)</p>	 <p>unten</p>
 <p>Pendelstütze</p>	 <p>mittleres Drittel (Stützenmitte)</p>	 <p>unten</p>
 <p>Rahmenstütze</p>	 <p>oberes Drittel (Rahmenecke)</p>	 <p>unten</p>

\*1) bei Annahme hochbauüblicher Lasten bzw. entsprechender Riegel-Stielverhältnisse

\*2) bei Annahme einer überwiegend lokalen Brandbeanspruchung im Atrium/ Foyer

Abbildung 28: Synopse über statische Systeme und die Lage der maßgebenden mechanischen sowie thermischen Beanspruchungen infolge eines lokalen Brands

Die Stützen sind als vertikales Primärtragglied überdrückt, so dass nur die Normalkraft signifikanten Einfluss bewirkt, welche über die Stütze innerhalb eines Geschosses konstant ist. In Bezug auf Abbildung 28 wirkt sich der positive Effekt jedoch nur rein qualitativ aus. Die Tatsache, dass die maßgebende thermische Einwirkung örtlich nicht zusammen mit der maßgebenden mechanischen Einwirkung wirkt, hat keinen

nennenswerten Einfluss. Die Knicklängen der Stützen lassen sich in Anlehnung an die Kategorisierung von klassischen Atrien und Foyers in Kapitel 2.5.2 entsprechend typisieren (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).

**Kategorie 1:** Eingeschossiges Foyer  
in höheren Bürogebäuden (Gk5)  
oder Hochhäusern idealisiert als  
Pendelstütze

**Kategorie 2:** Mehrgeschossiges Foyer  
in höheren Bürogebäuden (Gk5)  
oder Hochhäusern idealisiert als  
Pendelstütze

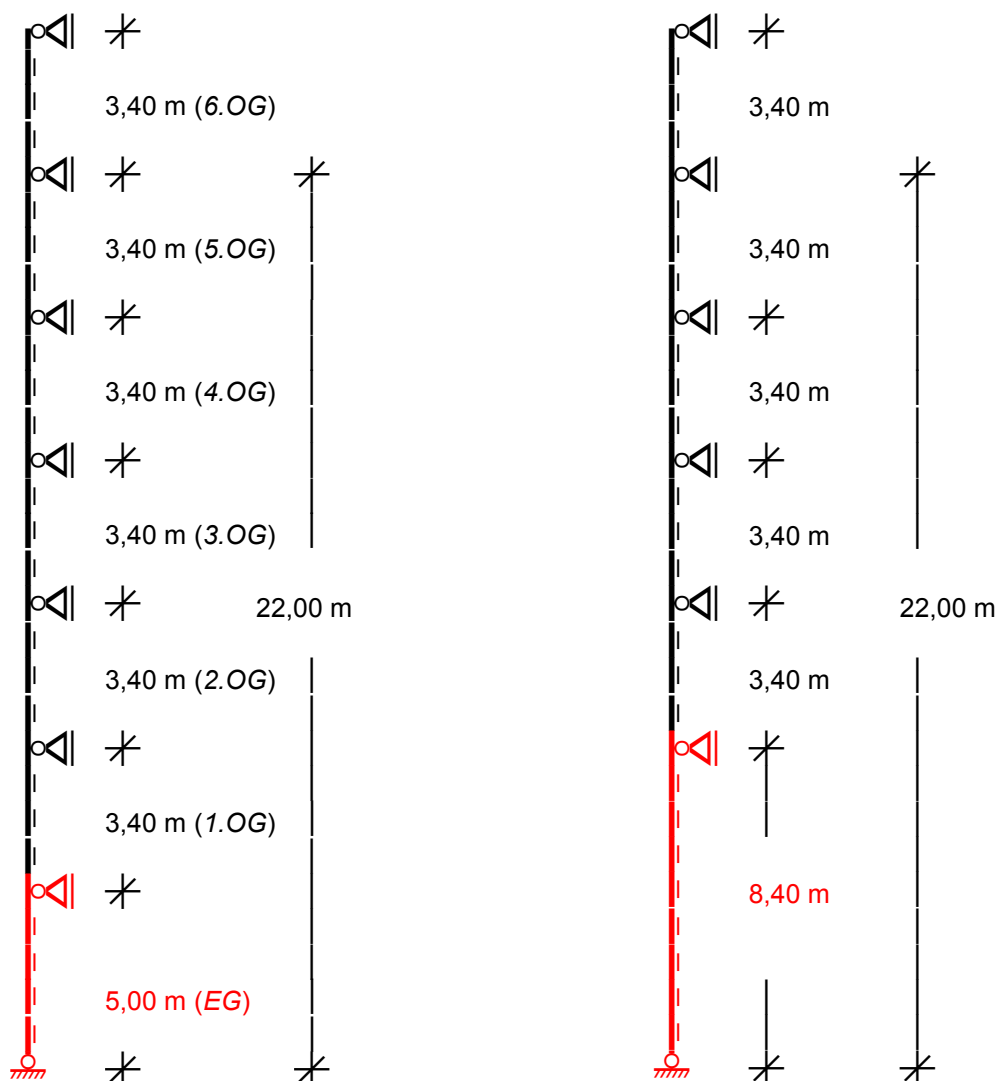


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Stützensystems von ein- und mehrgeschossigen Foyers

**Kategorie 3:** Separates Atrium als eigenständiger, in der Regel eingeschossiger Gebäudeteil zwischen aufgehenden Gebäudeteilen idealisiert als Pendelstütze

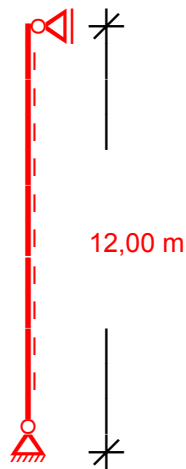


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Stützensystems eines eingeschossigen Atriums

Zusammenfassend sind Geschosstützen, idealisiert als Pendelstützen, daher die typische Stützenform, die überwiegend im Geschossbau und damit verbunden in Foyers eingesetzt werden. Daher ist es sinnvoll, diese als Pendelstützen zu bemessen. In Bezug auf die Gültigkeit der Annahme einer gelenkigen Lagerungsbedingung der Pendelstütze wird auf Kapitel 4.5.1 verwiesen.

#### 2.5.4 Brandlasten in Eingangssituationen

Beim Verbrennen eines Stoffes wird eine bestimmte Wärmemenge frei. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist die bei einem Brand freigesetzte Energie. Diese sogenannte *Verbrennungswärme* beschreibt die Wärmemenge, die bei der Verbrennung von einem Kilo des jeweiligen Stoffes erzeugt wird und wird in [MJ/kg] respektive in [kWh/kg] ausgedrückt. In älteren Veröffentlichungen wird für die Brandlast die Einheit [kcal/kg] verwendet. Die Brandlastdichte bezeichnet entsprechend die gesamte Wärmemenge, die bezogen auf eine Flächeneinheit vorhanden ist, und wird in [MJ/m<sup>2</sup>] angegeben. Dabei wird zwischen einem Stoff mit Wassergehalt, dem *Brennwert* (früher „oberer Heizwert“) und einem Stoff ohne Wassergehalt, dem *Heizwert* (früher „unterer Heizwert“) unterschieden. Letzterer ist für den Brandfall maßgebend, da Temperaturen im Brandfall stets über der Verdampfungstemperatur von Wasser liegen. Bei der vollständigen Verbrennung von Stoffen (die Wasser enthalten) gibt der Brennwert die gesamte Wärmemenge an, die frei wird, inkl. der im Wasserdampf der Abgase gebundenen Wärme. Der Heizwert ist

bei solchen Stoffen niedriger, da er sich nur auf die freiwerdende Wärme bezieht, ohne die im Wasserdampf der Abgase enthaltene Wärmemenge. Als Beispiel sei frisch geschlagenes Kaminholz zu nennen, welches auf Grund seines noch hohen Feuchtigkeitsgehaltes einen niedrigen Heizwert von etwa 10 MJ/kg aufweist. Wird dieses Holz entsprechend getrocknet, steigt der Heizwert ungefähr auf 16 MJ/kg. In Übereinstimmung zu Kapitel 2.3.2 ist die Brandlast die Summe der Heizwerte aller mobilen und immobilen, brennbaren Stoffe und Baustoffe in einem Raum – die Brandlastdichte entspricht diesem Wert bezogen auf die Grundfläche. Holzbauteile, Installationsgeräte und Leitungen gehören ebenso zur Brandlast wie Einrichtungsgegenstände und Fußbodenbeläge. Die Verteilung von Brandlasten in Gebäuden üblichen Hochbaus ergibt sich überwiegend aus deren Nutzung. Die Brandlast wird insbesondere im Brandschutz stets mit ihrer anzustrebenden Minimierung verbunden. Pauschal lässt sich konstatieren, dass Räume, die dem Aufenthalt von Personen dienen, in der Regel deutlich höhere Brandlasten aufweisen als Räume, die keine Aufenthaltsräume darstellen, wie Durchgänge, Flure, Treppenträume und Foyers im Sinne von Eingangshallen. Eine Ausnahme hierzu stellen Lagerräume und Archive dar, die ebenfalls keine Aufenthaltsräume darstellen, wohl aber signifikante Brandlasten aufweisen. Insbesondere wenn Rettungswege durch oder über Räume führen, ergeben sich formal zur Erfüllung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele nach §14 [MBO 2002] Anforderungen an die Brandlastfreiheit. Bei der brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen wird dieses auf der sicheren Seite liegend, standardmäßig nicht berücksichtigt.

Die Ermittlung einer Brandlast wurde in Kapitel 2.3.2 beschrieben und erläutert. Die Schwierigkeit besteht im Vorwege darin, bei noch nicht bestehenden Gebäuden, eine auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der Brandlasten für die geplante Nutzung vorzunehmen. Gleiches gilt auch für die Plausibilität der Anwendbarkeit von statistischen Brandlastdichten. Mit bauaufsichtlicher Einführung der Eurocodes im Jahre 2012 ist das nutzungsspezifische Differenzieren von Brandlasten sowie deren Berücksichtigung bei der Bauteildimensionierung in Ausnahmefällen möglich. Normativ geregelte Brandlastdichten in Abhängigkeit von der Nutzung können der Tab. BB.1 des nationalen Anhangs [DIN EN 1991-1-2/NA] entnommen werden, siehe nachfolgend Tabelle 1.

Da diese Brandlasten stark voneinander differieren, ergibt sich zwangsläufig die Anforderung, dass bei Änderungen der Raumnutzung und damit der zugrundeliegenden Brandlastdichten in der Regel eine neue Beurteilung hinsichtlich des Brandschutzes erforderlich ist, [DIN EN 1991-1-2/NA]. Gleichzeitig ergibt sich hierbei

die Frage, wie mit Nutzungen zu verfahren ist, die hier nicht enthalten sind. Eingangssituationen wie Foyers sind, sofern sie nicht zusätzlich noch einer anderen Nutzung wie zum Beispiel einer Versammlungsstätte zuzuordnen sind, hier nicht explizit aufgeführt. Entweder erfolgt die Bemessung über die ETK oder es erfolgt eine Ermittlung der Brandlastdichten im Einzelfall gemäß Kapitel BB.3.3 aus [DIN EN 1991-1-2/NA].

Tabelle 1: Nutzungsbedingte Brandlastdichten in MJ/m<sup>2</sup> gemäß [DIN EN 1991-1-2/NA]

Zeile	Nutzung	Brandlastdichte MJ/m <sup>2</sup>		
		Mittelwert	Standardabweichung	90 %-Quantil
		1	2	3
1	Wohngebäude	780	234	1 085
2	Bürogebäude	420	126	584
3	Krankenhaus (Zimmer)	230	69	320
4	Hotel (Zimmer)	310	93	431
5	Bibliothek, Bücherei	1 500	450	2 087
6	Schule (Klassenzimmer)	285	85,5	397
7	Verkaufsstätte, Einkaufszentrum	600	180	835
8	Versammlungsstätte (Theater, Kino)	300	90	417
9	Transport (öffentlicher Bereich)	100	30	139

Für Industriebauten erscheint diese Vorgehensweise logisch, da Brandlasten in Industriebauten sehr großen Schwankungen unterliegen, siehe auch [Fontana2006] und [Klein2009]. Vor dem Hintergrund, dass die Brandlastdichten von Industriegebäuden stark von der oft sehr speziellen Nutzung abhängen, ergibt die Angabe von pauschalen Durchschnittswerten relativ wenig Sinn. Für die Ermittlung im Einzelfall wird daher im nationalen Anhang auf die Normenreihe [DIN18230] verwiesen, was im Industriebau eine gewisse Tradition hat. Hier ist das Ermitteln von tatsächlichen Brandlasten und entsprechende Auslegungen bereits üblich (vgl. Abschnitt 7 [IndBauRL2000]). In früheren Ausgaben der Industriebaurichtlinie, ohne den Abschnitt 6, war es sogar die einzige Möglichkeit, Erleichterungen in Anspruch zu nehmen. Jedoch erscheint für bestimmte Standardsituationen des Hochbaus mit wiederkehrenden Charakteristiken eine Ermittlung der Brandlasten im Einzelfall sehr umständlich. Der Grund dafür liegt zum einen im Aufwand der Brandlastermittlung selber und zum anderen in der Abstimmung und der Diskussion mit der Bauaufsicht, einhergehend mit einem offenen Ausgang.

In den letzten Jahrzehnten haben unter anderem auch als Grundlage für die Ermittlung der normativen Brandlastdichten gemäß [DIN EN 1991-1-2/NA] diverse internationale, nutzungsspezifische Brandlasterhebungen stattgefunden. Die in der Literatur vorgefundenen Erhebungen und Veröffentlichungen werden nachfolgend auf Hinweise zur besonderen Nutzung *Foyer als Eingangshalle* untersucht. Dabei ergeben sich folgende Fragen:

- Welche Erhebungen gibt es?
- Welchen Annahmen liegen diesen Erhebungen zugrunde?
- Erscheinen diese Werte plausibel?
- Sind sie eindeutig und vergleichbar oder gibt es Widersprüche?
- Können sie auf Deutschland übertragen werden?

Nachfolgend sind die relevanten Ergebnisse der Literaturrecherche über Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies und Eingangshallen zusammengefasst (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Die Bezugseinheit der Brandlast lautet MJ/m<sup>2</sup>. Aus älteren Veröffentlichungen sind die Werte entsprechend umgerechnet. Für die ausführliche Auflistung und Beschreibung aller studierten Erhebungen und Veröffentlichungen zum Thema Brandlasten wird auf den Anhang G verwiesen. Parallel wird im Anhang J über den deterministischen Ansatz eine Abschätzung einer realistischen Größenordnung der Brandlast einer typischen Empfangssituation vorgenommen.

Tabelle 2: Veröffentlichungen zu Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies und Eingangshallen (1967-1976)

Jahr/ Verfasser	Nutzung	Brandlastdichte (Anmerkung)	Holzäquivalent
1967/Bryson	Lobby	100 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	6,5 kg Holz/m <sup>2</sup>
1975/Bryl	Erschließungsflächen (nur in Anlehnung)	167 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	10,8 kg Holz/m <sup>2</sup> 14,1 kg Holz/m <sup>2</sup>
		218 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	
1976/Culver	Lobbys (öffentliche Gebäude)	118 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	7,6 kg Holz/m <sup>2</sup> 5,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
		91 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	
1976/Culver	Lobbys (private Gebäude)	300 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	19,4 kg Holz/m <sup>2</sup> 21,1 kg Holz/m <sup>2</sup>
		327 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	



Tabelle 3: Fortsetzung der Veröffentlichungen zu Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies und Eingangshallen (1997-2013)

Jahr/ Verfasser	Nutzung	Brandlastdichte (Anmerkung)	Holzäquivalent
1997/Kumar	Flure (nur in Anlehnung)	153 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	9,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
		140 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	9,0 kg Holz/m <sup>2</sup>
1999/Schleich	Atrium in Office Building	200 MJ/m <sup>2</sup> <i>lokal begr. Fläche!</i>	12,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
2001/Schleich (NFSC)	Transport/ Public Space	100 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	6,5 kg Holz/m <sup>2</sup>
		30 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	1,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
		122 MJ/m <sup>2</sup> (80%-Quantil)	7,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
		139 MJ/m <sup>2</sup> (90%-Quantil)	9,0 kg Holz/m <sup>2</sup>
2001/DASt 019	Atrien für Empfangsnutzung	162 MJ/m <sup>2</sup> entspricht 95%- Quantil aus NFSC	10,5 kg Holz/m <sup>2</sup>
2009/Hosser (vfdb Leitfaden)	Eingangshalle	400 MJ/m <sup>2</sup> <i>lokal begr. Fläche!</i>	25,8 kg Holz/m <sup>2</sup>
2010/EC1-1-2/NA	Transport / öffentlicher Bereich	100 MJ/m <sup>2</sup> (Mittelw.)	6,5 kg Holz/m <sup>2</sup>
		30 MJ/m <sup>2</sup> (Standardabw.)	1,9 kg Holz/m <sup>2</sup>
		139 MJ/m <sup>2</sup> (90%-Quantil)	9,0 kg Holz/m <sup>2</sup>
		<i>Werte aus NFSC in die Norm überführt</i>	
2013/Hosser (vfdb Leitfaden)	Eingangshalle	150-400 MJ/m <sup>2</sup> <i>lokal begr. Fläche!</i>	9,7 - 25,8 kg Holz/m <sup>2</sup>

Bei der Literaturrecherche wurden keine nationalen statistischen Werte für Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies oder Eingangshallen vorgefunden. Selbst die nationalen Veröffentlichungen verweisen auf internationale Quellen. Weiterhin ist dabei zu berücksichtigen, dass sich das Inventar und Mobiliar seit den 1960er und 1970er Jahren bis heute in seiner Art und Anzahl stark verändert hat. Waren Holzverkleidungen und massive Holzmöbel damals alltäglich, finden sich in heutigen

Büros häufig Einrichtungsgegenstände aus Kunststoff und Metall wieder. Um die Größenordnung der Brandlastdichte besser einschätzen zu können, ist in der letzten Spalte der Tabelle 2 und Tabelle 3 das umgerechnete Holzäquivalent mit angegeben. Der Zusammenfassung ist zu entnehmen, dass es sich im Wesentlichen um über den gesamten Brandraum gemittelte Brandlastdichten handelt. Nur bei drei Veröffentlichungen ist von lokal begrenzten Flächen auszugehen. Bei [Schleich1999] wird dieses explizit unter Angabe der Bezugsfläche erwähnt, bei [Hosser2009] und [Hosser2013] ist aufgrund der Größe des Wertes ebenfalls davon auszugehen. Dieser wurde bei von einem Absolut-Wert ( $400 \text{ MJ/m}^2$ ) in [Hosser2009] zu einer ungefähren Größenordnung eines Bereiches ( $150 - 400 \text{ MJ/m}^2$ ) in [Hosser2013] korrigiert.

Für die Stützenbemessung infolge lokaler Brandlasten in partiell möblierten Eingangsbereichen erscheinen über den gesamten Brandraum gemittelte und verteilte Brandlasten nicht zutreffend. Eine Brandweiterleitung oder ein Vollbrand würden bei dieser flächigem Anordnung zwar begünstigt, jedoch entspricht dieses nicht der Realität. Außerdem ist wiederum fraglich, ob lokale Einflüsse von Stützen im Brandnahbereich damit auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt werden können. Abgesehen von Entrauchungsszenarien sind flächig gemittelte Brandlastdichten für das betrachtete Problem daher kritisch zu hinterfragen.

Überdies ist der Sachverhalt auffällig, dass die Brandlastdichten relativ großen Schwankungen unterliegen (zwischen  $100 \text{ MJ/m}^2$  und  $400 \text{ MJ/m}^2$ ). Im *NFSC* gemäß [Schleich2001] sind Brandlasten diverser Nutzungen angegeben, jedoch keine Atrien, Foyers, Lobbies oder Eingangsbereiche enthalten. Dabei wurden die verschiedenen Quantilwerte von Brandlasten der Kategorie „*transport, public space*“ in den darauffolgenden Veröffentlichungen offenbar unterschiedlich ausgelegt. In [DAST RL0192001] wird der Wert des 95 % - Quantils von *transport, public space* mit der Brandlast von Atrien für Empfangsnutzung interpretiert, umgerechnet von  $162 \text{ MJ/m}^2$  zu ca.  $45 \text{ kWh/m}^2$ . [DIN EN 1991-1-2/NA:2010] übernimmt denselben Mittelwert dieser Kategorie, übersetzt jedoch zu Transport (öffentlicher Bereich). Das korrespondierende 90 % - Quantil ist hier der normativ vorgesehene Bemessungswert. Der Übersetzung folgend gilt diese Kategorie für Verkehrsflächen auf Bahnhöfen oder ähnlichen Bereichen. Im vfdb-Leitfaden [Hosser2009] ist wiederum dieselbe Brandlasttabelle aus [DIN EN 1991-1-2/NA:2010] enthalten. Parallel dazu ist jedoch zusätzlich ein Wert für Brandlasten in Eingangshallen von  $400 \text{ MJ/m}^2$  angegeben, was aus Sicht des Verfassers widersprüchlich ist. Diese Größenordnung erscheint nur

sinnvoll, sofern sie auf eine lokal begrenzte Fläche bezogen wird. Der größere Wert für vermutlich lokal begrenzte Bereiche ist aus Versuchen von [Wilk2013c]<sup>5</sup> abgeleitet. Für die Bauteilbemessung, insbesondere von Stützen im Brandfall bei lokal begrenzten Brandlasten, erscheinen daher rein qualitativ nur die Ansätze zielführend, die auch von einer lokal begrenzten Brandlast ausgehen. Für die Größenordnung zur Berücksichtigung einer Sitzgruppe oder einem Empfangstresen erscheint der Ansatz von [Schleich1999] zwar realistisch, vielleicht aber noch etwas zu gering. Die relativ grobe Eingrenzung einer Brandlast in einer Eingangshalle gemäß [Hosser2013] deckt sicherlich einen sinnvollen Bereich ab, erscheint für eine konkrete Berechnung ohne weitere Informationen allerdings noch zu ungenau. Die numerischen Untersuchungen erfolgen daher mit dem oberen Grenzwert von 400 MJ/m<sup>2</sup>.

### 2.5.5 Brandentstehung

Für die Abschätzung nutzungsbedingter Brandentstehungswahrscheinlichkeiten als Eingangswerte für Naturbrand-Berechnungen liegen in Deutschland nur die internationalen Rechenwerte der Eurocodes gemäß Tabelle 4 vor:

Tabelle 4: Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_1$  von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr, abhängig von der Nutzung [DIN EN1991-1-2/NA:2010]

Zeile	Nutzung	Auftrittswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 \approx a \cdot A^b$		$p_1$
		$a$ 1/(m <sup>2</sup> · a)	$b$	1/a
		1	2	3
1	Wohngebäude	4,8E-5	0,9	3,0E-3
2	Bürogebäude	5,9E-5	0,9	6,2E-3
3	Krankenhaus, Pflegeheim	7,0E-4	0,75	3,0E-1
4	Hotel, Beherbergungsstätte	8,0E-5	1,0	3,7E-2
5	Schule, Bildungseinrichtung	2,0E-4	0,75	4,0E-2
6	Verkaufsstätte, Geschäftshaus	6,6E-5	1,0	8,4E-3
7	öffentliche Versammlungsstätte (Theater, Kino) sonstige Versammlungsstätte (z. B. Diskothek)	9,7E-5	0,75 1,0	2,0E-2 1,2E-1

<sup>5</sup> Die Versuche von [Wilk2013c] sind unveröffentlicht und nur in [Hosser2013] enthalten. Daher ist in Tabelle 3 die Sekundärquelle als offizielle Quelle aufgeführt.

Innerhalb dieser Rechenwerte wird jedoch nicht differenziert, um welchen Bereich einer Nutzung oder eines Gebäudes es sich handelt. Für Bürogebäude (rot markiert) weist der Eurocode so für einen Büroraum mit Aktenlagerung, einen brandlastarmen Eingangsbereich oder einen Müllraum jeweils dieselben gemittelten Rechenwerte aus. Neben diesen Rechenwerten existieren in Deutschland noch qualitative Beurteilungen zur Brandgefährdung. Diese stammen aus arbeitsstättenrechtlichen Vorschriften (früher BGR 133, jetzt ASR A2.2) zur Ermittlung der erforderlichen Löschmitteleinheiten zur Dimensionierung von Feuerlöschern. Eine ähnliche Veröffentlichung [VDS2001:1998] gibt es vom ehemaligen Verband der Sachversicherer als Unternehmen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV). Dort wird innerhalb von übergeordneten Nutzungsbereichen wie *Verwaltung* oder *Dienstleistung* hinsichtlich der Brandgefährdung zwar etwas feiner differenziert (siehe Tabelle 5), jedoch fällt die Gefährdungsbeurteilung nur qualitativ aus. Eine rechnerische Berücksichtigung kann damit nicht erfolgen.

Tabelle 5: Auszug der beispielhaften Zuordnung von Betriebsbereichen zur Brandgefährdung gemäß [VDS2001:1998]

2. Verwaltung, Dienstleistung		
geringe Brandgefährdung	mittlere Brandgefährdung	große Brandgefährdung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingangs- und Empfangshallen von Theatern, Verwaltungsgebäuden</li> <li>• Arztpraxen</li> <li>• Anwaltspraxen</li> <li>• EDV-Bereiche ohne Papier</li> <li>• Bürobereiche ohne Aktenlagerung</li> <li>• Büchereien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EDV-Bereiche mit Papier</li> <li>• Küchen</li> <li>• Gastbereiche mit Hotels, Pensionen</li> <li>• Bürobereiche mit Aktenlagerung</li> <li>• Archive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kinos, Diskotheken</li> <li>• Theaterbühnen</li> <li>• Abfallsammelräume</li> </ul>

Nach [VDS2001:1998] liegt eine *geringe Brandgefährdung* vor, wenn Stoffe mit geringer Entzündbarkeit vorhanden sind, die betrieblichen Verhältnisse nur geringe Möglichkeiten für eine Brandentstehung bieten und wenn im Falle eines Brandes mit geringer Brandausbreitung zu rechnen ist. Im Vergleich dazu liegt gemäß [VDS2001:1998] eine *mittlere Brandgefährdung* vor, wenn Stoffe mit hoher Entzündbarkeit vorhanden sind und die örtlichen und betrieblichen Verhältnisse für die Brandentstehung günstig sind, jedoch keine große Brandausbreitung in der Anfangsphase zu erwarten ist. Die Brandgefährdung in Eingangsbereichen von Atrien und Foyers ist demnach eindeutig als gering einzustufen, was auch gemäß Tabelle 5 so beurteilt wird (rote Markierung).

Festzuhalten ist, dass eine objektiv betrachtete, qualitativ geringe Brandgefährdung in Eingangsbereichen von Atrien und Foyers in quantitative Brandschutznachweise nicht mit einfließt. Unter anderem lag der [DIN EN1991-1-2/NA:2010] auch die Veröffentlichung [Rahikainen2004] aus Finnland zugrunde. Bei der Durchsicht dieser Veröffentlichung wird deutlich, dass der hier betrachtete, spezielle Nutzungsbereich eines Gebäudes von der ansonsten allgemein gültigen Erhebung nicht mit erfasst wurde. Die Auswirkungen aus der Überschätzung der Brandgefährdung in den Rechenwerten werden im Rahmen des Sicherheitskonzeptes in Kapitel 3.7.3 durch eine Sensitivitätsanalyse näher untersucht.

## 2.6 Zusammenfassung

Für eine tiefergehende Bearbeitung der Fragestellung dieser Arbeit, wie in Kapitel 1 dargelegt, wurde im Kapitel 2 der Stand der Erkenntnisse zusammengefasst und kritisch hinterfragt. Neben den physikalischen Zusammenhängen der Verbrennungslehre und der Wärmeübertragung wurde auch auf die baurechtlichen Anforderungen an Bauteile in bestimmten Gebäuden sowie die normativen Umsetzungsmöglichkeiten in der thermischen und mechanischen Analyse eingegangen. Ferner wurde im Rahmen des Literaturstudiums überprüft, in wie weit Informationen zur besonderen Gebäudenutzung „Foyer“ hinsichtlich der Brandlasten oder der Brandentstehungswahrscheinlichkeit vorliegen. Dabei wurde festgestellt, dass in der Vergangenheit Versuche unternommen wurden, bestimmte Brandlasten nutzungsabhängig zu erfassen und über Mittelwerte zu vereinfachen bzw. zu vereinheitlichen. Die Nutzung *Foyers als Eingangssituation* fand jedoch in verschiedenen Veröffentlichungen keine Berücksichtigung. Nationale Werte für Deutschland liegen hierzu in der Literatur nicht vor. Gleiches gilt für Brandentstehungswahrscheinlichkeiten sowie geometrische Daten von Foyers. Im Rahmen einer Datenerhebung sollen daher im folgenden Kapitel diesbezügliche Erkenntnisse gewonnen werden, um daraus anschließend Informationen für numerische Betrachtungen ableiten zu können.

## **3 Erhebung von Kenndaten über Atrien und Foyers**

### **3.1 Einleitung**

Zur Unterstützung der Fragestellung dieser Arbeit, wie in Kapitel 1 erläutert, werden zur Absicherung eines sinnvollen Parameterbereiches planerische Daten von bestehenden oder bereits in Planung befindlichen Gebäuden erhoben (siehe Kapitel 3.4 und 3.5). Das erfolgt anhand einer Expertenbefragung nach der Delphi-Methode. Zusätzlich werden für wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen Daten über vergangene Brände in den in dieser Arbeit untersuchten Gebäudenutzungen gesammelt (siehe Kapitel 3.7). Dafür werden Versicherungen und Feuerwehren hinsichtlich ihrer Erfahrungen mit Bränden in Atrien und Foyers befragt.

Zunächst wird in diesem Kapitel auf die Grundlagen und Formen der Datenerhebung eingegangen. Anschließend wird die durchgeführte Datenerhebung beschrieben sowie die Art und Weise der gewählten Erhebungsform entsprechend erläutert und die Ergebnisse präsentiert. Der dafür verwendete Fragebogen befindet sich im Anhang H.

### **3.2 Varianten der Datenerfassung**

Sind für die Beurteilung eines bestimmten Sachverhaltes keine ausreichenden Daten, beispielsweise aus der Literatur, vorhanden oder liegen nicht eindeutig vor, so können Daten empirisch überprüft werden. Für eine Datengewinnung stehen gemäß [Assenmacher2010] drei Erhebungstechniken als statistische Methode zur Verfügung:

1. Befragung,
2. Beobachtung,
3. Experiment.

Da der Fokus in dieser Arbeit auf die Erhebung retrospektiver Fakten gerichtet ist, also die Erhebung von Daten bestehender Atrien und Foyers, scheidet für diese Fragestellung das Experiment zur Datengewinnung aus. Die Beobachtung von Bestandsatrien wäre sicherlich die erste Wahl, insbesondere, um die messbaren Einzeldaten statistisch vollständig auszuwerten. Jedoch scheitert diese Form der Datenerhebung aus Gründen, wie sie noch in Kapitel 3.4 beschrieben werden, so dass die Befragung als Erhebungstechnik gewählt wird. Für diese Thematik ist die Befragung

grundsätzlich als primärstatistische Erhebung<sup>6</sup> zu bewerten. Aufgrund von Art und Durchführbarkeit der Befragung können jedoch nur prozentuale Verteilungen von bestimmten Sachverhalten erhoben werden, quasi gemittelte Werte, so dass der Datenfundus, trotz Ermittlung explizit für diese Fragestellung, strenggenommen nur einen tertiärstatistischen Charakter aufweist (siehe Kapitel 3.5 und 3.6).

### **3.3 Wesentliche Parameter der Datenerhebung**

Als notwendige zu erhebende Daten wurden folgende identifiziert. Für die Festlegung der Stützenlänge und der Brandraumgröße werden geometrische Daten benötigt. Die Umfassungsbauteile geben Aufschluss über die Art der Abschottung dieses Bereiches. Die vorhandenen Öffnungen im unteren und oberen Raumdrittel zeigen die Ventilationsverhältnisse. Für die Bauteilbemessung werden Angaben zur Bauart und zu den Materialien der Stützen benötigt. Art, Menge und Verteilung der Brandlasten geben Aufschluss über mögliche Brandszenarien. Angaben zur Anlagentechnik sind unter anderem wichtig für die Berücksichtigung im Sicherheitskonzept. Informationen über die bisherige Nachweisführung des Feuerwiderstandes geben zusätzliche Informationen. Dabei sollen nach Möglichkeit auch Informationen über die Häufigkeitsverteilungen von bestimmten Geometrien und bestimmten Brandschutzmaßnahmen gewonnen werden, um die in Kapitel 2.5.2 vorgenommene Typisierung von Foyers bestätigen zu können.

### **3.4 Vorgehen bei den in-situ-Beobachtungen**

Für die Datenerhebung wurden zunächst geeignete Bauwerke in Deutschland ausgewählt. Daraufhin wurden entsprechende Ansprechpartner der jeweiligen Gebäude ausfindig gemacht, um bei diesen eine Erlaubnis für die Datenerhebung einzuholen. Die Erlaubnis zur Datenerfassung wurde von den verantwortlichen Personen in vielen Fällen nicht erteilt. Angesichts der limitierten Zusagen sind die Voraussetzungen für eine repräsentative Stichprobe nicht gegeben. Um trotzdem sinnvolle, realistische Annahmen für Brandszenarien in Foyers treffen zu können,

---

<sup>6</sup> Primärstatistische Daten werden nach [Fahrmeir2011] explizit für einen bestimmten Zweck erhoben. Sekundärstatistische Daten sind Bestandsdaten, die anderweitig verwendet und ausgewertet werden und tertiärstatistische Daten liegen nur komprimiert vor, etwa in Form von Mittelwerten.

wurde eine Expertenbefragung im Rahmen der Delphi-Methode durchgeführt (siehe dazu nachfolgendes Kapitel).

### 3.5 Vorgehen bei der Delphi-Methode

Da die Angaben aus der Literatur unbefriedigend waren und sich die eigene Datenerfassung als nicht praktikabel erwiesen hat, wird ein weiteres Instrument verwendet, die **Delphi-Technik** (s.a. Kapitel 3.1).

*Die Erfahrungen, die externe Experten im Laufe Ihrer Arbeiten in einem bestimmten Gebiet gesammelt haben, bilden gemäß [Krüger2014] einen Wissensschatz, aus dem wichtige Informationen für neue Fragestellungen extrahiert werden können. Ein Ansatz, diese Wissensbasis zu erschließen, ist die Delphi-Technik.*

Als Delphi-Technik werden nach [Krüger2014] Vorgehensweisen zusammengefasst, bei denen durch systematische, meistens mehrstufige Expertenbefragungen Einschätzungen von Sachverständigen und bestimmte Informationen gewonnen werden (Expert-Judgment). Dabei sind Auswahl und Zusammensetzung der Befragten von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft der Untersuchung. Häufig wird die Delphi-Methode in Verbindung mit Zukunftsprognosen und Zukunftsforschung verwendet [Häder2014]. Grundsätzlich geht es darum, diffuse Sachverhalte über externe Experten möglichst exakt bestimmen zu können. Die klassische Delphi-Befragung erfolgt laut [Häder2009] in vier Schritten:

**Schritt 1:** Zunächst sind konkrete Kriterien abzuleiten, die den Experten im Rahmen einer quantifizierten Befragung vorgelegt werden können. Je nach Art der Befragung erfolgt dieses auf rein qualitativer Ebene oder, sofern Zahlenbereiche in den Antwortmöglichkeiten vorgegeben werden, auch auf quantitativer Art. Dieser Schritt wird vom Veranstalter der Delphi-Befragung selbst bewältigt, beispielsweise anhand einschlägiger Literatur oder mithilfe einer offenen Befragung externer Experten. Hier wird folglich festgelegt, welche Informationen abgefragt werden sollen.



**Schritt 2:** Daraufhin ist ein standardisierter Fragebogen auszuarbeiten, mit dessen Hilfe die Experten anonym nach ihrer Meinung zu den bestimmten Sachverhalten befragt werden können. Richtet sich dieser ausschließlich an Experten (wie in diesem Fall), können bestimmte Fachtermini somit vorausgesetzt werden. Die Logik der Fragestellung sollte jedoch nachvollziehbar sein. Formalitäten im Rahmen der sogenannten Versuchsdurchführung müssen, anders als bei psychologischen Experimenten, in denen situationsgebundene Reaktionen bewusst provoziert werden, nicht berücksichtigt werden. Bei Fragebögen von Delphi-Studien zur Bestimmung eines Sachverhaltes mittels Experten geht es vielmehr um das situationsunabhängige, wohlüberlegte Antworten. Die befragten Personen sind daher nicht als Versuchsperson zu verstehen, sondern übernehmen die Rolle eines Informanten [Häder2009].

Der Länge eines Fragebogens kommt gemäß [Häder2009] eine besondere Bedeutung zu. Sie hat nicht nur signifikanten Einfluss auf die Ausschöpfungsquote, wenn beispielsweise entscheidende Parameter nicht abgefragt werden, sondern insbesondere auch auf die Rücksendungsquote. Die auf Freiwilligkeit basierenden Umfragen sind ausschließlich auf die Mitarbeit der beruflich häufig stark eingespannten Experten angewiesen. Überschreitet der für die Bearbeitung erforderliche Zeitaufwand eine subjektive Grenze, besteht die Gefahr der Überforderung und damit gar keine Antwort zu erhalten. Das ausgewogene Verhältnis zwischen Aufwand und Aussagekraft stellt daher eine gewisse Gratwanderung dar.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, den für die spezielle Fragestellung maßgebenden Personenkreis aufzufinden. Wer sind die Experten für dieses Thema bzw. wie gelangt man an entsprechende Ansprechpartner?

**Schritt 3:** Vor der Aufbereitung und Auswertung der Befragungsergebnisse ist der Rücklauf zu kontrollieren, gegebenenfalls sind Nachfassaktionen durchzuführen, um die Anzahl der Rückläufer zu erhöhen.

Die statistische Datenanalyse hängt entscheidend von der Art der Befragung ab. Geht es um Einschätzungen innerhalb bereits vorgegebener Grenzen oder um das Angeben expliziter Einzelwerte inklusive von Ausreißern? Bei Datenerhebungen haben Einzelwerte eine geringe Aussagekraft. Erst statistische Kennwerte, wie Mittelwert, Median, Standardabweichung, Varianz und Schiefe (siehe Anhang C), ermöglichen für eine Liste von Einzelwerten die entsprechende Auswertung und Interpretation.

Bei vorgegebenen Größenordnungen von Antwortmöglichkeiten hingegen lassen sich diese statistischen Werte nicht mehr ermitteln. Entsprechend wohlüberlegt müssen diese Antwortmöglichkeiten sein.

**Schritt 4:** Wiederholung der Befragung auf Grundlage der gewonnenen Informationen. Dieser Schritt entfällt bei der Expertenbefragung, welche gemäß [Harder2009] in der Regel nur einmalig, im Sinne eines Brainstormings durchgeführt wird. So wurde auch hier vorgegangen.

Für die Expertenbefragung wurde ein Fragebogen entwickelt, der Aufschluss über Foyer- bzw. Atriums-situationen in Büro- und Verwaltungsgebäuden gibt, um daraus die wesentlichen Einflussfaktoren für die Stützenbemessung im Brandfall zu ermitteln. Der Fragebogen befindet sich im Anhang H. Der Fokus war hier bewusst auf die Eingangssituation von diesem klassischen Gebäudetyp gerichtet, um den Parameterbereich entsprechend sinnvoll einzugrenzen. Andere Nutzungen bringen andere bauordnungsrechtliche Anforderungen und andere Charakteristiken mit sich, die eine Auswertung im Konkreten erschweren. Der Wunsch, möglichst viele Parameter zu erfragen, steht damit einem entsprechend größeren Aufwand der Probanden gegenüber, womit die Wahrscheinlichkeit ansteigt, keine bzw. weniger Rückläufer zu erhalten.

Die Zielgruppe der Experten bestand im Wesentlichen aus Brandschutzingenieuren, Sachverständigen und Prüfsingenieuren für Brandschutz aus namhaften Brandschutzingenieurbüros in Deutschland. Außerdem wurden weitere Experten im Internet über Sachverständigendatenbanken der Ingenieurkammern, der Industrie- und Handelskammern (IHK), des Vereins zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz (VIB) oder den Teilnehmerlisten einschlägiger nationaler Veranstaltungen ausfindig gemacht. So wurden ca. 200 sachverständige Personen aus der Berufspraxis ausgewählt und kontaktiert. Ca. 30 % der angeschriebenen Personen beantworteten den Fragebogen. Die Qualität der Antworten reichte dabei von keiner Projekterfahrung (ging nicht in die Wertung mit ein) bis zu vollständig ausgefüllten Fragebögen, mit einem Projektumfang von über 100 Projekten.

## 3.6 Ergebnisse und Auswertung

### 3.6.1 Geometrie der Foyers

In der Auswertung der Datenerhebung sind die anonymisierten Mittelwerte dargestellt, gewichtet über den jeweiligen Projektumfang des einzelnen Informanten und bezogen auf die Grundgesamtheit der Stichprobe. Bis auf die Fragen 6b, 7, 8.1, 9 und 10 muss die Antwort in Summe 100 % betragen. Ergänzend wurden *relevante Bemerkungen Einzelner (kursiv)* mit aufgeführt.

Geometrische Informationen über die Grundfläche und die Höhe gemäß Frage 1 sind wichtig, um maßgebende Stützenabmessungen sowie das Brandraumvolumen festzulegen zu können.

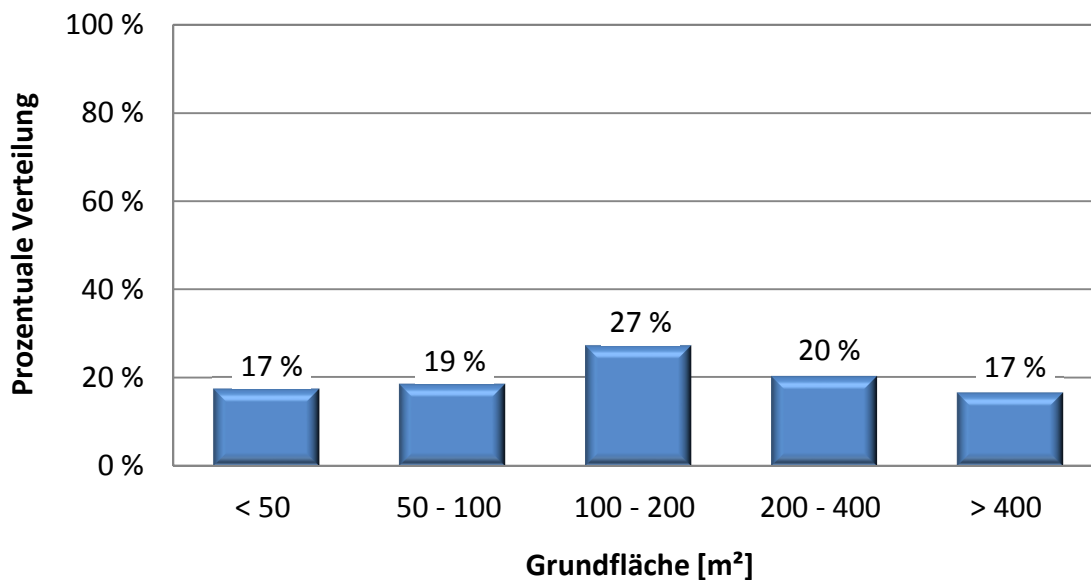


Abbildung 31: Größenverteilung der Grundflächen von Foyers

Die Verteilung (Abbildung 31) zeigt sehr gut die Bandbreite möglicher Grundflächen von Foyers. Etwas mehr als ein Drittel der Eingangshallen (36%) weist eine Grundfläche von bis zu 100 m<sup>2</sup> auf. Beinahe ein weiteres Drittel (27%) bildet die Gruppe der Foyers zwischen 100 m<sup>2</sup> und 200 m<sup>2</sup>. Der Rest teilt sich auf die Größen 200 m<sup>2</sup> bis 400 m<sup>2</sup> sowie Grundflächen über 400 m<sup>2</sup> auf. Dadurch wird ersichtlich, dass sich dieser Datenfundus nicht nur auf wenige, spezielle Größenordnungen bezieht, sondern dass es sich um eine gut verteilte Stichprobe handelt, die viele denkbare Varianten von Foyers mit berücksichtigt. Als reine Eingangssituation sind Atrien dieser Größenordnung sicherlich eine Ausnahme. Überdies sind in Atrien und Foyers alle

Grundrissformen und -Verläufe denkbar, von quadratisch, rund oder oval bis zu Freiformflächen, mit und ohne angrenzende Gebäudeteile, die wiederum jeweils mit und ohne Raumabschluss hergestellt werden. Diese Details können mittels einfacher Delphi-Befragungen allerdings nicht mit erfasst werden. *Entsprechend der Rückmeldung einzelner Experten wurde die Grundfläche als größte brandschutz-technisch offen angebundene Fläche in einem Geschoss interpretiert.* Der Verfasser teilt diese Auffassung und sieht die Anmerkung als unkritisch für die Aussagekraft der Umfrageergebnisse an.

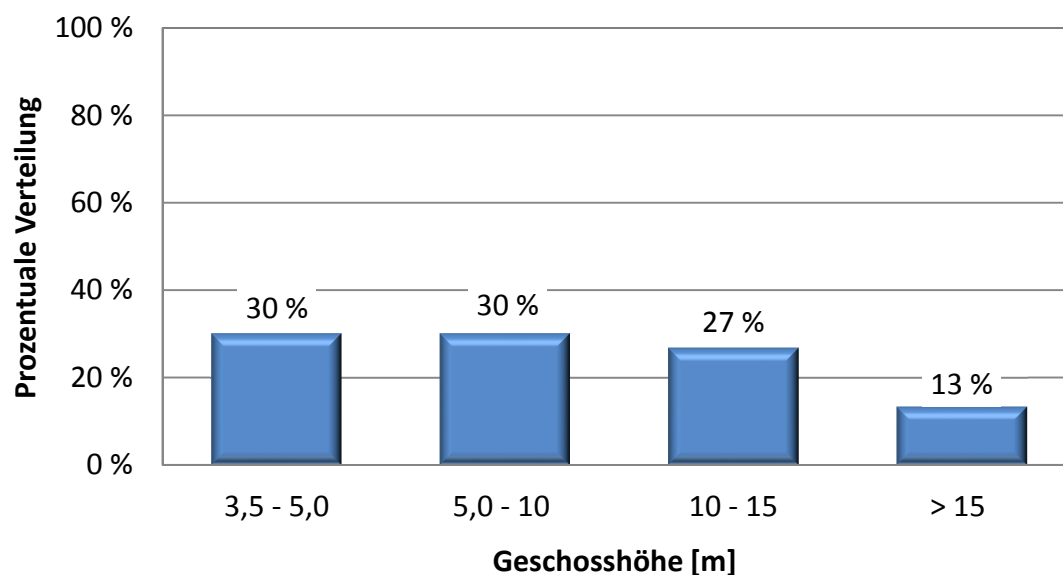


Abbildung 32: Höhenverteilung in Atrien und Foyers

Die Geschosshöhen von Atrien und Foyers verteilen sich gleichmäßig auf die vorgegebenen Kategorien (siehe Abbildung 32). Aus den Höhenkategorien lassen sich bestimmte Gebäudecharakteristiken ableiten. Niedrige Foyerstützen mit einer Länge von 3,5 m bis 5,0 m deuten auf durchlaufende Stützen in quasi Regel-Erdgeschossen aufgehender Gebäude hin (vergleiche *eingeschossiges Foyer* gemäß Kapitel 2.5.3). Im Bereich partiell entfallener Geschosse von aufgehenden Gebäuden sind häufig höhere Stützen mit etwa 8,0 m bis 10,0 m vorzufinden (vergleiche *mehrgeschossiges Foyer* gemäß Kapitel 2.5.3). Stützenlängen darüber hinaus mit einer Länge von über 10,0 m bis 15,0 m deuten auf autarke Gebäudeteile, wie hohe eingeschossige *Atrien* hin. Nachfolgend werden diese Kategorien typisiert und konkretisiert zusammengefasst.

Geschosshöhe bis 5 m: Diese Größenordnung der *eingeschossigen Foyers* tritt zu fast einem Drittel (30 %) auf und entspricht der in Kapitel 2.5.2 aufgestellten Kategorie 1. Wie für die Gebäudeklasse 5 durchaus üblich, fallen hierunter vor allem Foyers in Gebäuden mit etwas höheren Erdgeschossen, ohne die Grundrisse der Obergeschosse zu beeinträchtigen.

Geschosshöhe 5-10 m: Stützen dieser Höhe treten ebenfalls zu fast einem Drittel (30%) in Foyers auf. Dabei ist diese Größenordnung klassisch für im Grundriss partiell entfallene Geschosse des aufgehenden Gebäudes zugunsten des Foyers (vergleiche Kategorie 2 gemäß Kapitel 2.5.2).

Geschosshöhe 10-15 m und > 15 m: Stützen mit dieser Knicklänge sind üblicherweise Pendelstützen eines eingeschossigen, hohen Gebäudeteils (vergleiche Kategorie 3 gemäß Kapitel 2.5.2). Mit zunehmender Größe treten sie entsprechend seltener auf. Gut ein Viertel der Foyers (27 %) sind bis zu 15 m hoch. Noch höhere Foyers werden mit einer Häufigkeit von ca. 13 % angegeben. Für diese Foyers gelten die beschriebenen Charakteristika im Besonderen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass solche Stützenlängen neben vorrangig eingeschossigen Atrien oder Lichthöfen auch in Hochhäusern vorzufinden sind. In diesem Falle kommen zu den großen Knicklängen dann signifikante Gebäudelasten des aufgehenden Hochhauses hinzu. Im internationalen Vergleich spielen jedoch Atrien von Hochhäusern in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle. Zwar können diese Stützenlängen durchaus auch bei Bauteilen erreicht werden, die als Primärtragglied fungieren, jedoch würden bei hochbeanspruchten Stützen in Hochhäusern die Stützenabmessungen reiner Stahlquerschnitte unwirtschaftlich groß werden. In dem Fall würden vorrangig Stahlverbundstützen oder Stahlbetonstützen aus hochfesten Betonen zum Einsatz kommen (siehe [König2003]), für die die Brandschutzanforderungen auf konventionelle Weise implizit mit erfüllt werden.

*Nach dem Feedback eines Fragebogens zu urteilen, wurde bei der Geschosshöhe teilweise auch die lichte Höhe angenommen.* Der Verfasser vertritt die Meinung, dass die grundsätzliche Aussagekraft der Umfrageergebnisse in Bezug auf die Höhenverteilung durch mögliche Abweichungen in der Größenordnung der Bauteildicke einer Geschosdecke nicht signifikant beeinträchtigt wird. Aufgrund der vorgegebenen Höhenkategorien, ist der Einfluss des Interpretationsspielraumes zwischen einer *lichten Höhe* und dem statischen *Achismaß zwischen den Geschosdecken* daher als vernachlässigbar einzustufen.

### 3.6.2 Umfassungsbauteile der Foyers

Die Kenntnis der Umfassungsbauteile, wie Dächer, Innen- und Außenwände (Fassaden) ist wichtig, um das Wärmespeichervermögen der umliegenden Bauteile sowie mögliche Ventilationsöffnungen abzuschätzen. Bei Dächern sind Stahl oder Glas mit einer Häufigkeit von zusammen 81 % die dominierenden Baustoffe, wie Abbildung 33 zeigt.

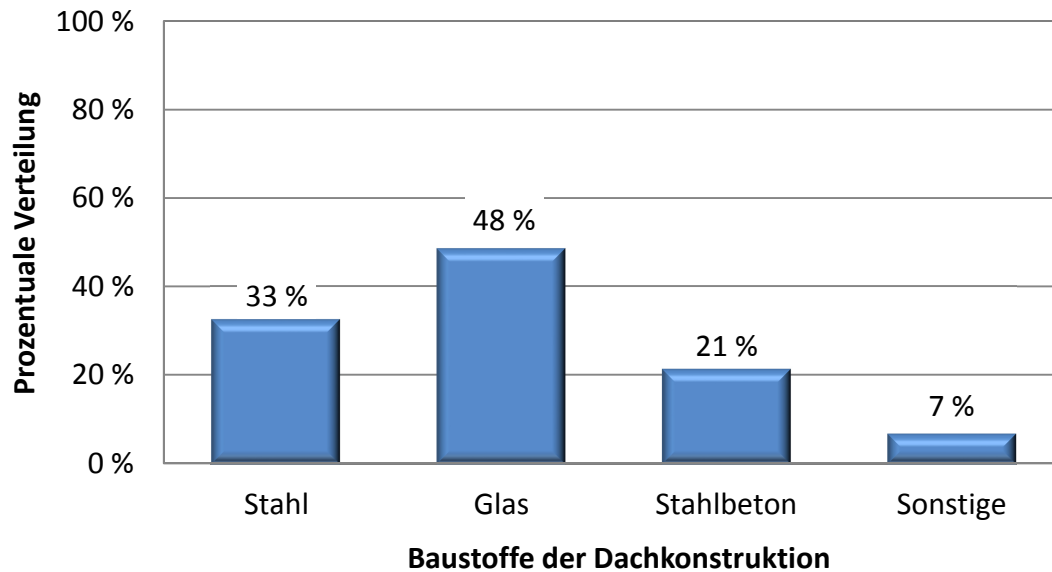


Abbildung 33: Baustoffverteilung des oberen Abschlusses von Foyers

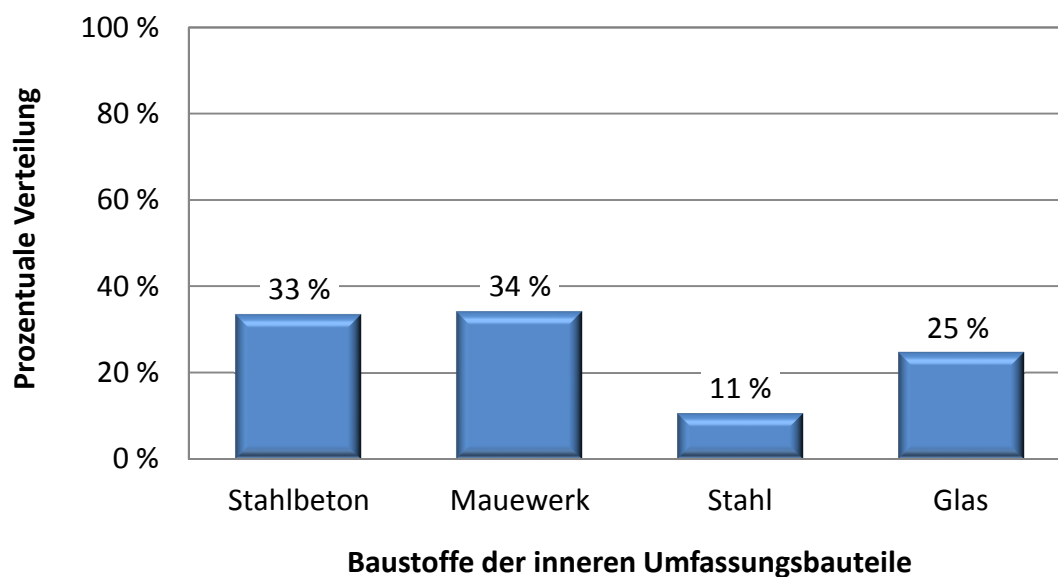


Abbildung 34: Baustoffverteilung der inneren Umfassungsbauteile von Foyers

Die innere Abschottung erfolgt nach Abbildung 34 überwiegend über Mauerwerks- oder Stahlbetonwände (zusammen 67 %). Zu einem Viertel wird Glas verbaut, ob als Wandelement oder zur Herstellung von transparenten Rauchabschlüssen über die Geschosse zum Atrium. *Der Vollständigkeit halber gab es in einem Fragebogen noch den Hinweis, dass für die inneren Umfassungsbauteile theoretisch auch Wände aus Leichtbau oder Trockenbau in Frage kommen.*

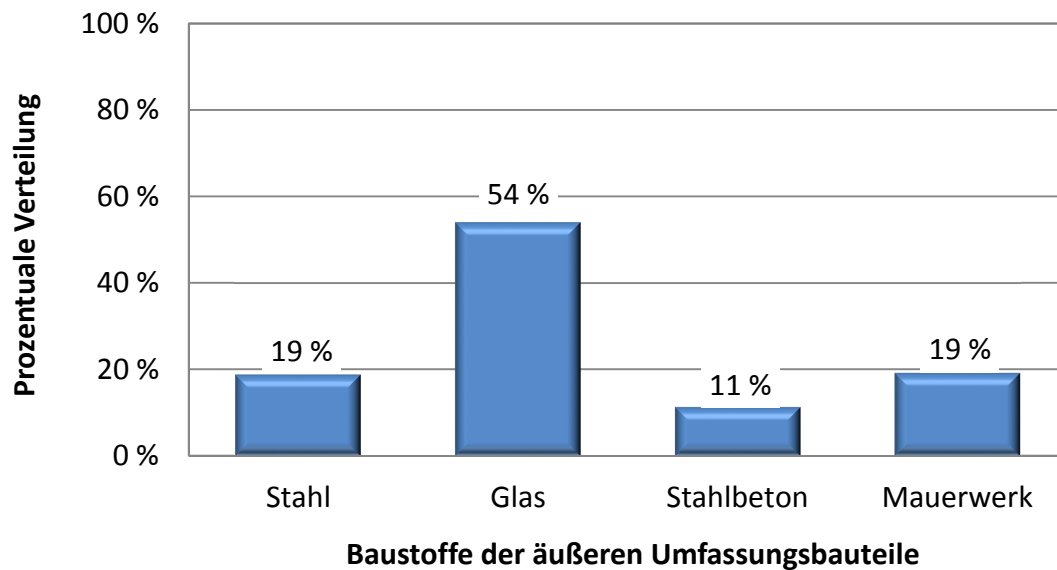


Abbildung 35: Baustoffverteilung der äußeren Umfassungsbauteile von Foyers

Gerade im Fassadenbereich wird häufig Glas großflächig verbaut, um Foyers lichtdurchflutet herzustellen. Das bestätigt auch der Wert von 54 % als dominierender Baustoff für die äußeren Umfassungsbauteile (siehe Abbildung 35). *In diesem Zusammenhang gab es noch den Hinweis, dass Stahl und Glas häufig als eine Einheit angesehen werden könne.*

### 3.6.3 Öffnungsflächen von Foyers

In Frage 3 und Frage 4 (siehe Anhang H) geben die Öffnungsflächen in Dach und Fassade Aufschluss über die Ventilationsbedingungen sowie über die Beschaffenheit der Foyers. Öffnungsflächen im Dach und in der Fassade werden aus verschiedenen Ursachen heraus hergestellt, ob als architektonisches Stilmittel für die Belichtung oder gleichzeitig auch für die Rauchableitung im Brandfall. In diesem Fall ist deren Dimensionierung vom Schutzziel abhängig, entweder vom Schutzziel *"Rauchableitung zur Unterstützung des Löschangriffes der Feuerwehr"* oder vom Schutzziel *"raucharme*

*Schicht*" 2,50 m oberhalb des jeweiligen Fußbodens. Die erforderliche Rauchabzugsfläche ergibt sich dabei entweder als bezogene Größe aus einem pauschalen Grundflächenansatz heraus, als absoluter Wert gemäß der Bemessungsnorm für Rauchabzüge oder als absoluter Wert als Ergebnis einer Simulationsrechnung.

Typische bezogene Größenordnungen der Rauch- und Wärmeabzugsflächen betragen ca. 1-2 % der Grundfläche des Atriums oder des Foyers. Die [DIN18232-2:2007] regelt die Bemessung der erforderlichen Rauchabzugsflächen für Räume größer als 200 m<sup>2</sup>. Dies geschieht abhängig von der Grundfläche und der Raumhöhe in Verbindung mit der anzustrebenden raucharmen Schicht sowie von der Bemessungsgruppe (BMG). Der BMG liegt eine rechnerische Brandfläche zugrunde, welche sich aus der prognostizierten Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der anzusetzenden Brandentwicklungsdauer ergibt. Bei ungünstigen Konstellationen kann das jedoch zu teilweise unverhältnismäßig großen Rauchabzugsflächen führen. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, den Nachweis der raucharmen Schicht mit kleineren Entrauchungsflächen über eine entsprechende Rauchsimulation zu führen.

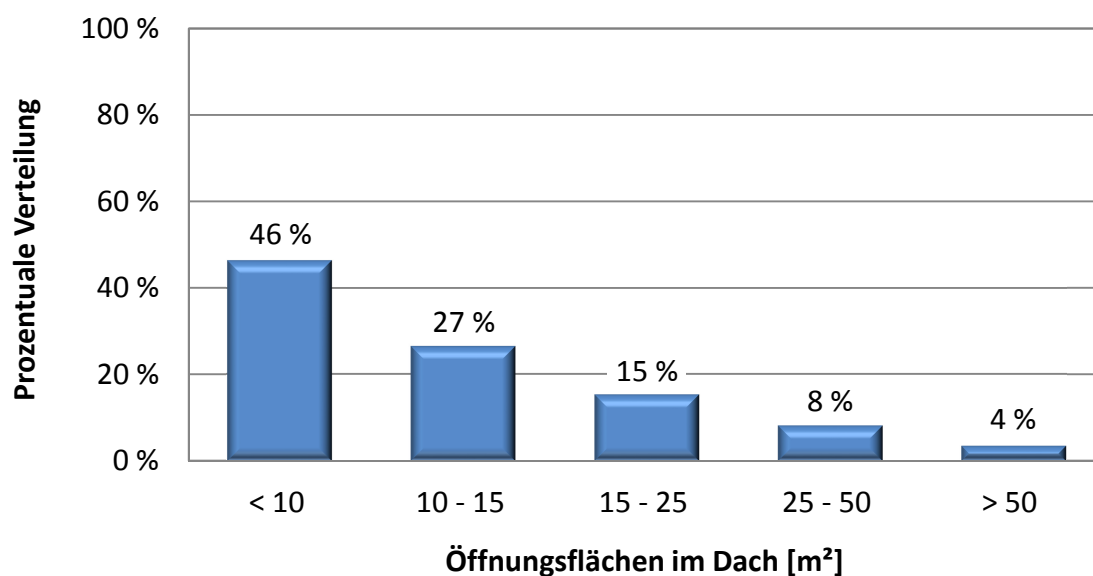


Abbildung 36: Verteilung der Öffnungsflächen im oberen Abschluss von Foyers

Da die Antwortmöglichkeiten als absolute Werte vorgegebenen wurden, handelt es sich bei den Öffnungsflächen um Größenordnungen unabhängig von der Grundfläche und der Höhe. Knapp die Hälfte der Antworten fällt gemäß Abbildung 36 auf die Rubrik < 10 m<sup>2</sup>. Darin enthalten sind unter Anderem ebenerdige Eingangsbereiche ohne Einbauten und Treppen, in denen die Rauchabzugsflächen mit bezogenen Werten



dimensioniert wurden. Beispielsweise ergibt 2 % von 400 m<sup>2</sup> Grundfläche eine Rauchabzugsfläche von 8 m<sup>2</sup>. Die Umfrageergebnisse bestätigen diese Größenordnung.

Die Gründe für die Öffnungsflächen in der Fassade sind häufig dieselben, wie für die Öffnungsflächen im Dach, architektonische Gründe zur Belichtung und brandschutztechnische Gründe für die Entrauchung. Für die Entrauchung sind bestimmte Verhältnisse von Zu- und Abluft zur Sicherstellung des natürlichen Auftriebs im Brandfall erforderlich. Dabei sollte die Zuluftfläche ungefähr dem 1,5 bis 2-fachen Wert der Abluftfläche entsprechen [Quenzel2009]. Als Zuluft- oder Nachströmflächen gelten Öffnungen, die sich im unteren Raumdrittel befinden.

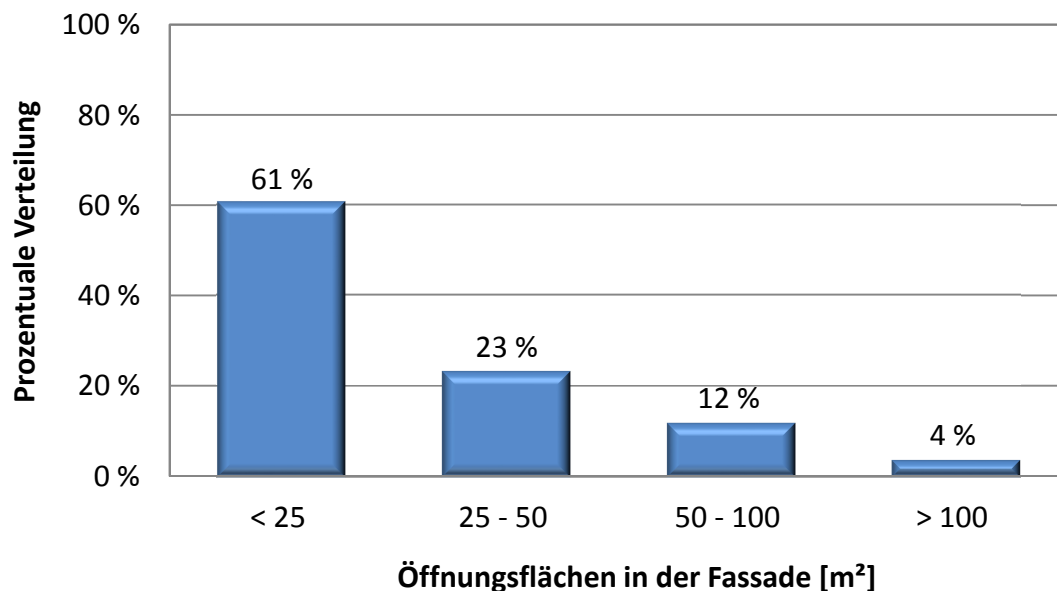


Abbildung 37: Verteilung der Fassadenöffnungsflächen von Foyers

Öffnungen im oberen Drittel gelten als Abluftöffnungen. Rauchabzüge in der Fassade sind jedoch nachrangig zu einer direkten Öffnung im Dach zu bewerten. Bei ausschließlicher Entrauchung über die Fassade ist der doppelte Prozentwert an Öffnungsfläche vorzusehen. Über 60 % der Foyers weisen Öffnungsflächen in der Fassade von weniger als 25 m<sup>2</sup> auf (siehe auch Abbildung 37). Da es sich hier, wie bereits beschrieben, nicht um bezogene Größen, sondern absolute Werte handelt, ist dabei zu berücksichtigen, dass diese Größenordnung unabhängig von der Grundfläche der Foyers zu sehen ist.

### 3.6.4 Baustoffe von Foyerstützen

In Frage 5 wurde nach den Baustoffen von Foyerstützen gefragt. Besonders der Vergleich zwischen Stahlstützen und Beton- sowie Stahlverbundstützen ist hier grundsätzlich von Interesse. Die Wahl der Baustoffe ist bei Stützen, je nach architektonischen Vorgaben oder der Brandschutzanforderungen, vor allem von der statischen Auflast abhängig. Insbesondere Stützen von ein- oder mehrgeschossigen Foyers in aufgehenden Gebäuden und Hochhäusern haben eine hohe Auflast, die häufig aus statischen Gründen zu hochfesten Betonstützen oder Stahlverbundstützen führt. Daher ist zu vermuten, dass sich hinter den 12 % Stahlverbundstützen gemäß Abbildung 38 sowie einigen Stahlbetonstützen insbesondere höhere Gebäude sowie Hochhäuser verbergen.

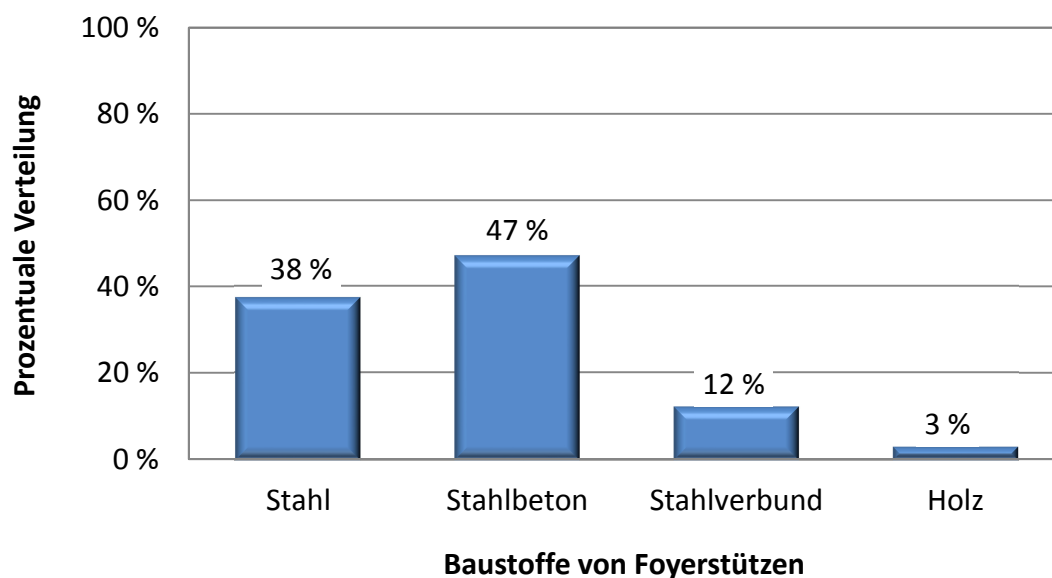


Abbildung 38: Verteilung der zur Anwendung kommenden Baustoffe von Foyerstützen

Festzuhalten ist, dass der Anteil von Foyerstützen, die in Stahlbeton- oder Stahlverbundbauweise hergestellt wurden, zusammen fast 60 % ergibt. Der Baustoff Beton ist demnach hier vorherrschend. Die reine Stahlbauweise ist zu 38 % vertreten, während die Holzbauweise mit 3 % als hier unbedeutend bezeichnet werden kann.

### 3.6.5 Nachweismethoden des Feuerwiderstandes

Die Frage 6 soll darüber Aufschluss geben, wie derzeit die Anforderungen an den Feuerwiderstand von Stützen erfüllt werden und welchen Umfang rechnerische Methoden bereits einnehmen. Das Ergebnis kann Abbildung 39 entnommen werden.

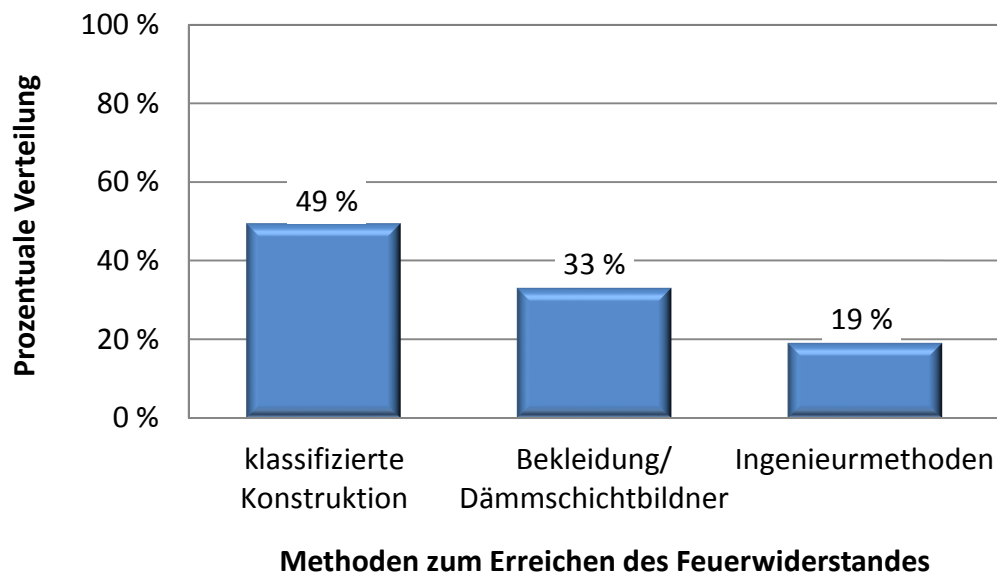


Abbildung 39: Verteilung der Nachweismethoden des Feuerwiderstandes von Foyerstützen

Die Verteilung der Maßnahmen für den baulichen Brandschutz zeigt, dass der Feuerwiderstand von über 80 % der Stützen über Standardmaßnahmen erzielt wird. *Ein Experte berichtet, dass der Brandschutznachweis von Fassadenstützen häufig über Ingenieurmethoden geführt werde. Ein anderer bestätigt, dass der Umfang von Berechnungen des erforderlichen Feuerwiderstandes nach Ingenieurmethoden sich derzeit auf ausgewählte große Sonderbauten beschränkt, wo nicht nur das Foyer, sondern das gesamte Bauwerk simuliert wird.*

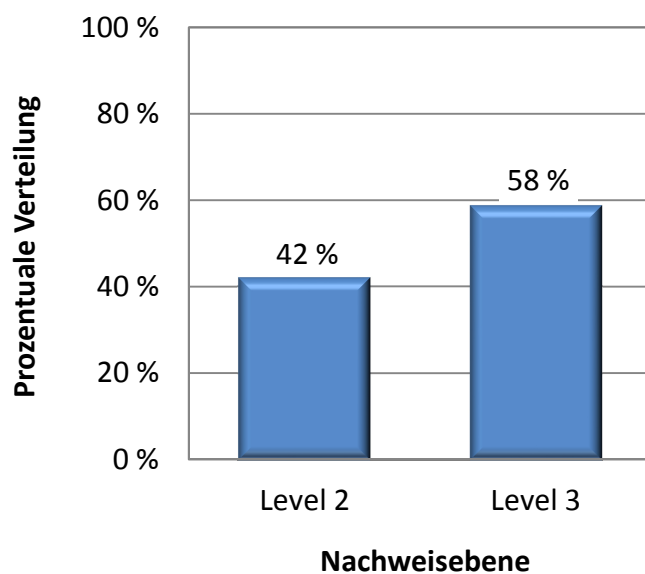
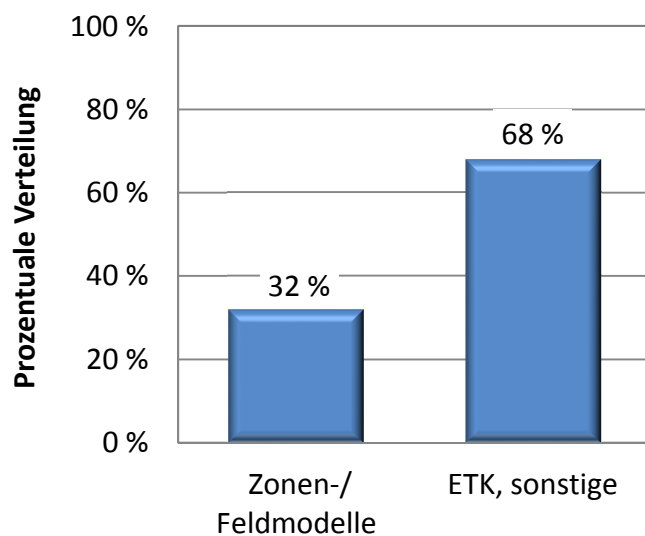


Abbildung 40: Verteilung der Nachweistufen rechnerischer Brandschutznachweise

Wird der Brandschutz rechnerisch nachgewiesen, erfolgt dies, wie Abbildung 40 zeigt, zu 58 % über allgemeine Bemessungsverfahren (Level 3) und nur zu 42 % über vereinfachte Bemessungsverfahren (Level 2).

Auf dem ersten Blick verwundert der hohe Anteil von Berechnungen mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren (Level 3). Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieses einerseits nur einen Anteil der Stützen betrifft (siehe Abbildung 39) sowie generell viele Stahlbetonstützen zum Einsatz kommen. Für beispielsweise runde Stahlbetonstützen ab 5,0 m Höhe kann der Feuerwiderstand normativ nicht mehr über Standardnachweise geführt werden. Gleichzeitig sind in vielen Programmpaketen der einschlägigen Bausoftwarehäuser bereits allgemeine Bemessungsverfahren in Verbindung mit der ETK implementiert. Diese werden daher in der Praxis häufig angewendet. Im Stahlbau hingegen ist der Standardfall zur Erfüllung der Brandschutzanforderungen die Ertüchtigung über Bekleidungen oder dämmschichtbildende Anstriche.



#### **Ermittlung der Brandraumtemperatur**

Abbildung 41: Verteilung der Rechenansätze zur Ermittlung der thermischen Einwirkungen

Für die Temperaturermittlung im Brandfall werden Zonen- und Feldmodelle zu einem Drittel herangezogen, die ETK und sonstige, empirische Modelle werden zu zwei Dritteln verwendet, wie Abbildung 41 zeigt. Es ist insgesamt zu berücksichtigen, dass ingenieurmäßige Nachweise des Feuerwiderstandes derzeit noch eine Seltenheit darstellen. Dabei wird wiederum nur ein kleiner Anteil der thermischen Einwirkungen über Zonen- oder Feldmodelle ermittelt.

### 3.6.6 Kompensationen im Brandschutzkonzept

Bei Frage 7 des Fragebogens zeigt sich, inwieweit für Foyers Abweichungen hinsichtlich der Brandschutzanforderungen in Anspruch genommen werden, jedoch unabhängig von deren Ursache. Interessant ist hier die Tatsache, dass es bei ca. jedem zweiten Foyer hinsichtlich des Feuerwiderstandes zu Abweichungen und Kompensationen kommt (siehe Abbildung 42).

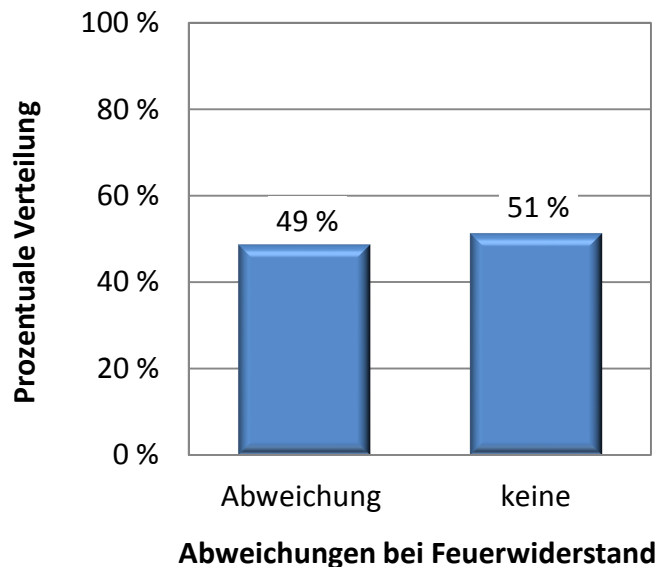


Abbildung 42: Häufigkeit von Abweichungen und Kompensationen beim Feuerwiderstand

Im Rahmen des Fragebogens wurde jedoch nicht zwischen Neubauten und Umnutzungen oder Sanierungen im Bestand differenziert. Diesbezüglich gab es einen Hinweis von einzelnen Experten: *Zahlreiche Kompensationen ergäben sich vor allem nicht aufgrund der Situation im Foyer, sondern aufgrund anderer brandschutztechnischer Defizite im Bestand. Ein rechnerischer Nachweis würde häufig zur Abminderung der Anforderungen von F90 auf F30 geführt. Kompensationen mittels Sprinklerung würden im Wesentlichen wegen der "Öffnungen in den Geschossdecken" in Verbindung mit Öffnungsflächen zum Atrium ohne bzw. mit abgeminderter Feuerwiderstandsdauer erforderlich.* Ein anderer Experte gab folgenden Hinweis: *Die Konstruktion des Atriums ist in der Regel Bestandteil der Konstruktion des normalen Geschossbaus. Ein Foyer oder Atrium im Sinne eines Lichthofes zwischen Gebäudeteilen hat häufig keine "eigenen" Stützen. Das Dach lagert auf den Bauteilen des Gebäudes, deren F-Klasse geregelt und nicht kompensierbar sei.*

Dazu ist festzustellen: In Bezug auf Foyerstützen zwischen aufgehenden Gebäudeteilen, wie Lichthöfen, wird auf Abbildung 26 verwiesen. Hier ist der

Lichthofbereich in der Tat häufig stützenfrei und das Dach lagert auf den beiden Gebäudeteilen auf. Hinsichtlich der Bauteilbemessung und der Knicklänge dieser EG-Stützen sind solche Atrien als Lichthöfe jedoch mit Stützen in aufgehenden Gebäuden durchaus vergleichbar. Die Besonderheit eines Lichthofes zwischen aufgehenden Gebäudeteilen spielt daher eher für Fragestellungen hinsichtlich der Entrauchung eine wesentliche Rolle. Mögliche Themen beziehen sich dabei auf den Verlauf der Rauchgasströme, das Ausbilden von Spill Plumes oder die raumanschließende Abschottung von angrenzenden Fluren einzelner Geschosse. Sie stellen aus tragwerkplanerischer Sicht jedoch keine neue Kategorie für die Stützen dar - weder vom statischen System noch von der Knicklänge oder der Brandlast.

### 3.6.7 Brandlasten und deren Verteilung

Frage 8 des Fragebogens (siehe Anhang H) richtet sich nach der Größe der Brandlasten in den Foyers sowie deren Verteilung. Dieses ist ein wesentlicher Aspekt zur Beschreibung von Bemessungsbrandszenarien, insbesondere im Vergleich zur Literatur (siehe auch Kapitel 2.5.4). Das Ergebnis, dargestellt auf Abbildung 43, zeigt die ganze Bandbreite von Brandlasten in Eingangsbereichen.

Dazu eine Anmerkung eines Experten: *In die Auswertung eingeflossen sind acht sehr unterschiedliche Bauvorhaben, einige davon in Hochhäusern. Hinsichtlich der Brandlasten sind die Vorhaben ebenso inhomogen.*

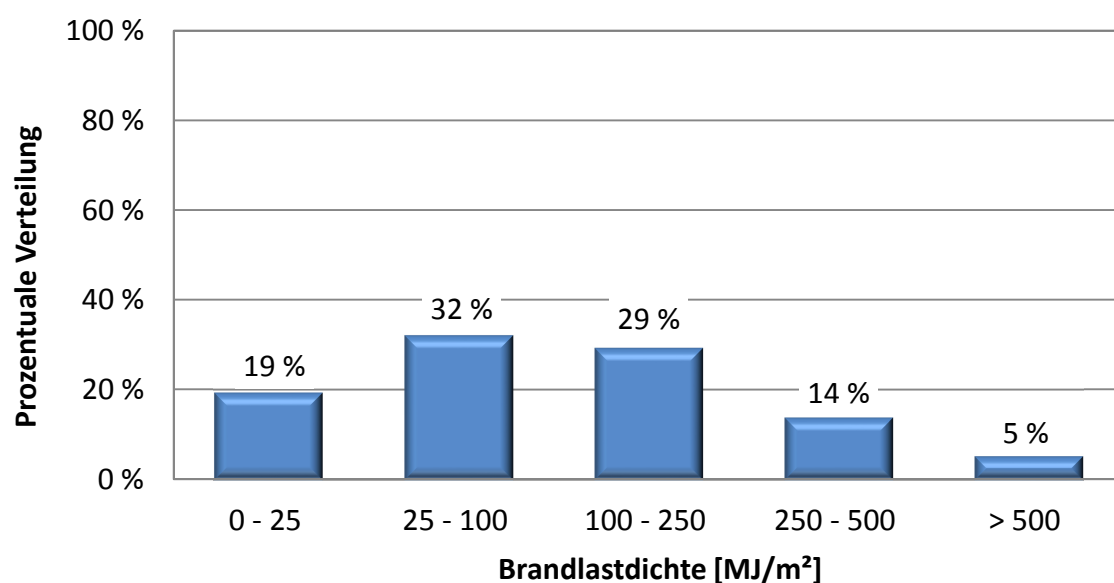


Abbildung 43: Verteilung der auftretenden Brandlastdichten [MJ/m²]

Die Durchschnittsgröße der Brandlasten beträgt nach Abbildung 43 überwiegend (zu 80 %) weniger als 250 MJ/m<sup>2</sup>. Dessen Verteilung ist dabei zu 70 % lokal konzentriert anzunehmen, wie die nachfolgende Abbildung 44 zeigt. Daraus ist abzuleiten, dass das 90 % Quantil der lokalen Brandlast einer Eingangssituation eines Büro- und Verwaltungsgebäudes innerhalb der Grenzen von „250 ≤ x<sub>90</sub> ≤ 500 MJ/m<sup>2</sup>“ liegt.

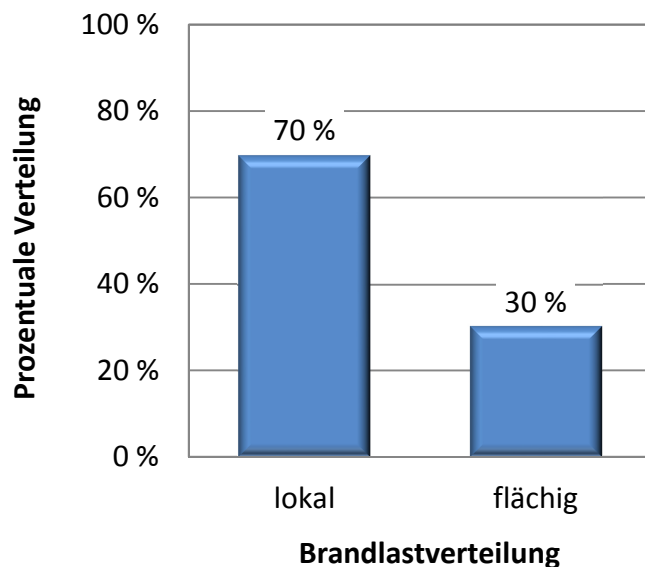


Abbildung 44: Verteilung der Brandlasten in Foyers: Flächig oder lokal konzentriert

Bei Abbildung 44 ist zu berücksichtigen, dass die Verteilung unabhängig von der Größe der Brandlastdichte angegeben wurde und stark von der jeweiligen Nutzung abhängt. Damit werden die beiden Hypothesen des Verfassers in Bezug auf die Brandlasten und deren Verteilung bestätigt und für den Rechenanteil in Kapitel 4 entsprechend berücksichtigt:

- 1.) Die Brandlastdichte ist in Atrien und Foyers von Büro- und Verwaltungsgebäuden wesentlich geringer als der pauschale Bemessungswert für Bürogebäude (584 MJ/m<sup>2</sup>) gemäß [DIN EN1991-1 2:2010].
- 2.) Gleichzeitig liegt diese Brandlast in vielen Atrien und Foyers gar nicht flächig verteilt vor, sondern zu mehr als zwei Dritteln lediglich lokal konzentriert.

### 3.6.8 Anlagentechnik

Frage 9 bezieht sich auf die sicherheitstechnische Infrastruktur. Im Rahmen des Sicherheitskonzeptes gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] wird auch die vorhandene

Sicherheitstechnik berücksichtigt. Diese Frage soll daher einen Aufschluss darüber geben, mit welcher brandschutztechnischen Anlagentechnik diese Gebäude-teile grundsätzlich ausgestattet sind. Als Auswahlmöglichkeit stehen neben „keiner Anlagentechnik“ noch „Brandmeldeanlagen“ (BMA), „Rauch- und Wärmeabzüge“ (RWA) und Feuerlöschanlagen (Sprinklerung) zur Verfügung (siehe Abbildung 45).

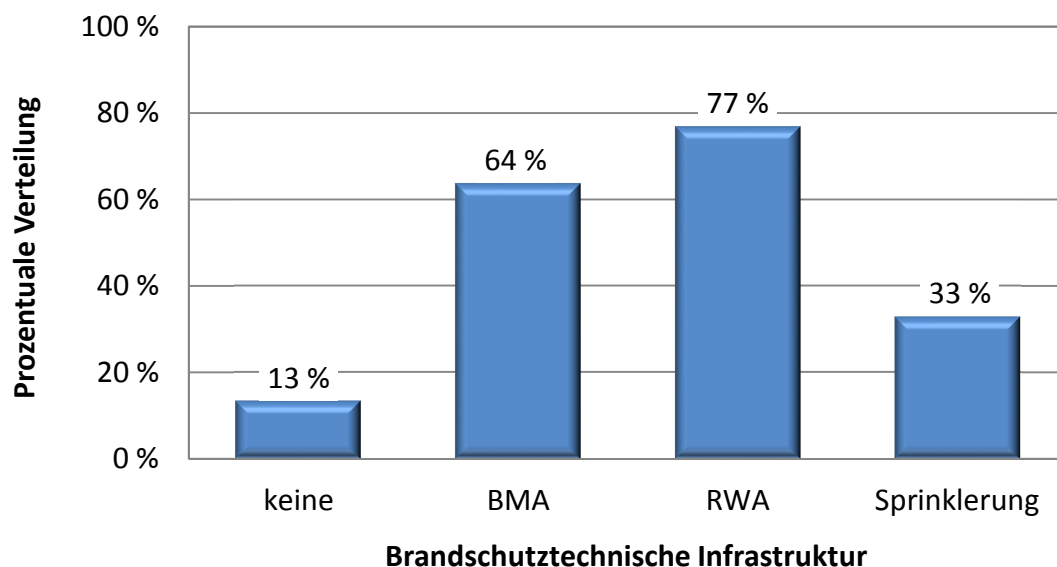


Abbildung 45: Vorhandene brandschutztechnische Infrastruktur in Atrien und Foyers

Über 60 % der Foyers sind demnach mit Brandmeldetechnik ausgestattet. Dieser Wert erscheint für einen solchen Gebäudebereich zunächst relativ hoch und spricht für überwachte Rettungswege. Vermutlich ist aber die BMA hier in Verbindung mit anderer Sicherheitstechnik zu sehen, möglicherweise als geforderte Verknüpfung der Systeme zum Beispiel mit Rauch- und Wärmeabzügen. Diese sind hier zu fast 80 % vorhanden. Dabei wurde nicht zwischen offenbaren Fenstern oder Oberlichtern in der Fassade und expliziten Lichtkuppeln für den Rauchabzug unterschieden. Zwischen natürlicher und maschineller Entrauchung wurde im Rahmen der Umfrage ebenfalls nicht differenziert.

Etwa ein Drittel der Foyers sind laut Umfrage gesprinklert. Dieser verhältnismäßig hohe Wert überrascht für Büro- und Verwaltungsgebäude. Der Versuch einer Erklärung deutet in Richtung der [MVStättV2005]. Möglicherweise werden einige dieser Gebäudeteile nicht nur als Versammlungsstätte bewertet, weil die vorgesehene Nutzung dem entspricht, sondern weil nicht das Gegenteil bewiesen werden konnte. Sofern dann noch Rettungswege hierüber verlaufen, ergibt sich die bauordnungsrechtliche Anforderung an eine Feuerlöschanlage (siehe auch Kapitel 2.2.1). Alternativ



werden so auch die Öffnungen in den Geschossdecken von mehrgeschossigen Foyers kompensiert, was auch von einigen Experten beschrieben wird: *Eine Sprinklerung wird als Kompensation für die "Öffnungen in den Geschossdecken" in Verbindung mit vertikalen Öffnungsflächen zum Atrium zugrunde gelegt. Dabei kann zum Beispiel die Fassade zum Atrium ohne oder mit reduzierter Feuerwiderstandsdauer ausgebildet werden.* Weitere Anmerkungen von Experten geben ebenfalls einen Erklärungsansatz für den relativ großen Prozentsatz an Feuerlöschanlagen: *Die Aussagen treffen für typische Foyers in Büro- und Verwaltungsgebäuden (überwiegend Hochhäuser) im Rhein-Main-Gebiet zu.* Ein anderer berichtet: *In die Auswertung eingeflossen sind acht sehr unterschiedliche Bauvorhaben, einige davon in Hochhäusern, was die aufwändige Anlagentechnik erklärt.* Hier zeigt sich die bereits erwähnte Bandbreite der zugrundeliegenden Projekte bis über die Hochhausgrenze hinaus. Unter anderem aus Fragebögen, wie der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte (siehe Anhang H), erklärt sich der relativ hohe Anteil an Sprinkleranlagen.

### 3.6.9 Stichprobengröße – Projektumfang

Um die Antworten überhaupt bewerten und gewichten zu können, ist die Größe der einzelnen Stichproben wesentlich (Frage 10 gemäß Fragebogen im Anhang H). Dadurch kann anteilig berücksichtigt werden, für wie viele Gebäude oder Projekte die Antworten eines einzelnen Experten gelten. Außerdem wird so die Grundgesamtheit der Stichprobe deutlich und gibt eine quantitative Tendenz, wie repräsentativ die Befragung ist. Gleichwohl ist eine große Stichprobe allein kein Indiz für ihre Validität. Erst aus der Kombination aus Qualität und Quantität der Aussagen wird ersichtlich, wie aussagekräftig eine Umfrage ist.

Den Ergebnissen liegen insgesamt 1193 Bauvorhaben zugrunde (siehe Abbildung 46). Die Stichprobengröße ergibt sich aus der Projekterfahrung bzw. dem Projektumfang der 40 auswertbaren Fragebögen dieser Befragung. Da nicht jede Frage von allen beantwortet wurde, sind die einzelnen Fragen auch nur entsprechend der jeweils beantworteten Anzahl ausgewertet worden. Bis auf Frage 6a und 6b lag die Antwortquote jedoch stets über 90 %.

Nachfolgendes Beispiel zeigt, wie in Zweifelsfällen ein Fragebogen anteilig gewertet wurde: *Gemäß vorliegender Erfahrung werden Foyers und Atrien seltener in Büro- und Verwaltungsgebäuden - eher in Krankenhäusern, Pflegeheimen, Schulen, Hotels, Theatern, Kinos (Versammlungsstätten) geplant und ausgeführt. In der von mir*

genannten Anzahl von 60 Projekten sind nur etwa 10 % Foyers in Büro- und Verwaltungsgebäuden enthalten.

Die Zusammenhänge sind dem Verfasser durchaus bewusst. Aber gerade in Versammlungsstätten gelten andere Randbedingungen als die, die hier im Fokus stehen. Beispielsweise handelt es sich bei Versammlungsstätten per Definition (siehe auch Kapitel 2.2.1) eindeutig um Aufenthaltsräume. Damit verknüpft liegen z.B. höhere Brandlasten vor als in reinen Durchgangsräumen im Sinne einer Eingangshalle. Außerdem gibt es dabei im Hinblick auf die Brandschutzanforderungen an Rettungswege, Anlagentechnik und an die Bauteile baurechtliche Konsequenzen. Um den Parameterbereich zu konkretisieren und damit den Umfang der Problemstellung einzugrenzen, wird der Fokus besonders auf spärlich möblierte Eingangsbereiche wie Foyers, Lobbies und Eingangshallen gerichtet. Das hat insbesondere Einfluss auf die sich daraus ergebenden Brandszenarien. Daher ist der Projektumfang des betreffenden Fragebogens entsprechend der angestrebten thematischen Eingrenzung auch nur mit sechs<sup>7</sup> in die Bewertung mit eingeflossen.

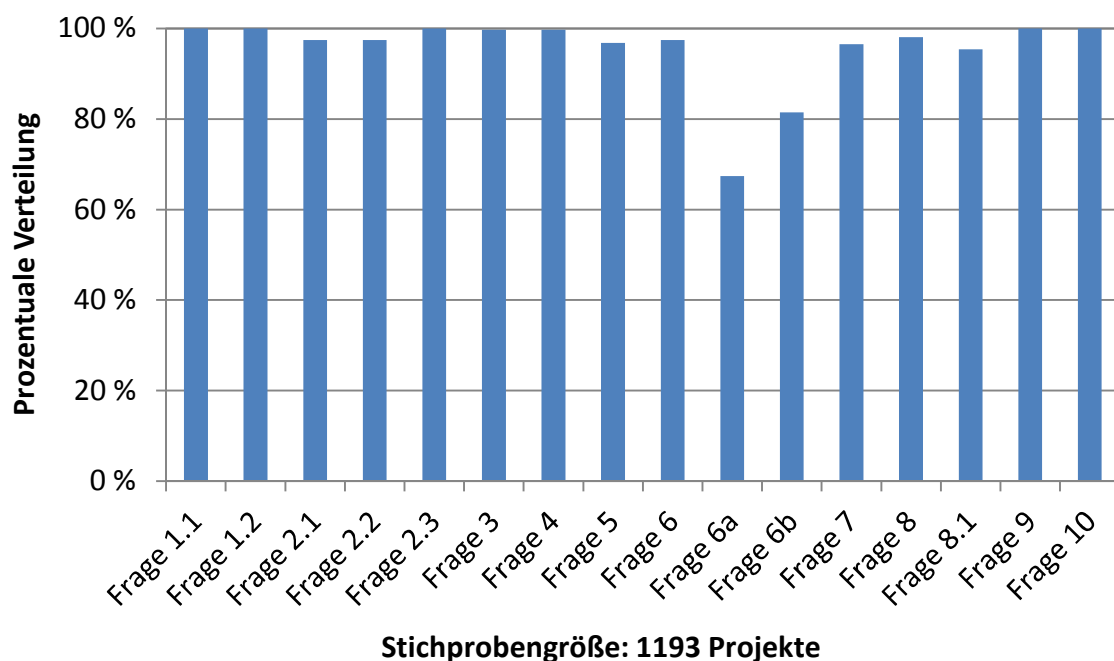


Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Antworten und Stichprobengröße

<sup>7</sup> 10% von 60 Projekten ergibt sechs Projekte, die in die Bewertung mit einfließen.

## 3.7 Ergänzende Befragungen von Versicherungen und Feuerwehren

### 3.7.1 Befragung der Versicherungen

Um neben den erhobenen Gebäude- bzw. Projektdaten auch Daten über vergangene Brandereignisse zu gewinnen, um daraus gegebenenfalls Rückschlüsse zu Brandentstehungswahrscheinlichkeiten ableiten zu können, wurden zusätzlich große Gebäudeversicherungen befragt. Die fernmündliche Befragung nach vorheriger E-mailkorrespondenz durch den Verfasser hat jedoch einstimmig ergeben, dass eine Erfassung von Bränden im erhofften Maße nicht stattfindet, ergo eine differenzierte Auswertung von Schadensfällen für diesbezügliche Fragestellungen nicht möglich ist. Versicherungen erfassen lediglich, bei welchem Versicherungsnehmer, welcher Schaden aufgetreten ist und wie viel reguliert wurde (Schadenssumme). Differenzierter, also wo innerhalb eines Gebäudes oder einer Firma ein Brandschaden aufgetreten ist, wird dabei statistisch leider nicht mit erfasst. Außerdem stellen Atrien oder Foyers nach Lesart der Versicherer keine eigene Gebäudenutzung dar und werden demgemäß bei der Bewertung der Feuerversicherer bisher nicht gesondert erfasst. Das gilt für die großen Sachversicherer genauso, wie für den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, der das beschriebene Vorgehen schriftlich bestätigte, so dass sich hieraus keine Auftretenswahrscheinlichkeiten von Bränden in Atrien und Foyers ableiten lassen.

### 3.7.2 Befragung der Feuerwehren

Neben der Befragung der Sachversicherer wurden zusätzlich noch einige Berufsfeuerwehren in Deutschland angeschrieben und fernmündlich zum Thema „Erfahrungen mit Bränden in Atrien und Foyers“ interviewt. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Berufsfeuerwehr Bremen: Hier kann zwar nicht genau beziffert werden, wie viele Brände es in den letzten 12 Jahren gegeben hat, jedoch lässt sich im Rahmen der Berufserfahrung des Ansprechpartners und seines Kollegiums mindestens qualitativ konstatieren, dass lediglich einzelne wenige Entstehungsbrände mit überschaubaren Schäden zu beziffern sind. Über den sogenannten *Papierkorbbrand* ging es nicht hinaus, was jedoch nur mündlich überliefert ist (Stand August 2013).

Berufsfeuerwehr Hamburg: Weder der Leiter des vorbeugenden Brandschutzes noch der Leiter der Einsatzabteilung noch das Kollegium aus der Berufsfeuerwehr Hamburg können einen Atriumbrand benennen, bei dem es ein Brandereignis über einen Entstehungsbrand hinaus (beispielsweise infolge einer brennenden Zigarette in einem Papierkorb oder einem Pflanztrog) gegeben hätte. Gleichzeitig ist selbst das Auftreten von Entstehungsbränden in solch besonderen Nutzungen wie Eingangshallen und Foyers als sehr selten zu beziffern. Da die Feuerwehren Hamburgs zwar seit Ende der 1980er Jahre ihre Einsatzberichte elektronisch verfassen, aber gleichzeitig keine Details mehr wie „*Papierkorbbrand in Eingangshalle*“ oder Ähnliches mit aufführen, kann auf solche Informationen leider nicht zurückgegriffen werden. Eine elektronische Auswertung dieser Informationen ist daher nicht möglich. Damit können die qualitativen Aussagen der Experten statistisch nicht quantifiziert werden (Stand September 2013).

Berufsfeuerwehr Hannover: Hier ist seit 1979 kein Fall bekannt, bei dem es einen Brand in einer solchen Eingangssituation eines Atriums oder Foyers gegeben hätte. Leider geht diese Information nicht aus auswertbaren Einsatzberichten hervor, sondern besteht nur mündlich. Diese Aussage ist allerdings valide, da der zuständige Ansprechpartner seit 1979 in der Einsatzplanung bei der Berufsfeuerwehr Hannover tätig ist (Stand August 2013).

Berufsfeuerwehr Frankfurt: Rein qualitativ kann auch aus Frankfurt bestätigt werden, dass Feuerwehrlöscheinsätze in diesen Gebäudebereichen sehr selten sind. Auch innerhalb der Feuerwehr ist kein Fall, auch nicht anhand mündlicher Überlieferung innerhalb des Kollegiums, bekannt, bei dem es einen signifikanten Brand, über einen Entstehungsbrand hinaus, gegeben hätte. Statistisch erfasst wurden diese Details jedoch nicht. Allerdings läuft derzeit ein Pilotprojekt (siehe auch [Hegger2014]), bei dem nach Löscheinsätzen ein Erfassungsbogen ausgefüllt wird, wodurch eine gewisse Brandursachenermittlung über das Strafrecht hinaus möglich wird. Bisher erfolgt eine Brandursachenermittlung lediglich, sofern strafrechtliche Belange befürchtet werden. Auf Hinweis des Verfassers soll der Gebäudebereich Atrium oder Eingangshalle als Antwortmöglichkeit eventuell mit aufgenommen werden (Stand Oktober 2013).

Berufsfeuerwehr München: Auch hier werden statistische Daten aus Bränden nur hinsichtlich des abwehrenden Brandschutzes erfasst: *Bsp. Kleinf Feuer oder Entstehungsbrand gelöscht, kein Vollbrand, Feststoffbrand (A) und Einsatzort.*

Eine differenzierte Auswertung von Einsätzen, insbesondere hinsichtlich des vorbeugenden Brandschutzes bzw. eine sogenannte Brandursachenermittlung, was gebrannt hat, an welcher Stelle in einem Gebäude der Brand ausbrach und wie der Brandverlauf war oder womöglich warum es brannte, findet in Deutschland seit ca. 60 Jahren nicht mehr statt. Gleichzeitig kann der zuständige Ansprechpartner auch hier aus seiner persönlichen, 23-jährigen Erfahrung bei der Feuerwehr kein Brandereignis benennen, bei dem es in einem Atrium einen außergewöhnlichen Brand gegeben hätte. Das gilt auch für die mündliche Überlieferung innerhalb des Kollegiums. Das Löschen von Entstehungsbränden in Pflanzkübeln oder Papierkörben findet keine besondere Erwähnung, ergo wird es auch nicht statistisch erfasst (Stand September 2013).

**Fazit:**

Der subjektive Eindruck der Feuerwehren aus München und der anderen Städte bestätigt daher auch nur qualitativ den Gesamteindruck des Verfassers:

*Alle (wenigen) Brände in deutschen Atrien und Foyers konnten in den letzten Jahrzehnten stets rasch gelöscht werden. Bauteilgefährdende Größenordnungen wurden dabei nicht annähernd erreicht.*

**3.7.3 Wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtungen**

Qualitativ ist nach der Befragung der Feuerwehren festzuhalten, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit von Foyerbränden in Büro- und Verwaltungsgebäuden offenbar signifikant geringer ist, als die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden in einer Nutzungseinheit eines Büro- und Verwaltungsgebäudes insgesamt. Der Zusammenhang wird auch in Tabelle 5 in qualitativer Form hervorgehoben.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, wie sich auf Basis des Sicherheitskonzeptes im Nationalen Anhang BB.5 des Eurocodes (siehe auch Kapitel 2.3.7) die rein qualitativen Aussagen der Feuerwehrleute quantitativ auf die Bemessungswerte der Brandlasten und der Wärmefreisetzungsrate möglicher Brandszenarien auswirken würden, sofern andere Rechenwerte zugrunde gelegt werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{fi}$  für die beiden Einflussgrößen der Brandwirkung (Brandlastdichte und Wärmefreisetzungsrate) hängen unter Berücksichtigung des Zuverlässigkeitsindex von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes und der Ausfall-

wahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung ab.<sup>8</sup> Das Ergebnis kann Abbildung 47 entnommen werden:

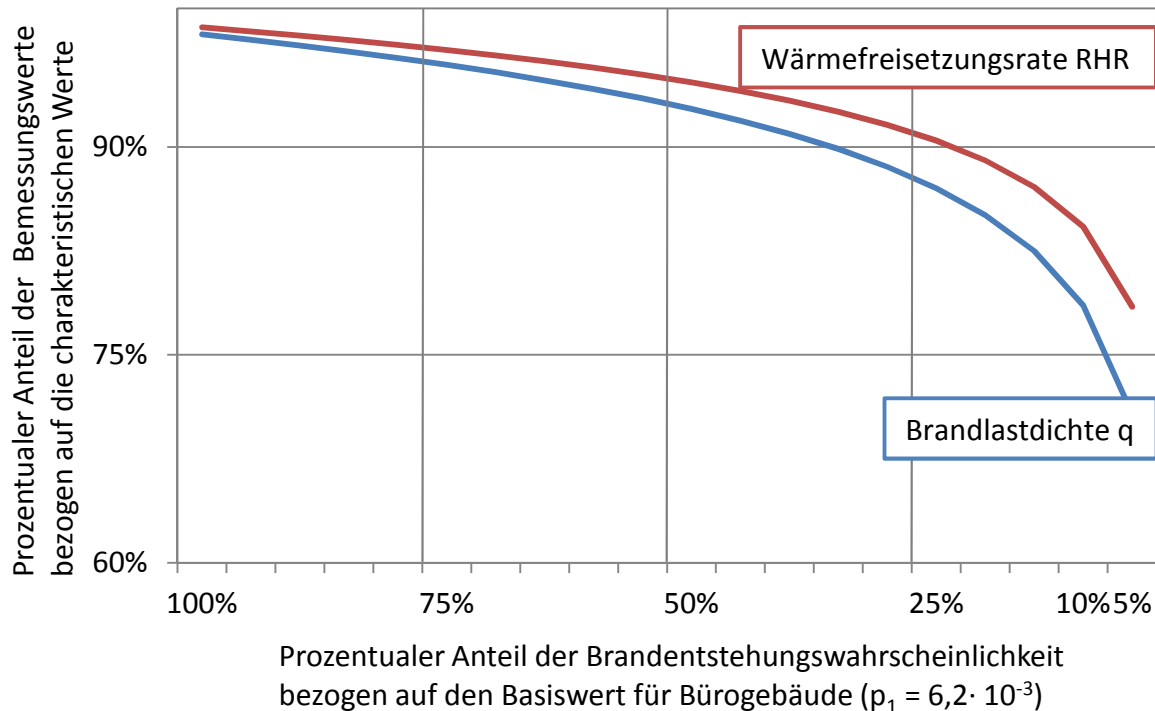


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen der Brandentstehungswahrscheinlichkeit und den Bemessungswerten von Brandlastdichte ( $q$ ) und Wärmefreisetzungsrate (RHR) gemäß Sicherheitskonzept von [DIN EN 1991-1-2/ NA]

Halbiert sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes ( $p_1$ ) in einem Bürogebäude, so reduziert sich die Bemessungsbrandlast nur auf 92,7 % des charakteristischen Wertes der Brandlast. Bei einer unterstellten, lokal begrenzten, charakteristischen Brandlast von beispielsweise  $400 \text{ MJ/m}^2$ , ergibt sich (ohne Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität) eine Bemessungsbrandlast von  $371 \text{ MJ/m}^2$ . Wird die Brandentstehungswahrscheinlichkeit auf ein Zehntel des Ausgangswertes gesetzt, reduziert sich die Bemessungsbrandlast auf 78,6 %, was in diesem Beispiel  $314 \text{ MJ/m}^2$  entspricht. Analog dazu verhält sich auch der Bemessungswert der Wärmefreisetzungsrate. Wird die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes  $p_1$  noch weiter reduziert, so endet bei 4,3 % des Ausgangswertes der Anwendungsbereich dieses Sicherheitskonzeptes. Der Wert von  $p_1 = 0,043 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}$  führt bei nicht gesprinklerten Bürogebäuden mit einer öffentlichen Feuerwehr zu einer bedingten Versagenswahrscheinlichkeit von

<sup>8</sup> Dabei wird  $p_{2,1}$  mit 0,5 angenommen und  $p_{2,2}$  mit 0,2.

$p_{f,fi} = 4,99 \cdot 10^{-1}$  und einem damit verknüpften Zuverlässigkeitsindex von  $\beta_{fi} = 0,00$ . Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Sicherheitskonzept insbesondere für Vollbrandszenarien entwickelt wurde. Für lokale Brandszenarien liefert es entsprechend konservative Ergebnisse.

### 3.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundzüge der Datenerhebung sowie die Ergebnisse der Datenerhebungen beschrieben. Eine direkte Datenerfassung wurde nicht durchgeführt, die Begründung wird erläutert. Stattdessen wurde eine Delphi-Befragung durchgeführt. Der dabei erreichte Stichprobenumfang von über 1000 Beispielen wäre bei einer selbst durchgeführten, direkten Datenerfassung niemals erreicht worden. Verbunden mit der Tatsache, dass die Befragten fachkundige Experten sind, kann das Ergebnis dieser Expertenbefragung im Rahmen der Grenzen, die die Delphi-Methode mit sich bringt, als durchaus repräsentativ bezeichnet werden. Die Befragung gibt als Datenfundus einen guten Überblick über die Charakteristiken von Atrien und Foyers in Deutschland.

Die in Kapitel 2.5.2 vorgenommene Einteilung der Eingangssituationen in Kategorien in Abhängigkeit von der Stützenlänge wurde durch die gleichmäßige prozentuale Verteilung indirekt bestätigt. Außerdem ergab sich, dass in Atrien und Foyers überwiegend lokal konzentrierte Brandlasten vorliegen. Ferner konnte in Bezug auf die Brandlastdichte abgeleitet werden, dass das 90 % Quantil der lokalen Brandlast einer Eingangssituation in Büro- und Verwaltungsgebäuden innerhalb der Grenzen von „ $250 \leq x_{90} \leq 500 \text{ MJ/m}^2$ “ liegt. Das wird bei den numerischen Untersuchungen in Kapitel 4 entsprechend berücksichtigt.

Weiterhin ergab sich dabei, dass die befragten Versicherungen keinerlei Brandstatistik führen. Die Fallerkassungen der Feuerwehren sind wiederum nicht detailliert genug, um wahrscheinlichkeitstheoretische Aussagen zu liefern. Dennoch geben die Aussagen der Feuerwehren zumindest rein qualitativ eine klare Tendenz: Es brennt in diesen Gebäudebereichen sehr selten mit einem offenkundig sehr geringen Schadensausmaß. Die Auswirkungen aus dieser Tatsache auf das Sicherheitskonzept des Eurocodes wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Es zeigte sich, dass eine reduzierte Brandentstehungswahrscheinlichkeit dazu führt, dass sich die Bemessungswerte der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlastdichte reduzieren (siehe Abbildung 47).

## 4 Numerische Untersuchungen

### 4.1 Einleitung

Um die besondere Bemessungssituation einer geringen Brandlast im Verhältnis zur betrachteten Bezugsfläche hervorzuheben, wird einleitend für eine Foyersituation die äquivalente Branddauer gemäß [DIN 18230] berechnet. Auch wenn Atrien und Foyers von Büro- und Verwaltungsgebäuden ausdrücklich nicht den Charakteristiken von Industriebauten entsprechen und auch nicht nach der [M-IndBauRL] bewertet werden sowie dadurch auch explizit vom Anwendungsbereich der [DIN 18230] ausgeschlossen sind, wird das Verfahren nach der äquivalenten Branddauer hier bewusst angewendet. Um dabei den rechnerischen Einfluss einer lokalen Brandlast in Form einer Sitzgruppe oder eines Empfangstresens in Relation zur gesamten Grundfläche nicht absichtlich zu reduzieren, wird hier ein überschaubares Foyer mit einer durchschnittlichen Größe von 100 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt.

#### Beispiel: Foyer mit A = 100 m<sup>2</sup>

nur lokale Brandlast auf $A_f \approx 9 \text{ m}^2$	$q_R = 83,3 \text{ kWh/m}^2$ (300 MJ/m <sup>2</sup> )
flächig nahezu brandlastfrei	$q_{R,\min} = 15 \text{ kWh/m}^2$ (Mindestbrandlast)
keine Sicherheitstechnik	$\alpha_L = 1,0$
hohe Anforderung (primäres Tragglied)	$\gamma = 1,0$

#### globaler Nachweis:

Gesamtbrandlast:	$q_R = 0,91 \cdot 15 \text{ kWh/m}^2 + 0,09 \cdot 83,3 \text{ kWh/m}^2$ $= 21,15 \text{ kWh/m}^2$
Umfassungsbauteile:	2 Seiten Stahl / Glas, 2 Seiten Mauerwerk / Beton $\Rightarrow c = (0,15 + 0,2) / 2 = 0,175$
Wärmeabzugsfaktor:	Raumhöhe = 5 m $ah = 1 \%$ und $av = 5 \%$ $\Rightarrow w = 1,785$
Äquivalente Branddauer:	$t_{\ddot{a}} = q_R \cdot c \cdot w = 6,61 \text{ min}$
erforderliche Feuerwiderstandsdauer:	erf. $t_F = t_{\ddot{a}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L = 6,61 \text{ min}$ $< 15 \text{ min} \Rightarrow$ <u>ohne Feuerwiderstand</u>

Zusätzlich zum globalen Nachweis wird nachfolgend der Teilflächennachweis geführt.



**Teilflächennachweis:**Brandlast auf  $A_f = 9 \text{ m}^2$ :

$$q_{RT} = 83,33 \text{ kWh/m}^2 \text{ (300 MJ/m}^2\text{)}$$

$$q_{RT} > 1,6 q_R \text{ (33,84 kWh/m}^2\text{)}$$

$$c = (0,15 + 0,2) / 2 = 0,175$$

$$w_T = 1,785 (0,45 + 0,1) = 0,98$$

Äquivalente Branddauer ( $q_{300}$ ):

$$t_{\ddot{a}} = q_{RT} \cdot c \cdot w_T = 14,29 \text{ min}$$

erforderliche Feuerwiderstandsdauer:

$$\text{erf. } t_F = t_{\ddot{a}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L = 14,29 \text{ min}$$

$$< 15 \text{ min} \Rightarrow \underline{\text{ohne Feuerwiderstand}}$$

Bei Vergrößerung der Brandlastdichte von  $300 \text{ MJ/m}^2$  auf  $400 \text{ MJ/m}^2$  ergibt sich beim Teilflächennachweis ein erforderlicher Feuerwiderstand von F30, feuerhemmend:

Äquivalente Branddauer ( $q_{400}$ ):

$$\text{mit } q_{RT} = 111,11 \text{ kWh/m}^2 \text{ (400 MJ/m}^2\text{)}$$

$$t_{\ddot{a}} = q_{RT} \cdot c \cdot w_T = 19,05 \text{ min}$$

erforderliche Feuerwiderstandsdauer:

$$\text{erf. } t_F = t_{\ddot{a}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L = 19,05 \text{ min}$$

$$15 \text{ min} < \text{erf. } t_F < 30 \text{ min} \Rightarrow \underline{\text{F30}}$$

Das Ergebnis des globalen Nachweises und auch des Teilflächennachweises zeigt, dass die vorliegende **Brandlast** in Relation zu den geometrischen Verhältnissen als **gering** zu bezeichnen ist. Eine vergleichbare Situation wäre folglich im Industriebau ohne Feuerwiderstand bzw. in feuerhemmender Bauweise ausführbar. Damit wird die Grundtendenz einer unterdurchschnittlich großen Brandlast in Eingangsbereichen von Geschossbauten zumindest qualitativ hervorgehoben und unterstrichen.

Da dieses Verfahren, wie beschrieben, für hochbauübliche Nutzungen außerhalb des Industrieaus nicht anwendbar ist, werden nachfolgend die Auswirkungen aus einem brandlastarmen Eingangsbereich auf die Stützenbemessung im Brandfall numerisch untersucht. Auf Basis des in Kapitel 2 dargestellten Standes der Erkenntnisse sowie aus den Erfahrungen der in Kapitel 3 präsentierten Datenerhebungen werden die Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf Brandszenarien und Bauteilwiderstände anhand der nachfolgenden numerischen Berechnungen untersucht. Zunächst werden einige Berechnungen hinsichtlich der Brandraumtemperaturen durchgeführt. Diese Bemessungsbrandszenarien dienen als Grundlage für die anschließenden thermischen und strukturmechanischen Analysen der Stützenbemessung im Brandfall auf Basis von vereinfachten und allgemeinen Berechnungsverfahren.

## 4.2 Abmessungen, Geometrie und Öffnungen der Foyers

Für die numerischen Untersuchungen dieses Kapitels werden zunächst die Randbedingungen und der Parameterbereich festgelegt. Mit der Tatsache, dass die untersuchten Brandraumvolumina eine gewisse Mindestgröße aufweisen, geht eine ausreichende Ventilation einher. Bei den rechnerischen Untersuchungen wird daher von brandlastgesteuerten Bränden ausgegangen. Volumen und Ventilation werden dabei entsprechend vorausgesetzt. Die Knicklänge der jeweils untersuchten Stütze entspricht der jeweiligen Raumhöhe und wird bei den numerischen Berechnungen entsprechend der Kategorie und der Auflast variiert, wie in Kapitel 2.5.3 und 3.6.1 dargestellt.

Im Rahmen des vereinfachten Berechnungsverfahrens (Level 2) werden neben Hohlprofilen auch I-Profile untersucht (siehe Tabelle 6). Aufgrund der architektonischen Bedeutung von Atrien und Foyers ist jedoch der Einsatz von Hohlprofilen wahrscheinlicher, weshalb insbesondere diese im Rahmen des allgemeinen Berechnungsverfahrens (Level 3) näher untersucht wurden. Im Rahmen der Vorbemessung werden alle Stützenprofile stets so dimensioniert, dass der maßgebende Ausnutzungsgrad bei Raumtemperatur (hier: Biegeknicknachweis) ca. 80 % beträgt. Daraus ergaben sich bei den untersuchten Stützenquerschnitten der Kategorien 1 und 2 jeweils Ausnutzungsgrade beim Spannungsnachweis in der Größenordnung zwischen 50 und 80 % (siehe Tabelle 8 bis Tabelle 10).

Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Stützenprofile in Abhängigkeit von der Foyerkategorie und der gewählten Rechenebene im Brandfall

	<b>Kategorie 1</b>	<b>Kategorie 2</b>	<b>Kategorie 3</b>
	kleines, ein- geschossiges Foyer in aufgehendem Gebäude	mittleres, mehr- geschossiges Foyer in aufgehendem Gebäude	Großes Foyer in eingeschossigem Atrium
Höhe/ Knicklänge	5,0 m	8,4 m	12,0 m
Stützenquerschnitte (Level-2 Berechnung)	<b>RO 406,4 x 45</b> (S235) <b>HD 400 x 463</b> (S235)	<b>RO 406,4 x 45</b> (S235) <b>HD 400 x 551</b> (S235)	<b>323,9 x 5,0</b> (S235) <b>323,9 x 10</b> (S235) <b>HE 300-A</b> (S235) <b>HE 300-B</b> (S235)
Stützenquerschnitte (Level-3 Berechnung)	<b>RO 406,4 x 45</b> (S235)	<b>RO 406,4 x 45</b> (S235)	<b>323,9 x 5,0</b> (S235)

Für die Ermittlung lokaler Temperaturen von Bränden spielt die Geometrieform des Atriums eine eher untergeordnete Rolle. Daher wird die Geometrie vereinfacht **viereckig** angenommen. Beispielsweise sind Phänomene, wie die Strömungen von Rauchgasen aufgrund der Ventilation innerhalb des Foyers, eher für andere Fragestellungen – primär hinsichtlich der Entrauchung – von Interesse. Die Größe wird in Anlehnung an Abbildung 31 innerhalb von 100 m<sup>2</sup> und 200 m<sup>2</sup> variiert. Wesentlich ist in dem Zusammenhang dass es in Verbindung mit der korrespondierenden Höhe und Ventilation zu einem brandlastgesteuerten, lokalen Brand kommt, wie es in dieser Arbeit unterstellt wird.

### 4.3 Mechanische Einwirkungen

Je nach Art des Gebäudeteils, in dem sich eine Stütze befindet, richten sich deren mechanische Einwirkungen. Für den Brandfall gilt die außergewöhnliche Einwirkungskombination gemäß [DIN EN 1991-1-2]. Handelt es sich um eine Stütze in einem aufgehenden Gebäude als Primärtragglied, ist im Erdgeschoss von einer sehr hohen Auflast auszugehen. Über die Geschosse addiert sich das Eigengewicht der Konstruktion zzgl. aller Ausbau- und Verkehrslasten des Lasteinflussbereiches. Hingegen weisen Stützen in einem freistehenden Atrium eine verhältnismäßig geringe Auflast auf. Deren Auflast geht häufig über das Eigengewicht des Daches mit partiellem Schneeanteil und der Stütze selbst nicht hinaus. Für die Querschnittsdimensionierung einer Geschosstütze ist die Auflast der maßgebende Einflussfaktor. Bei hohen, eingeschossigen Baukörpern ist die Knicklänge der maßgebende Einflussfaktor für die Stützenquerschnittsdimensionierung. Bezüglich der ausführlichen Lastzusammenstellung wird auf den Anhang I verwiesen. Für die rechnerischen Nachweise werden abhängig vom Einbauort und der Knicklänge beispielhaft folgende Bemessungslasten unterstellt:

<u>Foyerstütze (5,0 m):</u>	$G_k/Q_k = 4766/1458$ [kN],	$(G+Q)_d = 8621$ kN, $(G+Q)_{d,fi} = 5495$ kN
<u>Foyerstütze (8,4 m):</u>	$G_k/Q_k = 4077/1256$ [kN],	$(G+Q)_d = 7388$ kN, $(G+Q)_{d,fi} = 4705$ kN
<u>Atriumstütze (12 m):</u>	$G_k/Q_k = 233/77$ [kN],	$(G+Q)_d = 425$ kN, $(G+Q)_{d,fi} = 245$ kN

## 4.4 Brandlast und Brandszenario

### 4.4.1 Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels Zonenmodell

Aufgrund der hier betrachteten geometrischen Verhältnisse sowie der vorhandenen Brandlasten ist nicht von Vollbrandszenarien auszugehen. Dies wird zunächst anhand eines Zonenmodells gezeigt.

Für die Bemessung einer Stütze bei lokaler Brandbeanspruchung wird nachfolgend überprüft, in wieweit die Annahme von flächig verteilten Brandlasten sowie die Verwendung eines Zonenmodells (hier: *OZone*<sup>9</sup>) für die Ermittlung der maßgebenden Brandraumtemperaturen zielführend ist. Folgende Randbedingungen werden bei den Berechnungen mit *OZone* berücksichtigt:

- Die Brandraumhöhe wird variiert, wie beschrieben: 5,00 m, 8,40 m und 12,0 m.
- Die Grundfläche bleibt konstant, beispielhaft wird der Grundriss gemäß Abbildung 48 zugrunde gelegt und jeweils mit den genannten Geschosshöhen und Brandlasten kombiniert.

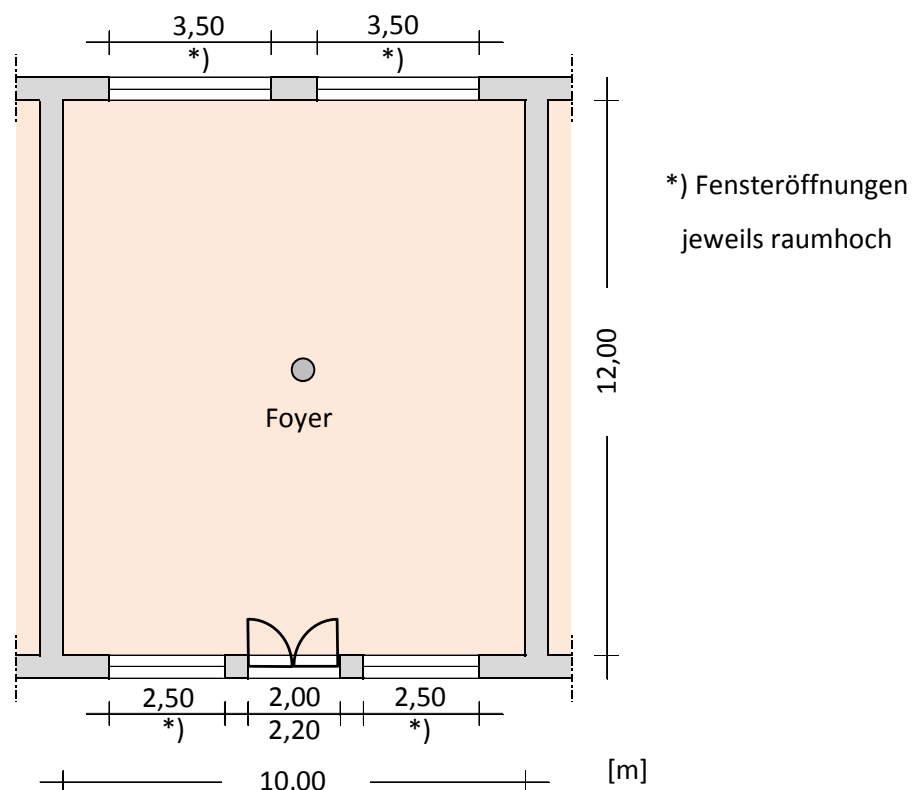


Abbildung 48: Bauliche Situation als Grundlage für das Zonenmodell

<sup>9</sup> *OZone* ist ein Zonenmodell, welches im Rahmen des NFSC an der Universität Lüttich von Cadorin et al entwickelt wurde, siehe auch [Cadorin2001], [Cadorin2003a] und [Cadorin2003b].

- Annahme der Ventilationsöffnungen:
  - Tür ist konstant offen (Zuluft)
  - Fensteröffnungen in der Fassade zerbrechen bei 400 °C (Abluft).
- Brandlastdichte und -verteilung werden in Anlehnung an [Schleich2001] bzw. [DIN EN1991-1-2/NA:2010], [DAS019], [Culver1976] und [Hosser2009] variiert und jeweils als Bemessungswerte  $q_{f,d}$  in *OZone* angesetzt:
  - über die Grundfläche verteilt: 139 MJ/m<sup>2</sup>, 162 MJ/m<sup>2</sup> und 300 MJ/m<sup>2</sup>
  - lokal konzentriert (9 m<sup>2</sup>): 400 MJ/m<sup>2</sup>.
- Plumemodell nach Heskestad mit RHR von 0,25 MW/m<sup>2</sup> (siehe Kapitel 2.3.5)

Entsprechend der Eigenschaft eines Zonenmodells ergeben sich hier nur gemittelte Temperaturen der Heißgasschicht, wobei jedoch keiner der Werte eine bauteilgefährdende Größenordnung erreicht (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse zum Zeitpunkt der maximalen Brandraumtemperaturen infolge unterschiedlicher Brandlasten und Raumhöhen, ermittelt mit *OZone*

	flächig verteilt			lokal
	139 MJ/m <sup>2</sup>	162 MJ/m <sup>2</sup>	300 MJ/m <sup>2</sup>	400 MJ/m <sup>2</sup>
5,00 m	388 °C (23 min)	389 °C (28 min)	389 °C (28 min)	186 °C (29 min)
8,40 m	294 °C (25 min)	294 °C (25 min)	294 °C (25 min)	161 °C (29 min)
12,0 m	289 °C (27 min)	289 °C (27 min)	289 °C (27 min)	141 °C (29 min)

Die Vergrößerung der Brandlastdichte führte dabei nicht zu höheren Brandraumtemperaturen. Die Unterschätzung der Temperatur gegenüber der lokalen Temperatur wird mit diesem Modell dabei umso größer, wenn die gemittelte Brandraumtemperatur nur aus einer kleinen, lokalen Brandlastfläche resultiert (hier: 9 m<sup>2</sup> von 120 m<sup>2</sup> entspricht 7,5 % der Brandraumfläche). Gemittelte Brandraumtemperaturen aus Zonenmodellen erscheinen daher nicht geeignet, um Stütztemperaturen infolge lokaler Brände auf der sicheren Seite liegend, realistisch zu berechnen.

#### 4.4.2 Ermittlung der Temperaturen im Brandfall nach Heskestad

Für die Berechnung lokaler Temperaturen wird das Verfahren nach Heskestad gemäß Anhang C von [DIN EN 1991-1-2:2010] angewendet. Die Grundzüge des Verfahrens wurden in Kapitel 2.3.5 beschrieben.

Für die Wärmefreisetzungsrates wird der hochbauübliche charakteristische Wert von 250 kW/m<sup>2</sup> zugrunde gelegt (gemäß Anhang BB aus [DIN EN 1991-12/NA:2010]). Die

Brandlastdichte der lokalen Brandlast wird mit dem oberen Wert nach [Wilk2013c] und [Hosser2013] von  $400 \text{ MJ/m}^2$  bewertet. Dieser Wert der Brandlastdichte liegt innerhalb der Grenzen von „ $250 \leq 400 \leq 500 \text{ MJ/m}^2$ “, was in der Datenerhebung (Kapitel 3.6.7, Abbildung 43) als 90 % Quantil interpretiert wurde. Die beispielhaft in Anhang J deterministisch ermittelte, lokale Brandlast liegt mit ca.  $300 \text{ MJ/m}^2$  noch etwas darunter. Die Brandlastentwicklung wird in Anlehnung an die Versuchsergebnisse von [Wilk2013c] mit  $t_\alpha = 450 \text{ s}$  bewertet. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert zwischen den normativen Werten für die Brandlastentwicklungsdauer in *Bürogebäuden* (300 s) und der Rubrik *Transport, öffentlicher Bereich* (600 s). Die Brandfläche wird gemäß Anhang J sowie in Anlehnung an [Schleich1999] auf  $9 \text{ m}^2$  festgelegt. Die ausführlichen Eingangsparameter können Anhang K entnommen werden. Damit ergeben sich in Abhängigkeit von der Höhe nachfolgende, in Abbildung 49 dargestellte Temperatur-Zeitverläufe:

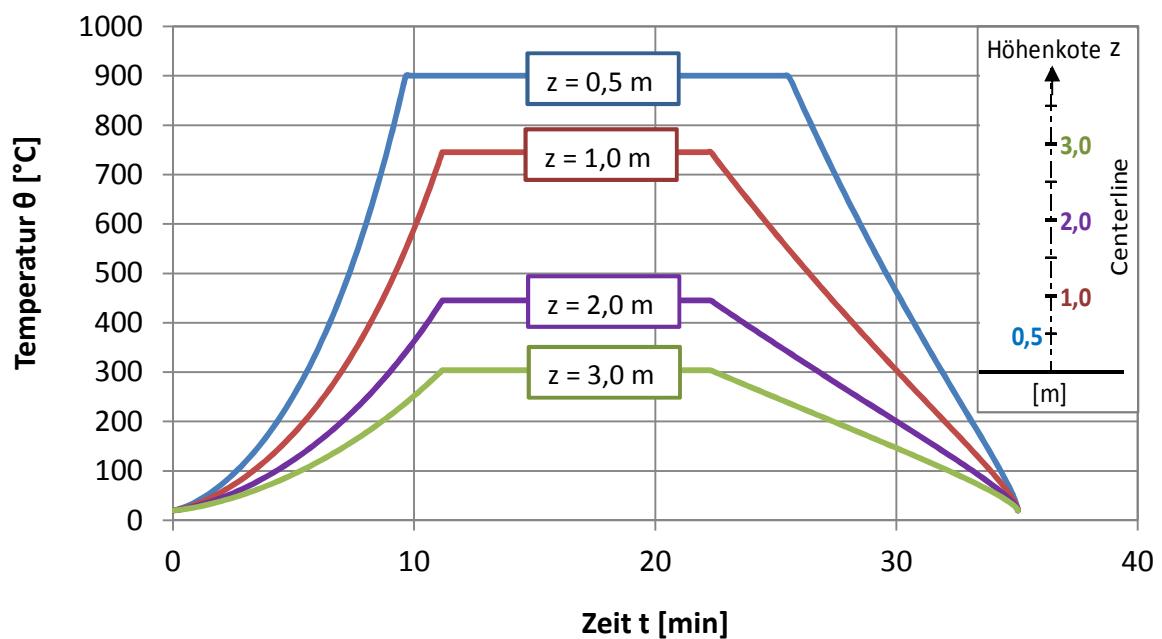


Abbildung 49: Temperatur-Zeitverläufe einzelner Höhenkoten entlang der Centerline infolge des lokalen Brandes nach Heskestad gemäß [DIN EN 1991-1-2:2010]

Dabei ist gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] zu berücksichtigen, dass für  $z \leq 1 \text{ m}$  pauschal  $\theta(z) = 900^{\circ}\text{C}$  gilt, weshalb der roten Linie formal die Höhenkote  $z = 1,001 \text{ m}$  zuzuordnen ist. Den ermittelten Temperaturen liegt der Verlauf der Wärme-freisetzungsrates gemäß Abbildung 50 zugrunde.

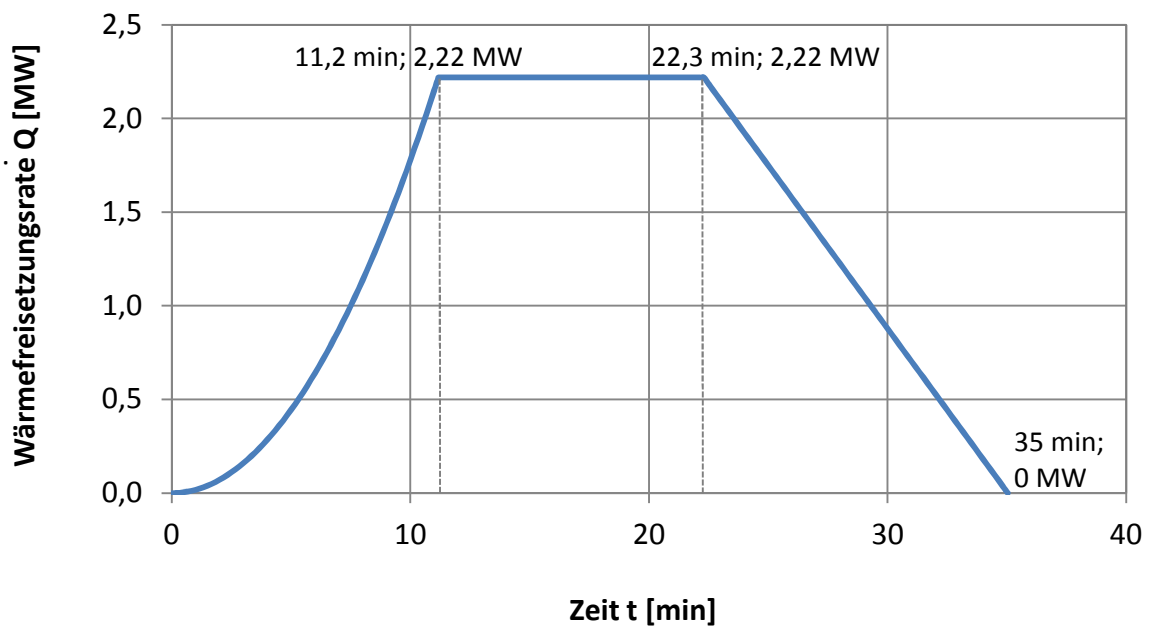


Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate infolge des lokalen Brandes

Bei Betrachtung der maßgebenden Parameter im Vergleich zu Versuchsdaten aus der Literatur erscheint die gewählte Größenordnung durchaus plausibel zu sein. Laut [Hosser2013] kann für einen PC-Arbeitsplatz mit einer langsamen Brandentwicklung eine maximale Abbrandleistung von 2,5 MW unterstellt werden. Beim NIST-Brandversuch „*Two Panel Workstation*“ aus [Schneider2006] betrug diese 1,8 MW. Hingegen liegt die maximale Wärmefreisetzung von 2,25 MW bei einer Bezugsfläche von 9 m<sup>2</sup> genau zwischen den Werten der Bemessungsgruppe 1 und 2 gemäß [DIN 18232-2:2007]. Diese betragen 1,5 - 3,0 MW bei 5 – 10 m<sup>2</sup>.

Die Anwendungsgrenzen für den lokalen Brand nach Heskestad erscheinen für hochbauübliche Dimensionen als relativ weit gefasst. Gemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] muss der Durchmesser der Brandlastfläche  $D \leq 10$  m betragen und die maximale Wärmefreisetzung  $\dot{Q}$  darf den Wert von 50 MW nicht überschreiten. Außerhalb von Industrienutzungen kann für hochbauübliche Brandlasten und Wärmefreisetzungen selbst bei einer Wärmefreisetzungsrate von  $RHR = 500$  kW/m<sup>2</sup> und einem maximalem Durchmesser von  $D = 10$  m ( $A_{fi} \approx 79$  m<sup>2</sup>) nur eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 40 MW erreicht werden. Der limitierende Faktor ist die Flammenlänge, da bei Erreichen der Decke der Anwendungsbereich dieses Verfahrens endet. Sollte dieser Fall eintreten, was bei den betrachteten Randbedingungen nicht zu erwarten ist, bildet sich im Deckenbereich ein horizontaler Deckenstrom (*Ceiling Jet*) aus und das Hasemi-Verfahren ist anzuwenden (ebenfalls Anhang C von [DIN EN1991-1-2:2010]). Dieser Fall wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Da

sich bei den vorliegenden Parametern gemäß Formel (2-14) eine maximale mittlere Flammenlänge  $L_f$  von 1,7 m ergibt, kann für alle betrachteten Raumhöhen  $\geq 5$  m das Heskestad Verfahren angewendet werden.

#### 4.4.3 Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels H-D-Modell

Da das vereinfachte Heskestad-Modell nur Temperaturen entlang der Plume-Achse liefert, ergibt sich in Anlehnung an das physikalische Abstandsgesetz<sup>10</sup> grundsätzlich die Frage nach der Wirkungsreduktion der Temperatur in gewissen horizontalen Abständen zur Brandquelle. Zur komplexeren Untersuchung dieses Phänomens wird auf Kapitel 4.4.4 verwiesen. Im Rahmen von vereinfachten Methoden wird das erweiterte Heskestad-Delichatsios-Modell (H-D-Modell) gemäß [Heskestad1978] näher betrachtet, welches neben der vertikalen, veränderlichen Größe  $z$  auch noch die horizontale Variable  $r$  berücksichtigt. Anders als das Hasemi-Verfahren gemäß Anhang C aus [DIN EN1991-1-2:2010], welches als Ceiling Jet Modell nur Temperaturen innerhalb der Rauchgasschicht in Deckennähe liefert, ist das H-D-Modell gemäß [Hosser2013] für die Berechnung der Temperaturerhöhung im Falle ohne Heißgasschicht geeignet. Die Grundzüge des Verfahrens werden in Kapitel 2.3.5 beschrieben.

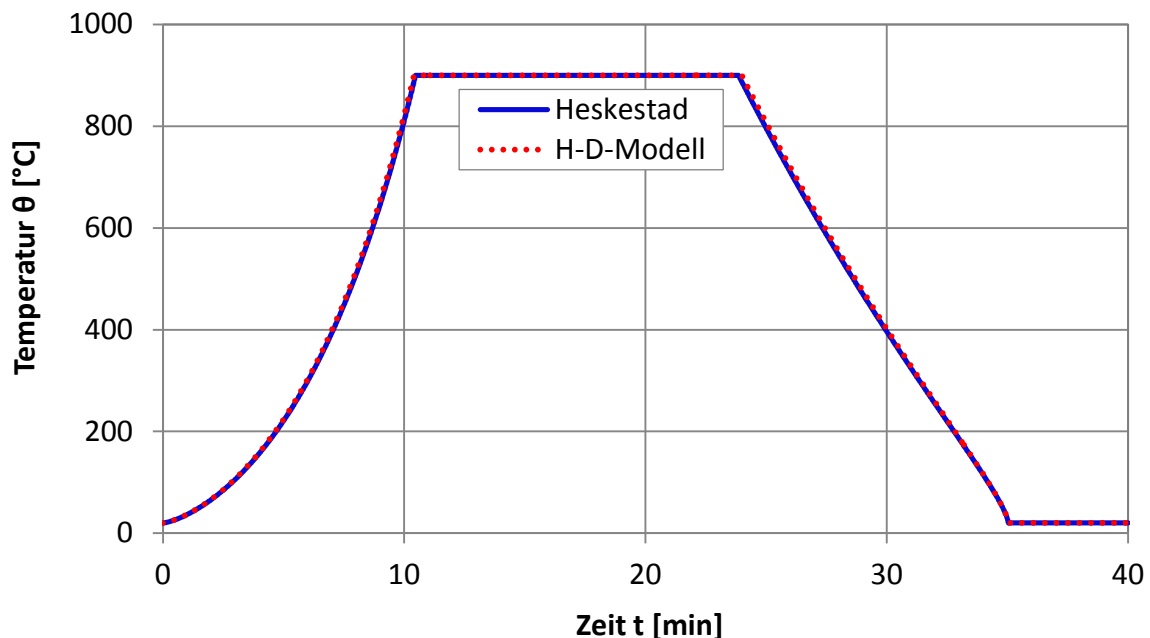


Abbildung 51: Identische Temperaturverläufe entlang der Plume-Centerline auf Höhe  $z = 0,5$  m gemäß Heskestad und dem H-D-Modell

<sup>10</sup> Das Abstandsgesetz beschreibt die Reduktion der Wirkung einer physikalischen Größe abhängig vom Abstand zur Quelle, siehe auch Kapitel 2.3.3.



Um das Verfahren zu kalibrieren, wird es zunächst mit dem klassischen Heskestad-Ansatz verglichen. Dafür wird der Radius  $r$  auf 0 gesetzt. Da auch diesem Verfahren ein virtueller Ursprung zugrunde liegt, ist für die Berechnung an einer bestimmten Stelle zur Höhenkote  $z$  der Betrag des virtuellen Ursprungs  $z_0$  zu addieren. In Abbildung 51 sind die rechnerischen Werte der Temperaturverläufe beider Verfahren bezogen auf die Höhenkote  $z = 0,5$  m in guter Übereinstimmung dargestellt. Gemäß dem Nationalen Anhang von [DIN EN1991-1-2:2010] wird unterhalb von einem Meter jeweils die mittlere Flammentemperatur (900 °C) zugewiesen.

Liegt die Temperaturmessstelle 0,5 m seitlich der Plumeachse, ergeben sich bei Ansatz des H-D-Modells gegenüber der Centerline-Temperatur des reinen Heskestad-Ansatzes, welcher nur Temperaturen entlang der Plumeachse liefert, bereits um 200 K niedrigere Temperaturen, wie in Abbildung 52 zu sehen ist.

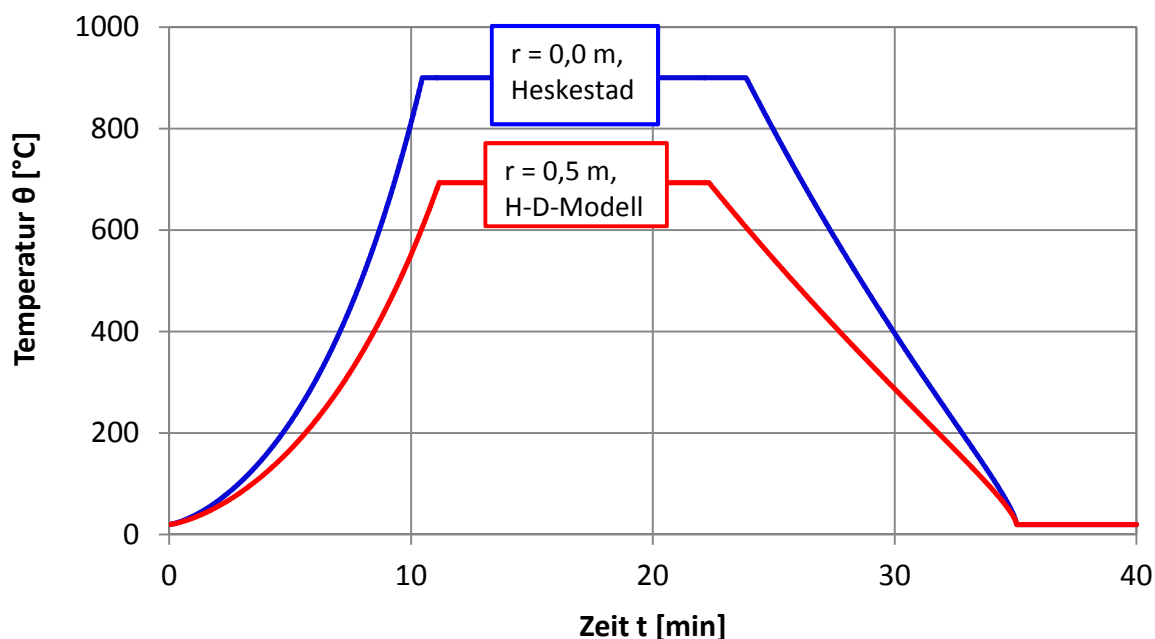


Abbildung 52: Temperaturverläufe aus der Centerline ( $r = 0$ ) und im radialen Abstand von  $r = 0,5$  m, hier jeweils in 0,5 m Höhe

Mit zunehmendem horizontalem Abstand zur Brandquelle vergrößert sich dieser Effekt, was in Abbildung 53 dargestellt ist. Trotz der Tatsache, dass die Brandfläche (hier  $9 \text{ m}^2$ ) mit in die Berechnung eingeht, wird im Rahmen des H-D-Modells nicht differenziert, ob sich die Messstelle noch innerhalb der Brandlastfläche befindet oder bereits außerhalb liegt, da von einer Punktquelle ausgegangen wird. Bei einer angenommenen, quadratischen Brandfläche von  $9 \text{ m}^2$  befinden sich Abstände  $r > 1,50$  m bereits außerhalb der Brandfläche.

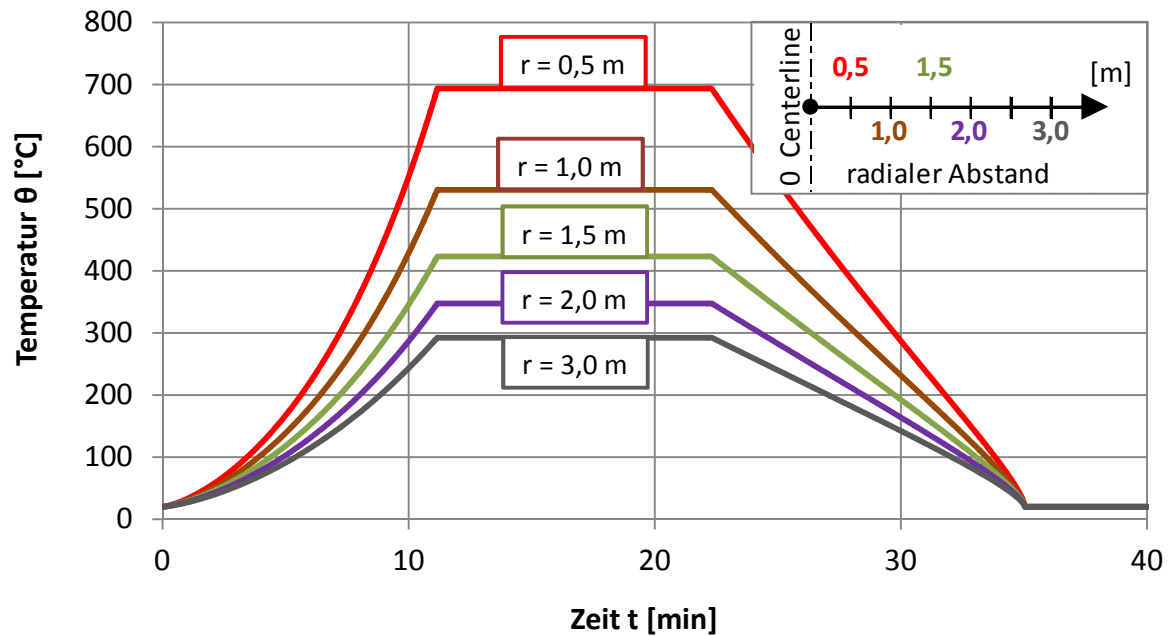


Abbildung 53: Temperaturverläufe nach dem H-D-Modell in radialen 0,5 m-Abständen gestaffelt zur Brandquelle, jeweils in 0,5 m Höhe zum Vergleich

In wieweit sich die Position der Temperaturmessung am Rande der Brandlast auf die Temperaturverläufe auswirkt, wird anhand eines Feldmodells im nachfolgenden Kapitel untersucht. Ferner wird dabei die Plausibilität der jeweiligen Größenordnung der Temperaturen überprüft. Für Bauteilbemessungen stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage nach dem bemessungsmaßgebenden Abstand der Stütze zur Brandquelle.

#### 4.4.4 Ermittlung der Temperaturen im Brandfall mittels FDS

Bei lokalen Bränden ergibt sich insbesondere mit zunehmenden Bauteilabständen zur Brandquelle die Frage nach der Veränderung der Temperatur über die Entfernung. Qualitativ ist festzuhalten, dass der strömungsgebundene Konvektionsanteil mit wachsendem horizontalem Abstand marginal wird, da die auftriebsgebundene Strömung ein primär vertikales Phänomen ist. Folglich wirkt seitlich der Wärmequelle überwiegend nur der richtungsunabhängige Strahlungsanteil, welcher sich mit zunehmendem Abstand verringert. Anhand des Feldmodells *FDS* (Fire Dynamic Simulator) gemäß [McGrattan2013] werden die Temperaturen eines lokalen Brandes untersucht. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen zunehmender Abstände zur Centerline bzw. zur Brandquelle betrachtet und mit den lokalen Temperaturen gemäß der Kapitel 4.4.2 und insbesondere 4.4.3 verglichen.

Dafür wird ein lokaler Brand mit *FDS 6* simuliert. Zur Berücksichtigung von Mischbrandlasten mit Kunststoffanteilen oder beispielsweise Polyurethan-Schaum als Polsterfüllung bei Ledersofas wird das Verbrennungsmodell *POLYURETHANE\_REAC* gemäß dem SFPE Handbook [DiNenno2002] angewendet. Die Wärmefreisetzungsrate wird entsprechend Abbildung 54 vorgegeben (Eingangswerte gemäß Anhang K). Dieses entspricht mindestens einer Sitzgruppe mit Designersofa, Tisch und Zeitschriften oder alternativ mindestens einem Empfangsschreibtisch oder Infopoint mit Computer und Telefon etc. gemäß Anhang J.

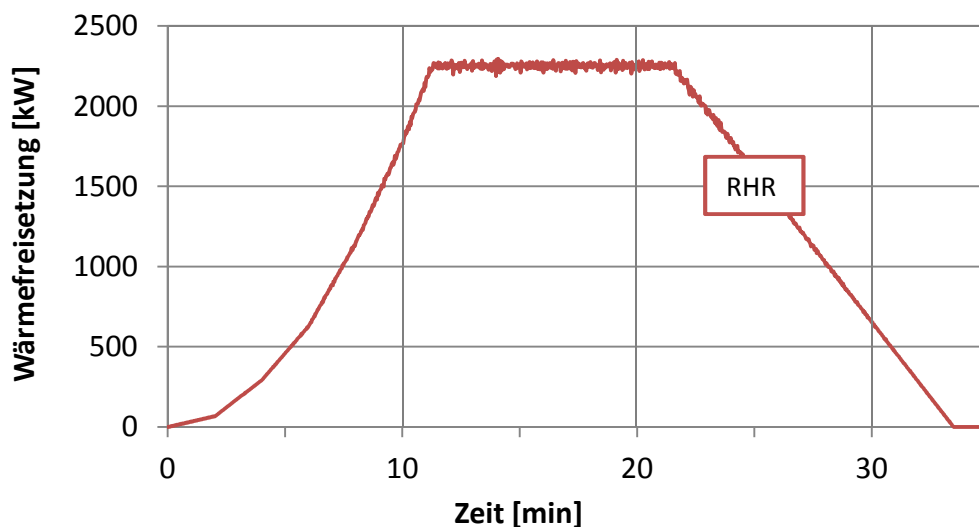


Abbildung 54: Wärmefreisetzungsrates des lokalen Brandes in *FDS* [kW]

Die quadratische Brandlast (3 m x 3 m) wird mittig in einem Raum (13 m x 13 m) platziert (siehe Abbildung 55). Zu den Wänden wird dabei ein Abstand von jeweils 5 m eingehalten. Für die Netzdiskretisierung wird eine Elementgröße von 10 cm gewählt, welche im Bereich der äußeren 2 m des Brandraumes auf 20 cm vergrößert wird.

Im Rahmen der *FDS*-Berechnung geht es primär um die Untersuchung des Phänomens der Temperatur-Verringerung mit zunehmendem horizontalem Abstand der Messstelle zur Brandquelle. Daher wird die Raumhöhe auf 5 m festgelegt. Das wirkt sich zudem auch günstig auf die Rechenzeit aus, welche ohnehin für einen Rechengang ca. 150 Stunden beansprucht. Für eine gleichmäßige Ventilation wird an jeder Wand jeweils mittig im unteren Bereich eine Zuluftöffnung von 2 m<sup>2</sup> und im oberen Bereich eine Abluftöffnung von 4 m<sup>2</sup> vorgesehen (siehe auch Abbildung 56).

Damit Aussagen zur Temperaturverteilung im Brandraum getroffen werden können, werden diverse Messstellen über den Grundriss verteilt angeordnet. Um auch außerhalb der Plumeachse realistische Temperaturen ausgeben zu können, werden an

den zu untersuchenden Stellen im Raum die adiabatischen Oberflächentemperaturen (AST)<sup>11</sup> berechnet. Dadurch wird neben dem Konvektionsanteil auch der Strahlungsanteil des Nettowärmestroms berücksichtigt, welcher seitlich des Plumes überwiegend wirkt. Diese sind zum Beispiel in Abbildung 56 dargestellt.

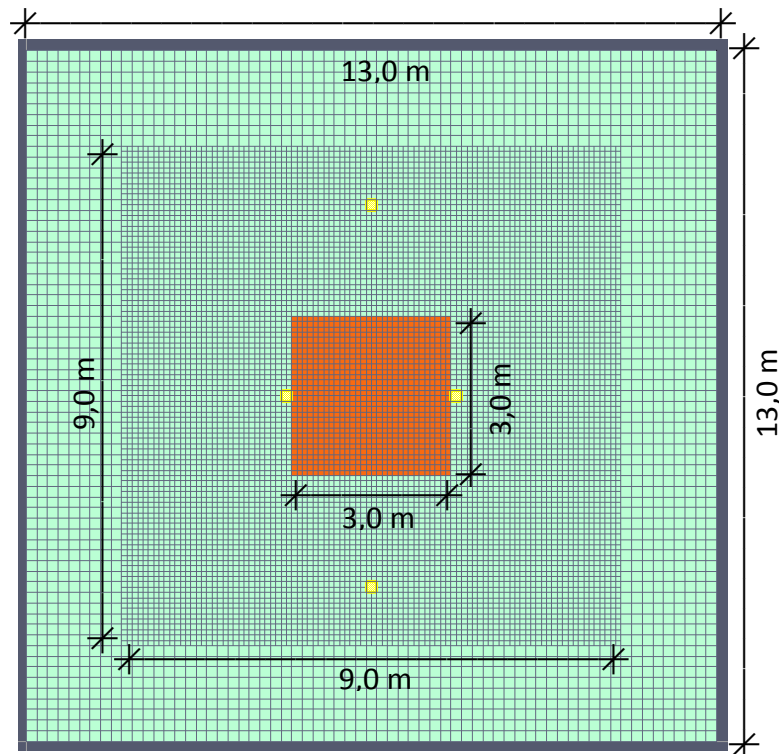


Abbildung 55: Netzdiskretisierung des Brandraumes, hier Grundriss mit einzelnen Messstellen

AST-Punkte werden in Brandlastmitte sowie jeweils in Entfernungen von 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m (am Rand der Brandlastfläche) sowie in 2,0 m, 2,5 m, 3,5 m und 4,5 m Abstand zum Zentrum der Brandlast angeordnet und über die Höhe verteilt. Damit sich die vorgesehenen Stützenstränge mit den Messstellen nicht gegenseitig strömungsmechanisch beeinflussen, werden mehrere Rechengänge mit möglichst großen Abständen der Stützen untereinander durchgeführt (siehe Abbildung 131 in Anhang M). Anstelle von vollständigen Stützen werden dabei lediglich einzelne Elemente mit den AST-Messpunkten platziert. Da *FDS* keine Schwerkraft berücksichtigt, ergibt sich aus schwebenden Stützenfragmenten keine Beeinflussung der Numerik.

<sup>11</sup> Die adiabatische Oberflächentemperatur (Adiabatic surface temperature-AST) ist eine ideale Oberflächentemperatur, die der Annahme zugrunde liegt, dass kein Wärmetransfer in das Bauteil stattfindet bzw. auch keine Wärmeabgabe von dessen Oberfläche ausgeht [Wickström2007], [Wickström2008] und [Wickström2009].

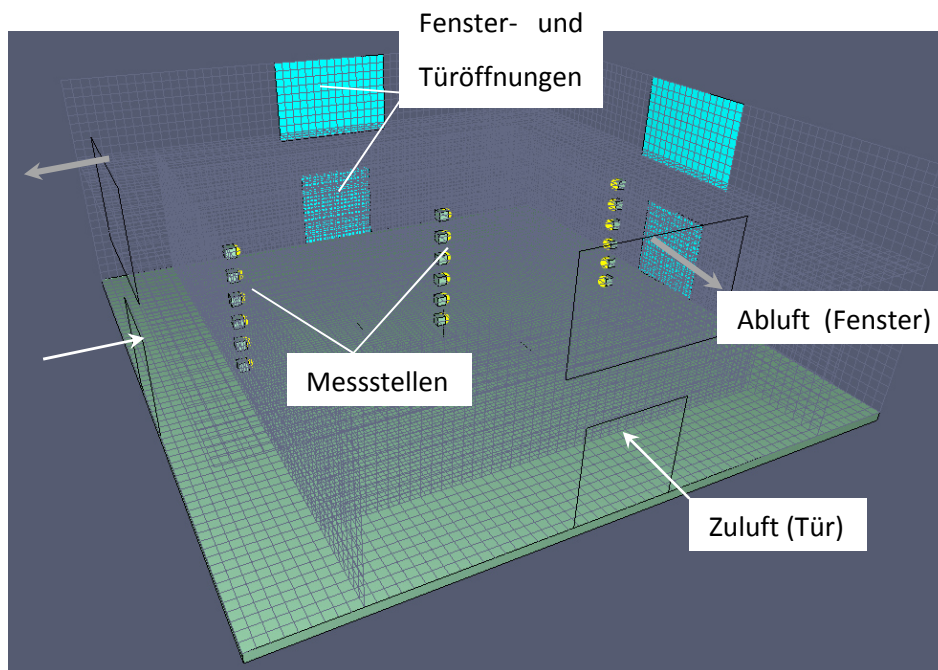


Abbildung 56: Brandraum mit Öffnungen und Netzdiskretisierung, hier 3-D-Ansicht der AST-Messtellen an den Stützelementen

Durch die gewählten gleichmäßigen Ventilationsöffnungen wird unterstellt, dass zusätzliche Einflüsse wie lokale Verwirbelungen des Plumes bei einseitiger Ventilation auf ein Minimum reduziert werden, siehe auch nachfolgende Abbildung 57:

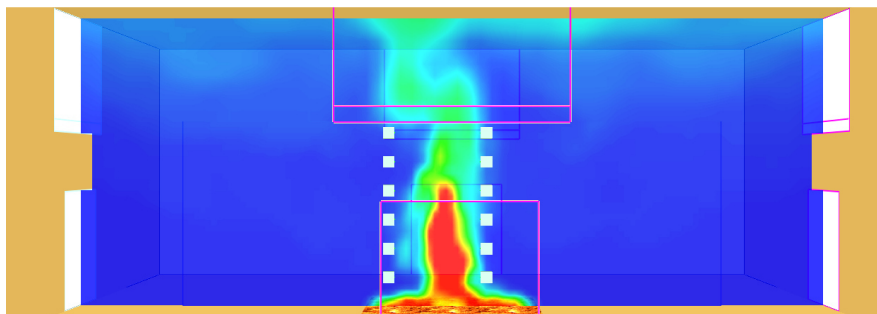


Abbildung 57: Darstellung des Brandes zum Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzung beim horizontalen Plateau zur 15. Minute (900 Sekunden)

Dennoch ist die natürliche Verbrennung eines Schadfeuers im Gegensatz zur beispielsweise laminaren Flamme einer Kerze ein turbulent geprägter, thermodynamischer Prozess. Das wird in Abbildung 58 sehr deutlich. Auf Höhe von 1,50 m betragen die maximalen Temperaturschwankungen innerhalb der Plumeachse bis zu 500 K. Diese sind auf das Flackern der Flammen zurückzuführen. Gemäß Gleichung (2-14) misst die mittlere Flammenlänge  $L_f = 1,7$  m, womit sich die Messstelle

( $h = 1,5$  m) direkt im Bereich der intermittierenden Flamme gemäß Abbildung 17 befindet.

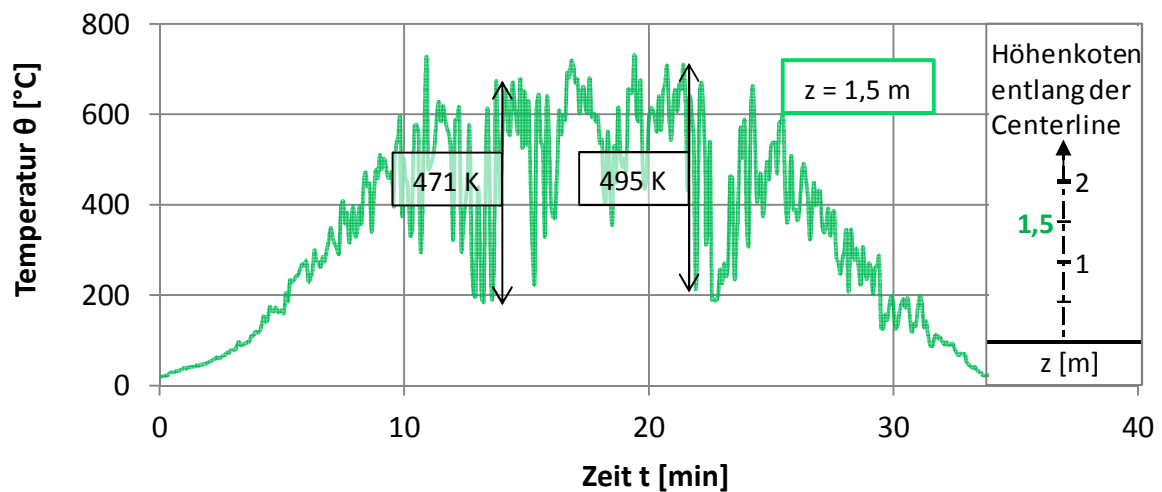


Abbildung 58: Centerline-Temperaturen auf  $z = 1,5$  m gemäß *FDS*

Zum Vergleich der lokalen *FDS*-Temperaturen mit den berechneten Temperaturen der vorangegangenen, vereinfachten Verfahren werden die einzelnen Temperaturverläufe gegenübergestellt. Das erfolgt zunächst im unmittelbaren Flammenbereich (Abbildung 59).

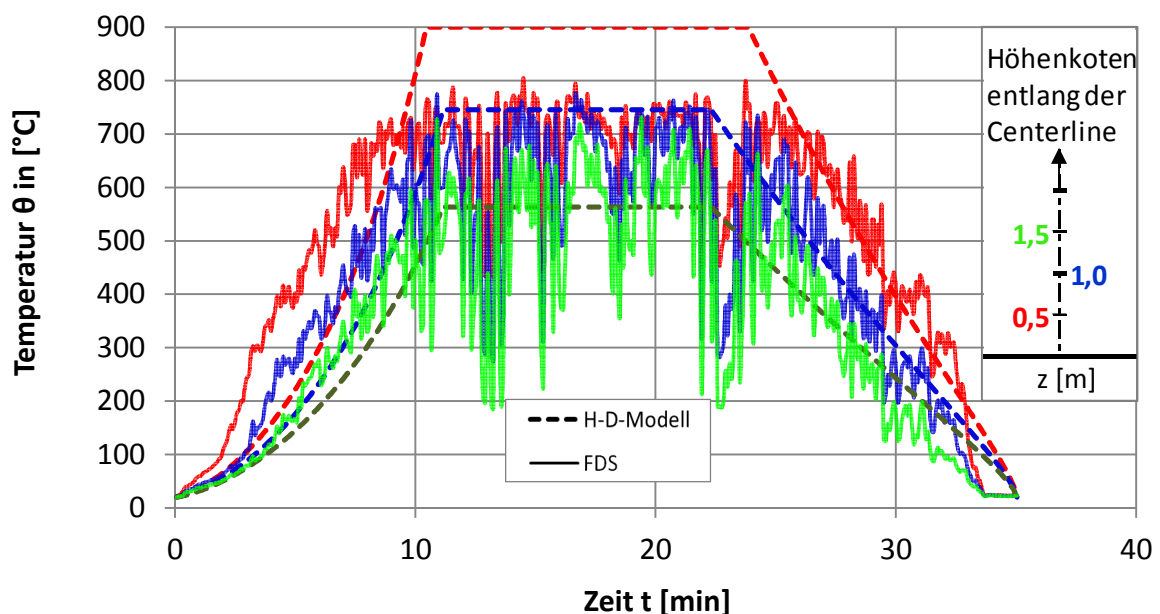


Abbildung 59: Vergleich einzelner Centerline-Temperaturverläufe unterhalb 1,50 m gemäß dem H-D-Modell und *FDS*

In einem Meter Höhe beschreiben die Heskestad-Temperaturen die einzelnen Temperaturspitzen der *FDS*-Temperaturen in guter Übereinstimmung. Auffällig ist

jedoch, dass die maximalen Temperaturen im gesamten Flammenbereich in 0,5 m Höhe nach *FDS* nur bei etwa 800 °C liegen und damit deutlich unterhalb der korrespondierenden Heskestad-Temperatur sowie auch unterhalb der mittleren Flammentemperatur von 900 °C gemäß [Hosser2009]. Mögliche Ursachen sind in Kapitel 5 dargelegt. Da bei der Simulation mittels *FDS* der Fokus weniger auf Temperaturen im unmittelbaren Flammenbereich gerichtet ist, sondern auf die Verflüchtigung mit zunehmendem Abstand zur Brandquelle, werden in den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 60 und Abbildung 61) die entsprechenden Temperaturverläufe (jeweils in 50 cm Höhe) in unterschiedlichen Radien zur Plume-Centerline dargestellt. Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse auf zwei Diagramme aufgeteilt. Die korrespondierenden Temperaturverläufe der *FDS*-Berechnung und des H-D-Modells sind aus Gründen der Übersicht und Vergleichbarkeit jeweils in gleicher Farbe dargestellt.

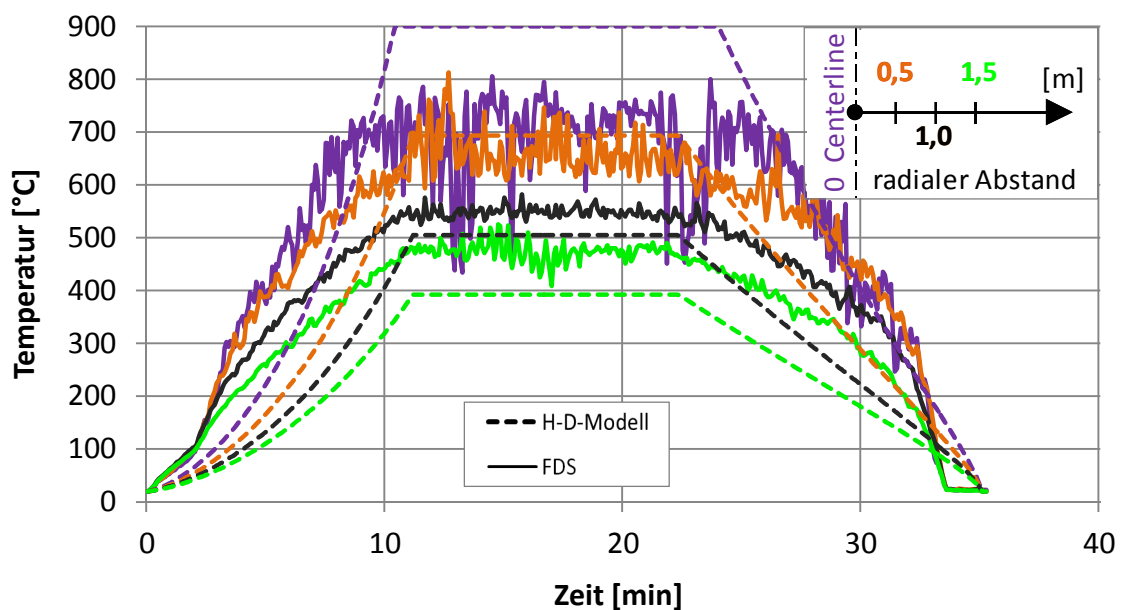


Abbildung 60: Vergleich einzelner Temperaturverläufe auf Höhe  $z = 0,5$  m in verschiedenen radialen Abständen zur Centerline ( $r = 0 - 1,5$  m), gemäß H-D-Modell und *FDS*

Für die Beurteilung und Interpretation der Temperaturverläufe ist zu berücksichtigen, dass sich der Rand der Brandlast hier auf dem Radius  $r = 1,5$  m befindet. Kleinere Radien befinden sich demzufolge noch innerhalb der Brandlastfläche, größere Radien bereits außerhalb. Auch die *FDS*-Temperaturen außerhalb der Plumeachse werden zum Vergleich den Ergebnissen des H-D-Modells gegenübergestellt. Als Referenzhöhe wird hier ebenfalls  $h = 0,5$  m gewählt. Neben der bereits angemerkten Unterschätzung der *FDS*-Temperaturen im Flammenbereich des Plumes, liegen die *FDS*-Temperaturen

außerhalb des Plumes und der Brandlastfläche über den Temperaturen des H-D-Modells.

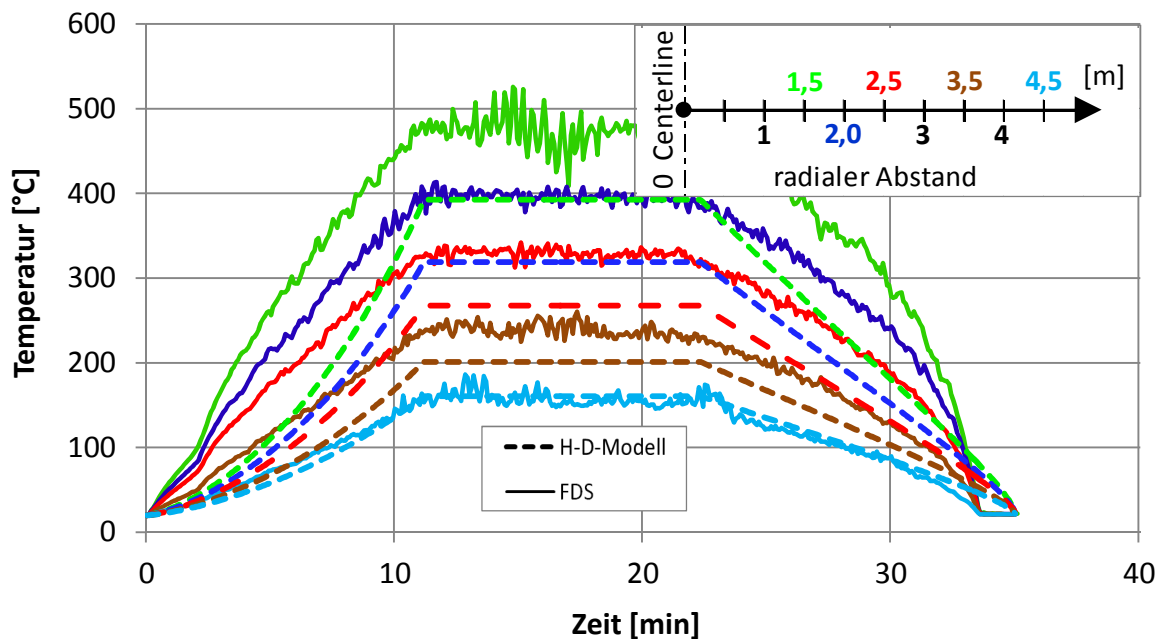


Abbildung 61: Vergleich einzelner Temperaturverläufe auf Höhe  $z = 0,5$  m in verschiedenen radialen Abständen zur Centerline ( $r = 1,5 - 4,5$  m) gemäß H-D-Modell und *FDS*

Bereits im Abstand von  $1,0$  m zur Centerline liegen die H-D-Temperaturen um ca.  $50$  K unter den *FDS*-Temperaturen. Mit zunehmendem Abstand (beispielsweise  $2,0$  m) vergrößert sich diese Differenz auf bis zu ca.  $100$  K. Die größte Temperaturdifferenz zwischen der *FDS*-Berechnung und der berechneten Temperatur anhand des H-D-Modells (ca.  $130$  K) tritt bei dem Radius  $r = 1,5$  m auf. Hingegen gibt es im Abstand von  $4,5$  m eine sehr gute Übereinstimmung.

In Bezug auf lokale Brände zeigen beide Rechenverfahren eines gleichermaßen. Die Wirkung der Temperatur nimmt bereits bei geringen horizontalen Abständen zum Plume bzw. zur direkten Flamme spürbar ab. Der qualitative Effekt, dass die auftriebsgebundene Konvektion seitlich des Plumes wegfällt und dass sich die Strahlungswirkung der Temperatur mit zunehmendem Abstand reduziert, wird bestätigt. Das Flackern der Flamme lässt sich in Form von intensiven Temperaturschwankungen in den Ergebnissen wiederfinden. Zu deren numerischer Verwendbarkeit sowie zur Simulation der direkten Flammen wird in diesem Zusammenhang auf Kapitel 5 verwiesen. Die vollständigen Diagramme der einzelnen Temperaturverläufe können dem Anhang M entnommen werden.



## 4.5 Modellbildung

### 4.5.1 Stütztyp und statisches System

Grundsätzliche Überlegungen hinsichtlich des statischen Systems von Stützen wurden in Kapitel 2.5.3 bereits dargelegt. Klassischerweise wird im Hochbau für Geschoss- bzw. Foyerstützen häufig das statische System *Pendelstütze* gemäß *Eulerfall II* gewählt. Bei einer vertikal verschieblichen Lagerung am Kopf führen die bei Bauteilen im Brandfall auftretenden, bezogenen thermischen Dehnungen  $\Delta l$  in Längsrichtung gemäß Kapitel 2.4.3 nicht zu Zwangskräften. Die grundsätzliche Überprüfung des Auftretens von thermischen Dehnungen im Brandfall sowie der daraus ggfs. resultierenden Zwangskräfte wird jedoch normativ gemäß [DIN EN1990:2010] unter Abschnitt 6.4.3.3 (4) gefordert. Daher stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob die *Pendelstütze* mit der entsprechenden vertikal verschieblichen Lagerung bei brandschutztechnisch ungeschützten Stahlstützen für den Lastfall Brand bzw. lokaler Brand alle Randbedingungen richtig berücksichtigt und eine auf der sicheren Seite liegende Lagerungsform darstellt.

Ein brandschutztechnisch geschütztes Stahlbauteil erfährt eine, entsprechend der Wärmedämmwirkung des Brandschutzmaterials unterstellte, geringe Erwärmung, was in der logischen Folge qualitativ zu sehr geringen thermischen Dehnungen führt. Im Umkehrschluss baut sich selbst bei einer vollständig dehnungsbehinderten Bauweise so lediglich ein sehr geringer Zwang auf. Ein ungeschütztes Bauteil hingegen, wie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet, erfährt bei einer entsprechenden Erwärmung eine korrespondierende, thermische Dehnung. Je nach vorliegender Lagerungsform werden die thermischen Dehnungen anteilig gehindert, wodurch bei Stützen eine vertikale Zwangskraft entsteht. Dafür gilt nachfolgender Zusammenhang. Entsprechend dem klassischen Spannungsansatz der *Mechanik* folgt aus dem *Hookschen Gesetz* bezogen auf thermische Dehnungen die thermisch bedingte Normalkraft im elastischen Bereich:

$$N_{\vartheta} = E_{fi} \cdot A \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_{fi} \cdot A \cdot \alpha_t \cdot \Delta \vartheta \quad (4-20)$$

Das bedeutet, im Brandfall hängt die Zwangsnormalkraft infolge gehinderter, thermisch induzierter Dehnungen neben der bezogenen Längenänderung gemäß Abbildung 62 und dem reduzierten Elastizitätsmodul (E-Modul) gemäß Abbildung 63 zunächst lediglich vom Querschnitt der Stütze ab, jedoch nicht von der Bauteillänge.

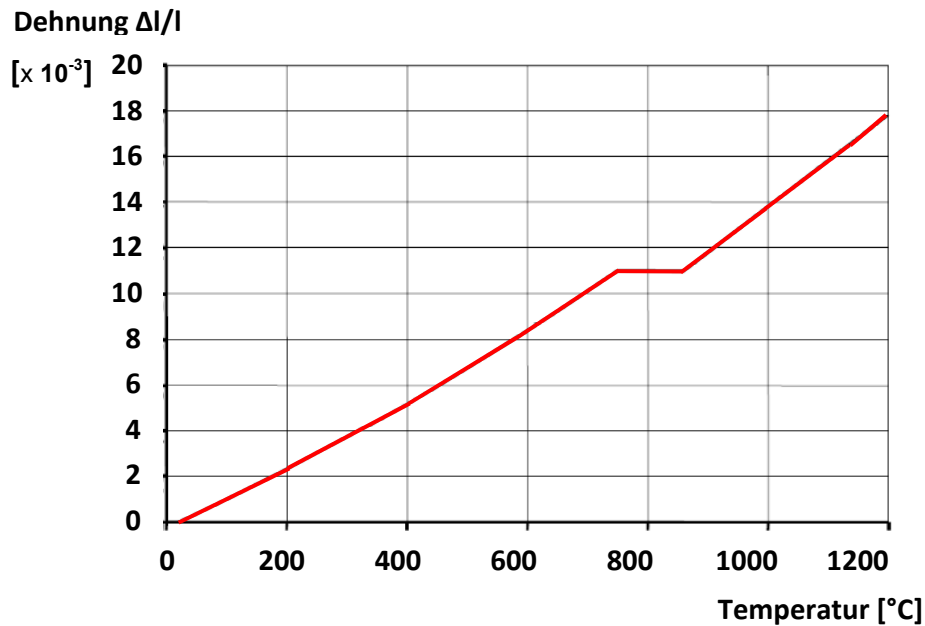


Abbildung 62: Thermische Dehnung von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur gemäß [DIN EN1993-1-2]

Während die thermischen Dehnungen, welche als bezogene Größe eingehen, mit zunehmender Temperatur ansteigen, reduziert sich gleichzeitig der E-Modul, siehe dazu Abbildung 63.

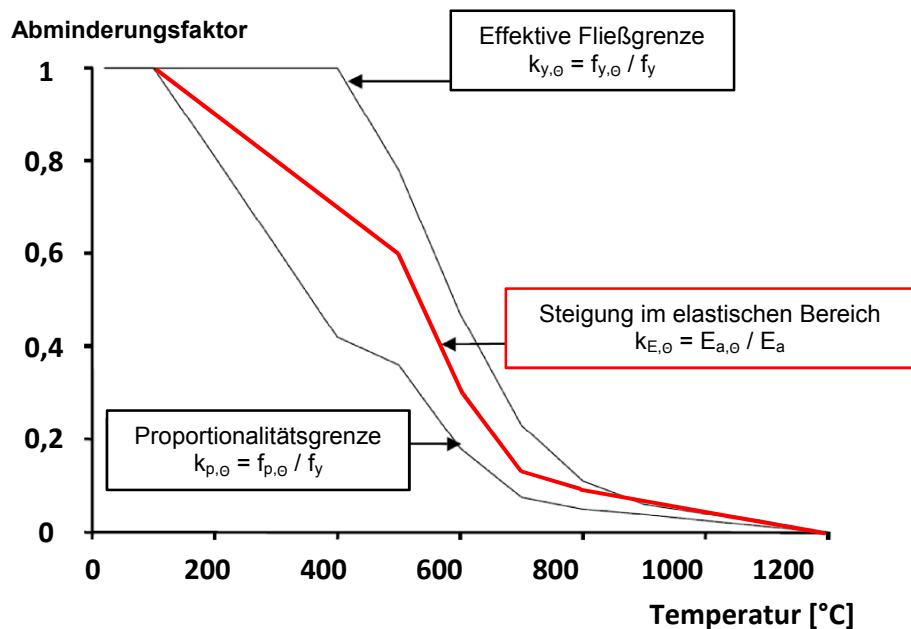


Abbildung 63: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhter Temperatur nach [DIN EN1993-1-2]

Somit ergibt sich für die jeweiligen Querschnitte ein Grenzpunkt der maximal möglichen, thermischen Zwangskraft. Über diesem Grenzwert hinaus führt eine

weitere Erwärmung des Querschnittes zwar zu größeren thermischen Dehnungen, jedoch infolge der reduzierten Steifigkeit im Bauteil, bedingt durch den abnehmenden E-Modul, relativiert sich der Zuwachs der maximal möglichen Zwangsnormalkraft. Der beschriebene Zusammenhang als Auswirkung der gegenläufigen Entwicklung von zunehmenden thermischen Dehnungen bei gleichzeitig abnehmendem E-Modul kann der Darstellung auf Abbildung 64 entnommen werden. Dort ist der temperaturabhängige Verlauf der Zwangsnormalkraft nach Gleichung (4-20) am Beispiel eines Stahlhohlprofils bei ideal-dehnstarrer Lagerung aufgetragen. Die maximale Zwangskraft stellt sich folglich nicht bei der maximalen Temperatur ein, sondern bei etwa 500 °C, wo die drastische Reduktion des E-Moduls maßgebend wird und sich die Zwangskraft wieder reduziert. Der theoretische Idealwert der maximalen (elastischen) Zwangskraft wird jedoch durch den temperaturabhängigen, plastischen Normalkraftwiderstand des Querschnitts begrenzt.

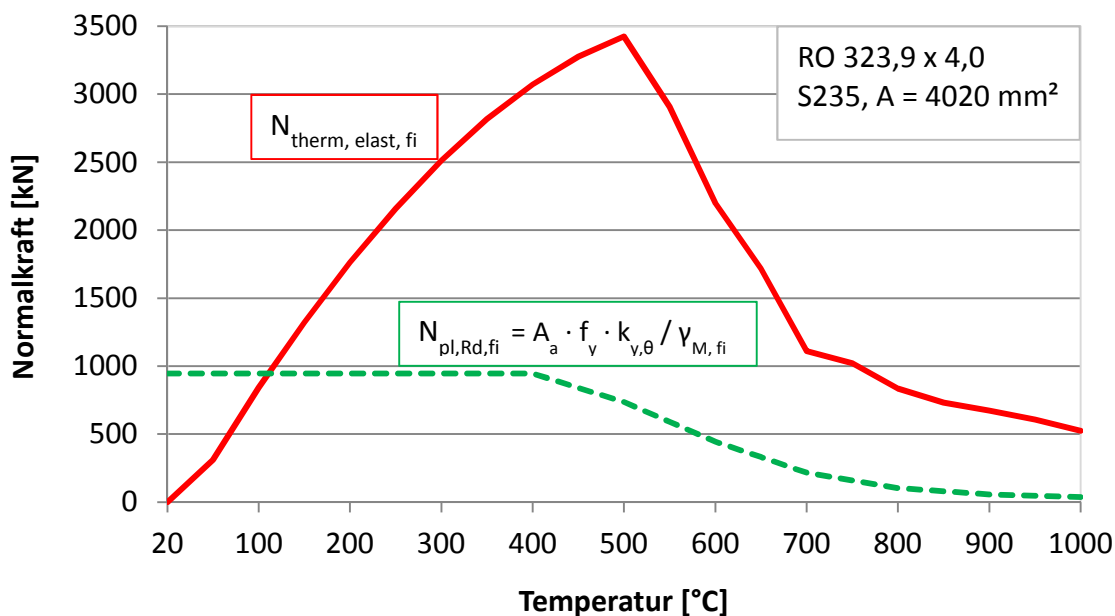


Abbildung 64: Thermische Zwangsnormalkraft bei unendlicher Dehnungsbehinderung in Abhängigkeit von der Temperatur nach Formel (4-20)

In welcher Größenordnung sich diese Zwangsnormalkräfte tatsächlich einstellen, hängt in der weiteren Folge von den Lagerungsbedingungen des Systems ab, welche sich in einem realen Gesamtsystem an der Biegesteifigkeit der horizontalen Bauteile orientieren. Die Pendelstütze, als ideal unverschiebliches System, stellt somit einen Grenzfall dar, der einen idealisierten Zustand beschreibt. Nur bei einer vollständig unverschieblich gelagerten Stütze würde sich die gesamte Zwangskraft entsprechend Abbildung 64 einstellen.

Beide Fälle, ideal verschieblich bzw. vollständig nicht-verschieblich, sind in der Praxis im Geschossbau nicht in Reinform vorzufinden. In der Realität würde die Verschieblichkeit zutreffender durch eine Feder abgebildet werden. Nachfolgend sind auf Abbildung 65 die Grenzfälle der vertikalen Verschieblichkeit dargestellt sowie der Zwischenbereich, idealisiert durch eine Feder mit einer entsprechenden translatorischen Federsteifigkeit.

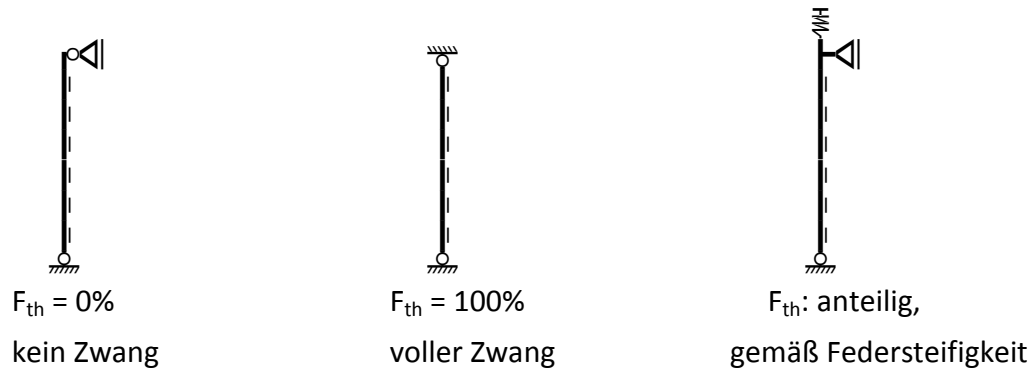


Abbildung 65: Grenzfälle vertikaler Verschieblichkeit und korrespondierende thermische Zwangskräfte

Im Rahmen einer Grenzbetrachtung möglicher Brandszenarien wird nachfolgend untersucht, inwieweit bei brandschutztechnisch ungeschützten Geschossstützen das Phänomen des vertikalen Zwangs aus thermischen Dehnungen infolge lokaler Brände auftreten kann:

Bei einem Vollbrand dehnen sich (idealisiert) alle Stützen gleichmäßig und ungehindert aus. Das Gebäude wird quasi höher, aber es entsteht somit kein Zwang, siehe auch Abbildung 66.

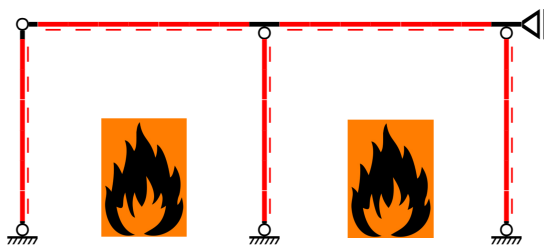


Abbildung 66: Geschoss bei einem Vollbrand

Bei ungleichmäßiger, rein lokaler Erwärmung dehnen sich nur einzelne Stützen aus, so dass sich über die Biegesteifigkeit der horizontal anschließenden Bauteile eine Dehnungsbehinderung in vertikaler Richtung einstellt, siehe Abbildung 67.

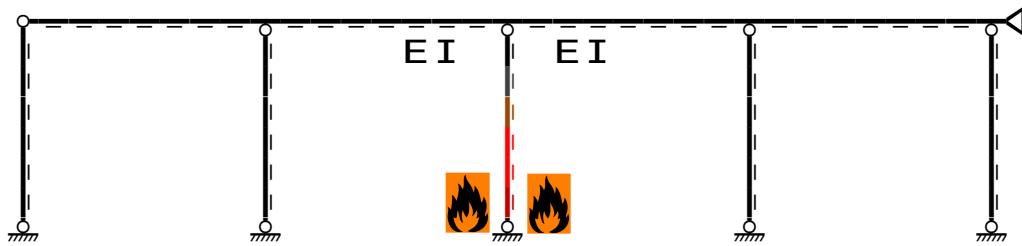


Abbildung 67: Geschoss bei einem lokalen Brand

Je höher das Gebäude ist, desto größer ist die Steifigkeit (siehe Abbildung 68) und desto größer wird der aufgebaute Zwang bis zu seinem theoretischen, rechnerischen Maximalwert.

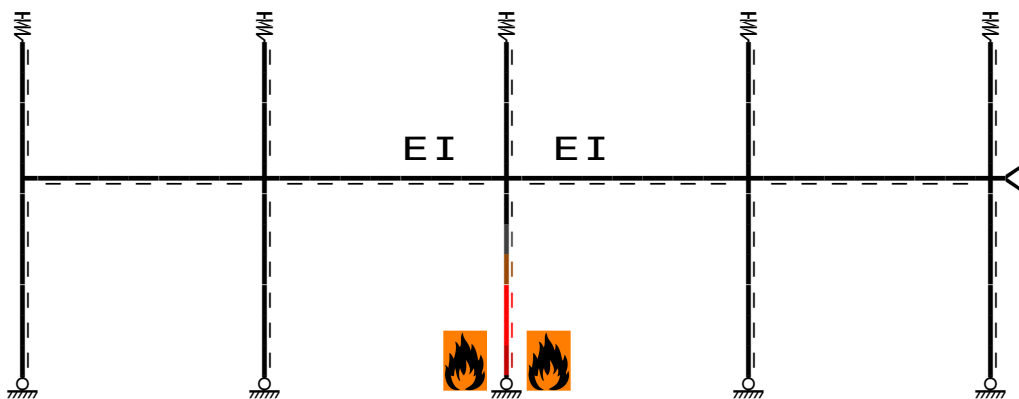


Abbildung 68: Geschoss eines aufgehenden Gebäudes bei einem lokalen Brand

Zusätzlich ist in diesem Zusammenhang noch der Temperaturgradient in Stützenlängsrichtung zu berücksichtigen. Insbesondere bei lokalen Bränden weisen Stützen über die Stützenhöhe keine homogene Temperatur auf, wodurch der Aspekt hinzukommt, dass die einzelnen Stützenabschnitte jeweils unterschiedliche thermische Dehnungen erfahren. In Abhängigkeit der Steifigkeit des unmittelbar angrenzenden Stützenabschnittes bilden sich die jeweiligen Zwangskräfte der Stützenabschnitte aus bzw. es ergibt sich daraus die Zwangskraft der Stütze, wie folgendes Beispiel zeigt:

Eine fiktive Stütze mit einer Länge von 3 m und dem Stahlquerschnitt RO 323,9 x 4,0 (S235) wird virtuell in drei Teilabschnitte unterteilt und ihr abschnittsweise gestaffelt folgende, fiktive Temperaturen zugewiesen, 800 °C, 600 °C und 400 °C, woraus jeweils entsprechende thermische Dehnungen resultieren (Abbildung 69). In Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen, je Abschnitt unverschieblich bzw. nur an den Stützenenden unverschieblich gelagert, ergeben sich daraus jeweils nachfolgende, elastische thermische Zwangskräfte.



Abbildung 69: Einfluss von direkt anschließenden Bauteilen auf die Ausbildung thermischer Zwangskräfte, Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235)

Bereits an der Gesamtstütze wird deutlich, dass sich die theoretischen Zwangskräfte der Teilabschnitte nicht ausbilden können, da an einer realen Stütze die angrenzenden Teilabschnitte ebenfalls reduzierte Steifigkeiten aufweisen, die wiederum an anderen Teilabschnitten anschließen. Da der Zusammenhang nicht linear ist, ergibt auch ein Mittelwert der Zwangskräfte der gedachten Teilabschnitte keine sinnvolle Näherung der Zwangskraft ( $2035 \text{ kN} > 1315 \text{ kN}$ ).

Zum Vergleich wird dieselbe fiktive Stütze bei gleicher Temperaturverteilung nicht vollständig dehnungsbehindert gelagert sondern an einen Meterstreifen einer Stahlbetondecke mit  $h = 25 \text{ cm}$  (C25/30) angeschlossen, was einer realistischeren, vertikal nachgiebigen Lagerung entspricht. Das hat zur Folge, dass sich die Zwangskraft auf einen Bruchteil reduziert ( $75 \text{ kN} < 1315 \text{ kN}$ ).

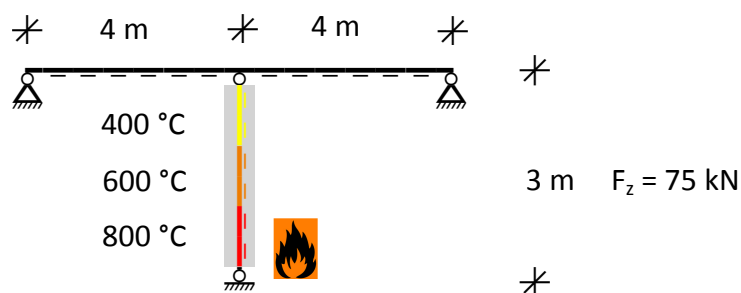


Abbildung 70: Einfluss einer nachgiebigen Lagerung auf die Ausbildung der thermischen Zwangskraft, Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235), Riegel:  $h = 25 \text{ cm}$  (C25/30)

Bereits an diesem hypothetischen Beispiel wird deutlich, welchen Einfluss die Lagerungsbedingungen haben bzw. welchen großen Einfluss die Steifigkeiten der angrenzenden Bauteile aufweisen. Wird dieses Beispiel noch um aufgehende, baugleiche Geschosse ergänzt, erhöht sich die Steifigkeit entsprechend und die

Zwangskraft vergrößert sich. Trotzdem bleibt sie aber noch deutlich unterhalb der Größenordnung, die sich bei einer unverschieblichen Lagerung mit vollständiger Dehnungsbehinderung einstellt, wie Abbildung 71 entnommen werden kann ( $305 \text{ kN} < 1315 \text{ kN}$ ).

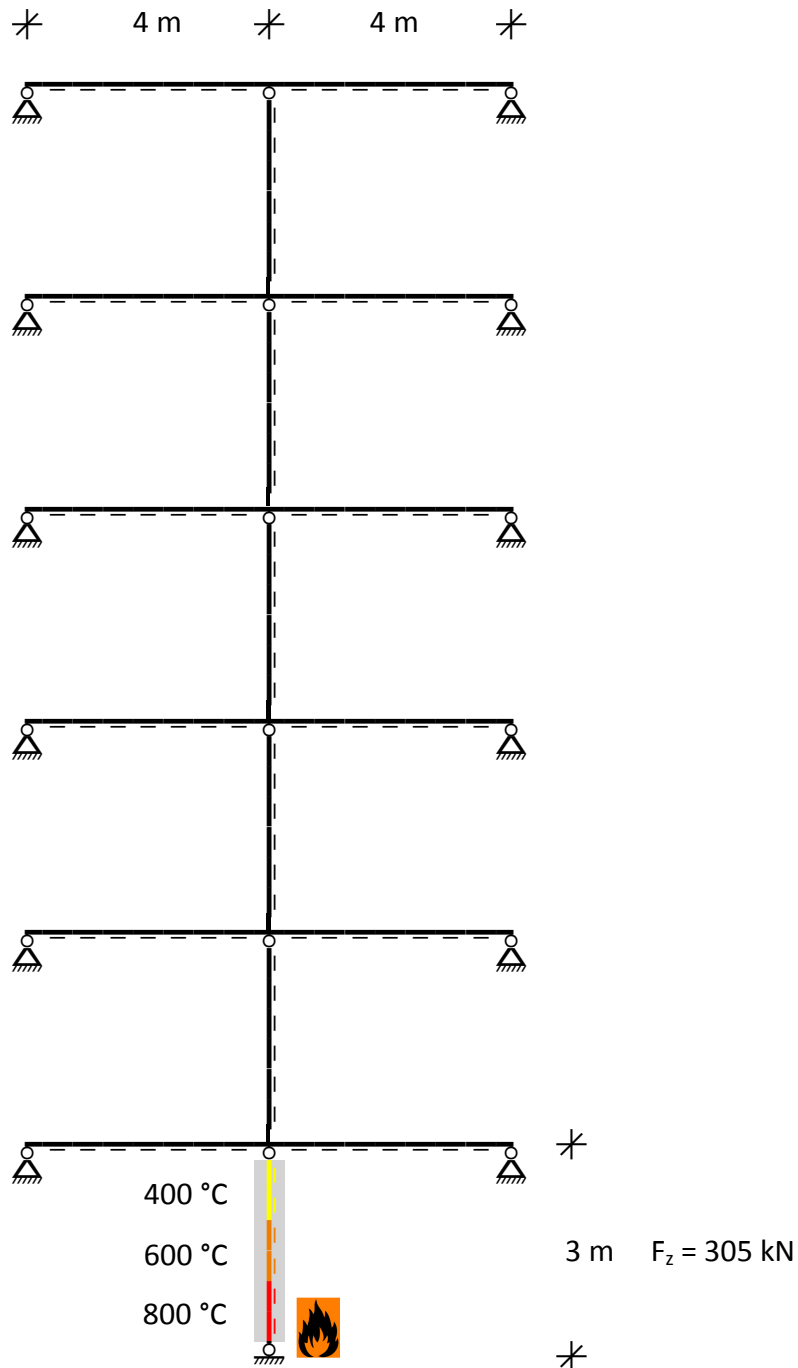


Abbildung 71: Einfluss einer erhöhten Steifigkeit auf die Ausbildung der thermischen Zwangskraft in der Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235), Riegel: h = 25 cm (C25/30)

Für die drei beschriebenen Kategorien von Foyers gemäß Kapitel 2.5.2 soll die thermische Zwangskraft infolge eines lokalen Brandes mit dem Programm *SAFIR* (siehe Kapitel 4.6.1) auf Basis des allgemeinen Berechnungsverfahrens ermittelt werden. Um den Einfluss des Gesamtsystems abzuschätzen, wird ein T-förmiges Ersatzsystem gewählt, das der gemeinsamen Steifigkeit aller unterstellten, aufgehenden Geschosse entspricht, vgl. Abbildung 71. Die Steifigkeiten der einzelnen Geschosse werden dabei idealisiert über gekoppelte, dehnstarre Stäbe abgebildet. Die Berechnung der thermischen Zwangskräfte erfolgt jeweils am unbelasteten System:

**1.) Kleines, eingeschossiges Foyer in einem aufgehenden Gebäude:  $l = 5,00$  m**

Geschossdecken aus Stahlbeton ( $h = 28$  cm, C30/37)

$G_k/Q_k = 4766/1458$  [kN],  $(G+Q)_d = 8621$  [kN],  $(G+Q)_{d,fi} = 5495$  [kN]

Lastzusammenstellung, siehe Anhang I

Lokaler Brand nach Heskestad gemäß EC1-1-2 (siehe Anhang K)

Stütze RO 406,4 x 45 (S235) mit  $l = 5,00$  m (siehe Abbildung 72)

Ersatzsystem für 5 Geschosse jeweils mit Deckenfeldern  $h = 28$  cm sowie der Dachgeschosdecke mit  $h = 25$  cm, welche idealisiert dehnstarr miteinander gekoppelt sind:

$$I_{y,ges} = \frac{100}{12} \cdot (5 \cdot 28^3 + 25^3) = 1.044.875 \quad [\text{cm}^4] \quad (4-21)$$

Deckendicke des Ersatzsystems:

$$b_{Ers} = \sqrt[3]{\frac{1.044.875 \cdot 12}{100}} = 50,05 \quad [\text{cm}] \quad (4-22)$$

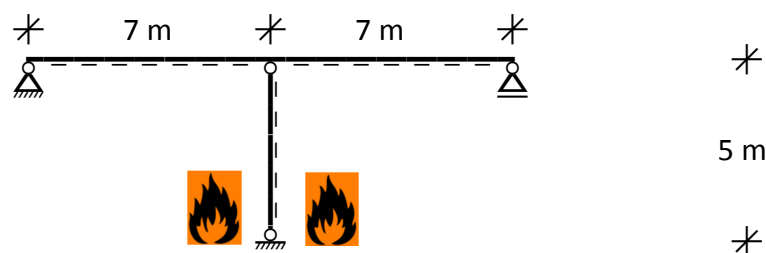


Abbildung 72: *SAFIR*-Ersatzsystem (5 m), Riegel  $b/h = 100/50$  [cm] (C30/37, kalt), Stiel RO 406,4 x 45 (S235)



$$F_{\text{therm}} = 33,6 \text{ kN (siehe Abbildung 73)}$$

$$F_{d,fi} = (G+Q)_{d,fi} + F_{\text{therm}} = 5529 \text{ kN}$$

$$F_{d,fi} = \mathbf{1,0062} * (G+Q)_{d,fi} = 5529 \text{ kN}$$

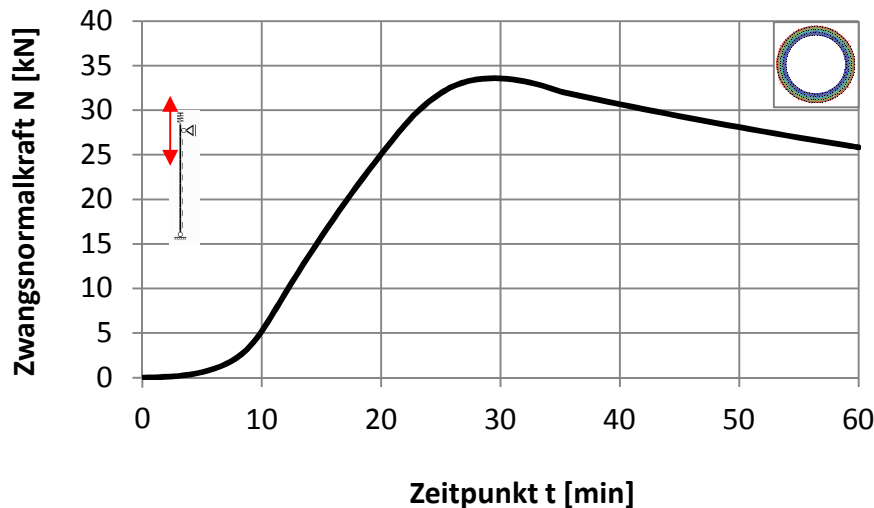


Abbildung 73: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 406,4 x 45 gemäß SAFIR infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K

## 2.) Mittleres, mehrgeschossiges Foyer in einem aufgehenden Gebäude: $l = 8,40 \text{ m}$

Geschossdecken aus Stahlbeton ( $h = 28 \text{ cm}$ , C30/37)

$$G_k/Q_k = 4077/1256 \text{ [kN]}, \quad (G+Q)_d = 7388 \text{ [kN]}, \quad (G+Q)_{d,fi} = 4705 \text{ [kN]}$$

Lastzusammenstellung, siehe Anhang I

Lokaler Brand nach Heskestad gemäß EC1-1-2 (siehe Anhang K)

Stütze RO 406,4 x 45 (S235) mit  $l = 8,40 \text{ m}$  (siehe Abbildung 74)

Ersatzsystem für 4 Geschosse jeweils mit Deckenfeldern  $h = 28 \text{ cm}$  sowie der Dachgeschossdecke mit  $h = 25 \text{ cm}$ , welche idealisiert dehnstarr miteinander gekoppelt sind:

$$I_{y,ges} = \frac{100}{12} \cdot (4 \cdot 28^3 + 25^3) = 861.948 \quad [\text{cm}^4] \quad (4-23)$$

Deckendicke des Ersatzsystems:

$$b_{\text{Ers}} = \sqrt[3]{\frac{861.948 \cdot 12}{100}} = 46,94 \quad [\text{cm}] \quad (4-24)$$

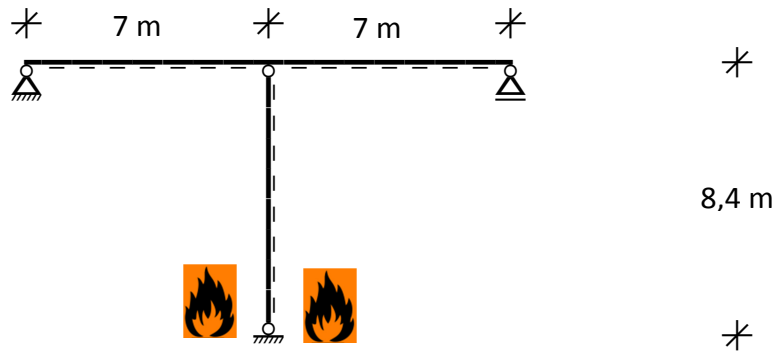


Abbildung 74: SAFIR-Ersatzsystem (8,4 m): Riegel b/h = 100/46,9 [cm] (C30/37, kalt), Stiel RO406,4 x 45 (S235)

$$F_{\text{therm}} = 30,6 \text{ kN (siehe Abbildung 75)}$$

$$F_{d,fi} = (G+Q)_{d,fi} + F_{\text{therm}} = 4736 \text{ kN}$$

$$F_{d,fi} = \mathbf{1,0066} * (G+Q)_{d,fi} = 4736 \text{ kN}$$

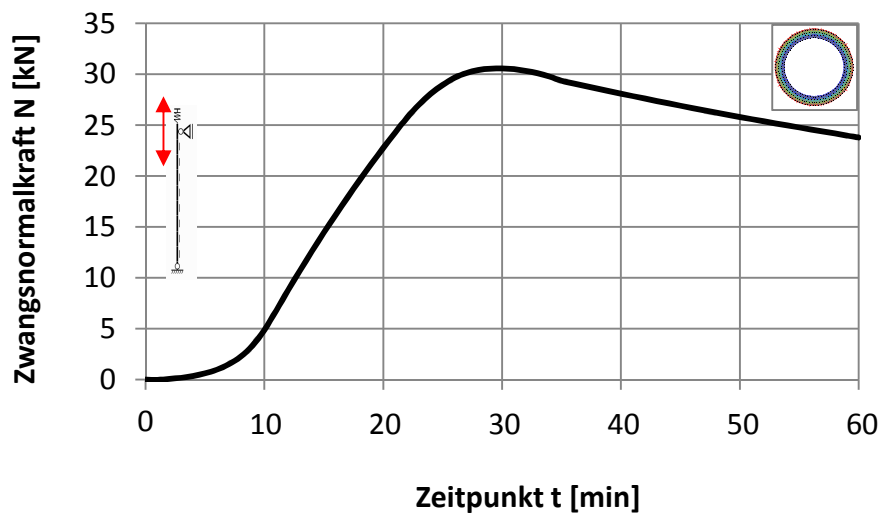


Abbildung 75: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 406,4 x 45 gemäß SAFIR infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K

3.) Großes Foyer in einem eingeschossigen Atrium: l = 12,00 m

$$G_k/Q_k = 233/77 \text{ [kN]}, \quad (G+Q)_d = 425 \text{ [kN]}, \quad (G+Q)_{d,fi} = 245 \text{ [kN]}$$

Lastzusammenstellung, siehe Anhang I

Lokaler Brand nach Heskestad gemäß EC1-1-2 (siehe Anhang K)

Stütze RO 323,9 x 5,0 (S235) mit l = 12,00 m (siehe Abbildung 76)

Dach aus Stahlträgern (IPE 450, S235)

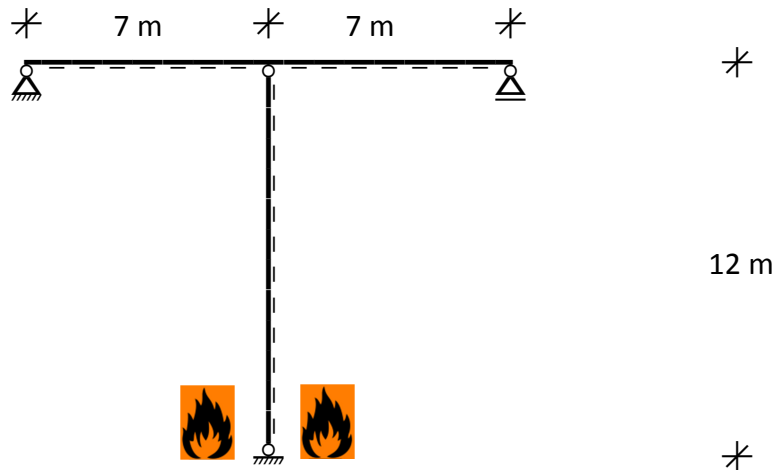


Abbildung 76: SAFIR-Ersatzsystem (12 m): Riegel IPE 450 (S235, kalt), Stiel RO 323,9 x 5,0 (S235)

$$F_{\text{therm}} = 40,6 \text{ kN (siehe Abbildung 77)}$$

$$F_{d,fi} = (G+Q)_{d,fi} + F_{\text{therm}} = 286 \text{ kN}$$

$$F_{d,fi} = \mathbf{1,1673} * (G+Q)_{d,fi} = 286 \text{ kN}$$

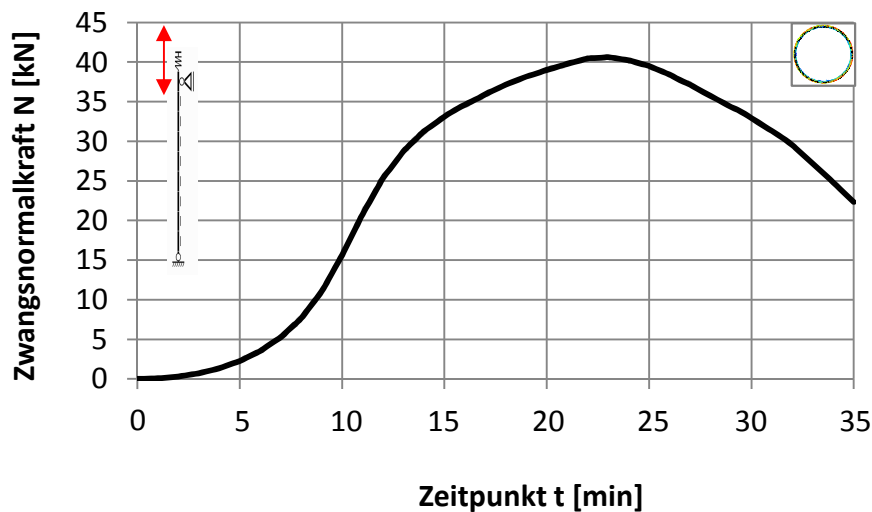


Abbildung 77: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 323,9 x 5,0 gemäß SAFIR infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K

Wird anstelle des lokalen Brands die ETK über die gesamte Stützenlänge angesetzt, so vergrößern sich die Zwangskräfte am Ersatzsystem entsprechend, siehe am Beispiel *12 m Atrium* zum Vergleich:  $F_{\text{therm,ETK}} = 116,4 \text{ kN}$  (gemäß Tabelle 18).

Der **unberücksichtigte Lastanteil** aus dem thermischen Zwang bei Verwendung des statischen Systems *Pendelstütze* beträgt bei den untersuchten brandschutztechnisch ungeschützten Geschossstützen in aufgehenden Gebäuden am unbelasteten System **< 1 %** der Gesamtlast, was als vernachlässigbar gering einzustufen ist. Hingegen vergrößert sich dieser prozentuale Lastanteil bei schlanken, ungeschützten Stützen eingeschossiger Gebäudeteile mit geringer Auflast und hoher Riegelsteifigkeit am unbelasteten System auf **fast 17 %**, was je nach Querschnittsausnutzung eine bemessungsrelevante Größenordnung einnimmt. Für solche Anwendungsfälle liegt das statische System der *Pendelstütze* nicht ohne weiteres auf der sicheren Seite.

In welcher Größenordnung Zwangskräfte infolge gehinderter, thermischer Dehnungen auftreten, hängt also neben der einwirkenden Temperatur und der **Dehnsteifigkeit** des Stützenquerschnitts selbst (Querschnittskriterium) vor allem von den Steifigkeitsverhältnissen des vertikalen Auflagers in Form der **Biegesteifigkeit** des angeschlossenen Querriegels ab (Steifigkeitskriterium). Da es sich bei der thermischen Zwangskraft zudem um eine zeitlich veränderliche Größe in Abhängigkeit des Brand-szenarios handelt, ist die sich tatsächliche einstellende Größenordnung am beanspruchten System festzustellen.

**Querschnittskriterium:** Der Stützenquerschnitt aus der statischen Bemessung bei Raumtemperatur resultiert entweder überwiegend aus der **Auflast** (Querschnitttragfähigkeit) oder überwiegend aus der **Knicklänge** (Stabilität).

Ist bei einer wirtschaftlich bemessenen Stütze die Auflast für die Dimensionierung des Stützenquerschnitts maßgebend, entspricht derselbe Absolutwert einer thermischen Zwangskraft logischerweise einem geringeren prozentualen Anteil an der Gesamtlast, als wenn bei gleichem Stützenquerschnitt die Knicklänge bemessungsrelevant für die Querschnittsdimensionierung ist. In dem Fall wäre die Grenztragfähigkeit der Stütze bereits bei einer geringeren Auflast erreicht, wie zum Beispiel bei einem eingeschossigen Atrium. Dabei geht mit der größeren Knicklänge auch gleichzeitig eine geringere Gesamtauflast einher. Im Umkehrschluss lässt sich daher ableiten, dass bei einer brandschutztechnisch ungeschützten Pendelstütze mit zunehmender Schlankheit der Einfluss aus nicht berücksichtigtem, thermischem Zwang qualitativ ansteigt. Resultiert die Querschnittsabmessung eines Bauteils jedoch überwiegend aus der Auflast, wird der oben beschriebene Einfluss deutlich geringer.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Erfahrungsgemäß wird bei hohen und schlanken Bauteilen mit geringer Auflast häufig bereits aus ästhetischen Gründen auf die vollständige Optimierung des Querschnittes verzichtet, da eine „zu schlanke“ Stütze zu Lasten des Sicherheitsgefühls geht.

**Steifigkeitskriterium:** Als maßgebendes Kriterium für die tatsächliche Größenordnung von thermischen Zwangskräften ist qualitativ das Verhältnis der Steifigkeiten von Stütze und horizontalem, stützendem Bauteil (Geschossdecke oder Dachkonstruktion) zu benennen. Jedoch besteht beim quantitativen Vergleich der Einflüsse auf den thermischen Zwang in Abhängigkeit von der Foyer-Kategorie nach Abschnitt 2.5.2 die Schwierigkeit, die maßgebenden Parameter aus der Vielzahl der Einflüsse heraus zu filtern, insbesondere wenn diese temperaturabhängig sind. Bereits aus den Foyer-Kategorien gemäß Abschnitt 2.5.2 ergeben sich jeweils sehr unterschiedliche, charakteristische Tragwerkeigenschaften, die sich wiederum jeweils unterschiedlich im Brandfall auswirken. Beim Vergleich der Steifigkeitsverhältnisse bei Raumtemperatur untereinander wird deutlich, dass das Verhältnis von  $EI_{\text{Riegel}} / EA_{\text{Stütze}}$  der 5 m-Foyerstütze im aufgehenden Gebäude nur etwa halb so hoch ist (320) wie das der 12 m-Atriumstütze (673), siehe hierzu Anhang N. Das bedeutet, die relative Steifigkeit des vertikalen Auflagers gegenüber der Atriumstütze ist bereits bei Raumtemperatur etwa doppelt so hoch, wie die relative Steifigkeit des vertikalen Auflagers gegenüber der 5 m-Foyerstütze. Unter Berücksichtigung des Lastfalls *Lokaler Brand* wird der Zusammenhang entsprechend komplexer.

Da sich bei einem lokalen Brand die Dehnsteifigkeit einer Stütze deutlich reduziert, erhöht sich qualitativ die relative Biegesteifigkeit des Riegels gegenüber der Stütze noch zusätzlich. Dieser Effekt ist unter anderen ursächlich für die Knicklängenreduktion im Brandfall (gemäß Kapitel 4.5.2). Hinzu kommt noch der Aspekt, dass sich zum Einen die schlanke Atriumstütze bei gleicher einwirkender Temperatur schneller erwärmt, als die massige 5 m-Foyerstütze und zum Anderen innerhalb der Stütze keine homogene Temperatur, sondern sich ein Temperaturgradient in Längsrichtung ausbildet. Gleichzeitig ist dabei noch zu beachten, dass die maximale thermische Zwangskraft nicht bei der maximalen Bauteiltemperatur auftritt (siehe auch Abbildung 64). Aus der Formel der translatorischen Federsteifigkeit  $C_z$  (4-25) ergibt sich daher der Zusammenhang der thermischen Zwangskraft  $F_{\text{th}}$  eines Teilsystems infolge thermischer Dehnungen eines erwärmten, ungeschützten Stützenquerschnittes und der korrespondierenden, zurückgelegten Verformung  $f_{\text{th}}$ , welche durch die Riegelsteifigkeit des Riegelquerschnitts maßgebend bestimmt wird:

$$C_z = \frac{F_{\text{th}}}{f_{\text{th}}} \quad [\text{kN/m}] \quad (4-25)$$

$C_z$	translatorische Federsteifigkeit	[kN/m],
$F_{th}$	thermische Zwangskraft	[kN],
$f_{th}$	thermischer Verformungsweg des Systems	[m, cm].

Für die drei Beispiele der Foyer-Kategorien ergibt sich so folgender Zusammenhang:

5,0 m Foyer:	$F_{th} = 33,57 \text{ kN};$	$f_{th} = 1,19 \text{ cm}$	$C_z = 2821 \text{ kN/m}$
8,4 m Foyer:	$F_{th} = 30,57 \text{ kN};$	$f_{th} = 1,30 \text{ cm}$	$C_z = 2352 \text{ kN/m}$
12 m Atrium:	$F_{th} = 40,62 \text{ kN};$	$f_{th} = 3,25 \text{ cm}$	$C_z = 1250 \text{ kN/m}$

Zusammengefasst lässt sich konstatieren, dass das statische System der *Pendelstütze* für ungeschützte Geschossstützen aufgehender Gebäude bei der Untersuchung lokaler Brände dieser Größenordnung bei optimal ausgenutzten Bauteilen nicht immer vollständig auf der sicheren Seite liegt, jedoch aufgrund der sich so ergebenden, akzeptablen Lastunterschreitungen von ungefähr 1 % ein sinnvolles, statisches System darstellt. Die zusätzliche Berücksichtigung thermischer Zwangskräfte führt für Geschossstützen aufgehender Gebäude zu keinen signifikanten Änderungen des Ergebnisses.

Der Einfluss des fehlenden Lastanteils, aus nicht berücksichtigtem, thermischem Zwang infolge einer vertikal verschieblichen Lagerung wird jedoch umso größer, je schlanker eine ungeschützte Stütze ist und umso größer die relative Steifigkeit des Riegels gegenüber der Stütze ist. Schlanke Stützen eingeschossiger Gebäudeteile mit geringer Auflast sind charakteristisch für Atrien. Bei deren Untersuchung führte das statische System der *Pendelstütze* zu einer Vernachlässigung des Lastanteils aus dem thermischen Zwang infolge eines lokalen Brandes in einer Größenordnung von bis zu 17 %. Da dieser Wert durchaus bemessungsrelevant ist, sollte der Einfluss des thermischen Zwangs bei der Untersuchung von schlanken, ungeschützten Atriumstützen unter lokaler Brandbeanspruchung mit überprüft und berücksichtigt werden.

#### 4.5.2 Knicklänge im Brandfall

Die Knicklänge im Brandfall einer Geschossstütze in einem ausgesteiften Gebäude darf entsprechend der Abschnitte 5.3.2 und 5.3.3 gemäß [DIN EN1992-1-2:2010], 4.2.3.2 gemäß [DIN EN1993-1-2:2010] und 4.3.5.1 gemäß [DIN EN1994-1-2:2010] gegenüber der Knicklänge bei Raumtemperatur reduziert werden. Die Basis dafür ist im bauordnungsrechtlichen Raumabschlusskriterium zu sehen, woraus das Grundprinzip unterstellt wird, dass es immer nur in einem Geschoss brennt. Szenarien wie

Brandstiftungen oder ähnliches bleiben dabei außer Betracht. Das führt dazu, dass sich die Steifigkeit der Stütze im brennenden Geschoss signifikant reduziert, während die Steifigkeiten in den angrenzenden, brandschutztechnisch abgetrennten Geschossen erhalten bleiben. Die Differenzen der Steifigkeiten wirken wie eine Einspannung, was an Knickfiguren von Stützen nach Bränden ersichtlich ist. Damit sich im Brandfall eine Einspannung in die Nachbargeschosse ausbilden kann, müssen entsprechende bauliche Randbedingungen vorliegen. Entsprechend der baustoffbedingten Bauweisen sind die Eurocode-Regelungen anwendbar, was nachfolgende Abbildungen verdeutlichen. Mit dem Fokus auf die Stahlbauweise in Atrien bzw. Foyers ergibt sich hierbei noch ein Sonderfall, wenn in einem eigentlichen Stahlbetonskelettbau aus architektonischen Gründen an einzelnen Positionen Stahlstützen vorgesehen werden:

### Fall 1: Stahlbetonskelettbau (klassisch)

Die Stützenbewehrung verläuft durch die Decke durch, was bei einer monolithischen Bauweise zur rotationsbehindernden Lagerung der Stütze führt (siehe Abbildung 78). Die Kicklängenreduktion des Eurocodes ist somit anwendbar.

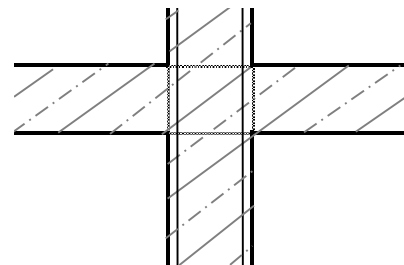


Abbildung 78: Knotenpunkt Stütze-Decke (Stb.-Skelettbau)

### Fall 2: Stahlskelettbau/ Stahlverbundskelettbau (klassisch)

Die Stützen laufen durch, die Träger schließen seitlich an den Stützen an und die Deckenplatten lagern auf den Trägern auf (siehe Abbildung 79). Die Einspannung infolge der Steifigkeitsdifferenzen im Brandfall kann sich ebenfalls einstellen.

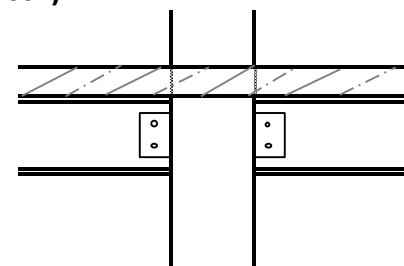


Abbildung 79: Knotenpunkt Stütze-Decke (Stahlskelettbau)

### Fall 3: Stahlbetonskelettbau mit einzelnen Stahlstützen (kombiniert)

Die Geschossdecken laufen entsprechend der Stahlbetonskelettbauweise durch, Stahlstützen werden beispielsweise mit Kopfplatten an die Decken gelenkig angeschlossen (Abbildung 80). Dann gilt auch im Brandfall die Knicklänge wie bei Raumtemperatur. Eine Einspannung kann sich hier nicht einstellen.

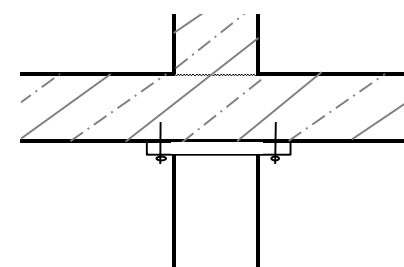


Abbildung 80: Knotenpunkt Stahlstütze-Betondecke

## 4.6 Bauteilbemessung

### 4.6.1 Bemessungsverfahren

#### 4.6.1.1 Vereinfachte Bemessung im Brandfall (Level 2) mit *Elefir-EN*

Die numerische Umsetzung des vereinfachten Bemessungsverfahrens im Brandfall (Level 2) erfolgt mit dem Programm *Elefir-EN* gemäß [VilaReal2010], veröffentlicht in [Franssen2010]. Für die vollständigen Ergebnisse wird auf den Anhang P verwiesen. Die Tatsache, dass *Elefir-EN* im Rahmen der Stützenbemessung im Brandfall eine kritische Temperatur ausgibt, ist hier kein Widerspruch zu Abschnitt 4.2.4 gemäß [DIN EN1993-1-2:2010], sondern entspricht der umgerechneten kritischen Temperatur unter Berücksichtigung des Abminderungsfaktors  $\chi_{fi}$  für das Biegeknicken unter Brandbeanspruchung, siehe auch Seite 149 ff. in [Franssen2010]. Der hier verwendete Begriff der kritischen Stützentemperatur hat daher den Charakter eines Hilfswertes zur besseren Visualisierung der Ergebnisse, siehe auch Abbildung 82 und folgende. Mit dem Fokus auf die Ermöglichung der ungeschützten Stahlbauweise werden die Stahlstützen hier im brandschutztechnisch ungeschützten Zustand untersucht.

Für die Ermittlung der Temperaturen im Brandfall wird das Szenario Lokaler Brand nach Heskestad zugrunde gelegt, siehe Anhang K. Im Rahmen der vereinfachten Bemessung im Brandfall wird eine Bemessungstemperatur für den gesamten Querschnitt angesetzt. Mit dem Fokus auf eine vollständig ungeschützte Bauweise ist zu berücksichtigen, dass gemäß Heskestad im unteren Meter pauschal die mittlere Flammentemperatur von 900 °C zugewiesen wird. In Abhängigkeit von der Massigkeit der Querschnitte erfahren diese so die entsprechende Erwärmung über die Zeit. Anschließend wird das H-D-Modell gemäß 4.4.3 zugrunde gelegt und die Berechnungsergebnisse mit denen des lokalen Brandes nach Heskestad verglichen. Die Analyse erfolgt in den Kapiteln 4.6.2 bis 4.6.4 (siehe auch Anhang P).

#### 4.6.1.2 Allgemeine Bemessung im Brandfall (Level 3) mit *SAFIR*

Die Stützenversagenszeit unter Brandeinwirkung gemäß dem allgemeinen Bemessungsverfahren wird mit dem strukturmechanischen Stabwerksprogramm *SAFIR* [Franssen2005] berechnet. Hierbei gilt die Bernoulli-Hypothese, das Ebenbleiben des Querschnittes. Damit können ein-, zwei- und auch dreidimensionale Tragwerke unter thermischer und mechanischer Beanspruchung rechnerisch simuliert werden. Als thermische Einwirkung können neben Normbrandkurven, wie der ETK, auch



individuelle Naturbrandkurven eingelesen werden. Dabei lässt sich innerhalb eines Bauteils ein Temperaturgradient nicht nur über den Querschnitt, sondern auch in Längsrichtung modellieren. Dafür werden die einzelnen Abschnitte unterschiedlicher Temperaturen infolge eines lokalen Brandes in gestapelter Form zu einer Gesamtstütze zusammengefügt. Nach der mechanischen Analyse werden die Ergebnisse für die Auswertung entsprechend ausgelesen. Gemäß Abs. 4.3.3 (7) [DIN EN 1993-1-2:2010] wird die Vorkrümmung der Stütze in Anlehnung an die Knickspannungslinien mit einem Stich von  $e_0 = 1/1000$  gewählt und mit einer Sinusfunktion approximiert. Das System wird mit der mechanischen Einwirkung im Brandfall  $E_{d,fi}$  konstant belastet. Zur Berücksichtigung der Erkenntnisse über die Lagerungsbedingungen im Brandfall aus Kapitel 4.5.2 wird die Stütze innerhalb eines T-förmigen Teilsystems modelliert. Die Analyse erfolgt in den Kapiteln 4.6.2 bis 4.6.4 (siehe auch Anhang Q).

#### 4.6.2 Kategorie 1: Kleines Foyer mit Stahlstütze

Entsprechend der Kategorisierung von Eingangssituationen gemäß Kapitel 2.5.2 wird nachfolgende Stütze aus einem kleinen, eingeschossigen Foyer innerhalb eines aufgehenden Gebäudes unter einem lokalen Brand nach Anhang K und Anhang L berechnet.

##### Mechanische Einwirkungen

Siehe auch Kapitel 4.3. Für die ausführliche Lastzusammenstellung wird auf Anhang I verwiesen:

$$G_k/Q_k = 4766/1458 \text{ [kN]},$$

$$(G+Q)_{d,fi} = 5495 \text{ kN}$$

##### Festlegung der Stützenabmessungen

$$\text{RO } 406,4 \times 45 \quad (A/V = 22,2 \text{ m}^{-1})$$

alternativ

$$\text{HD } 400 \times 463 \quad (A/V = 41,1 \text{ m}^{-1})$$

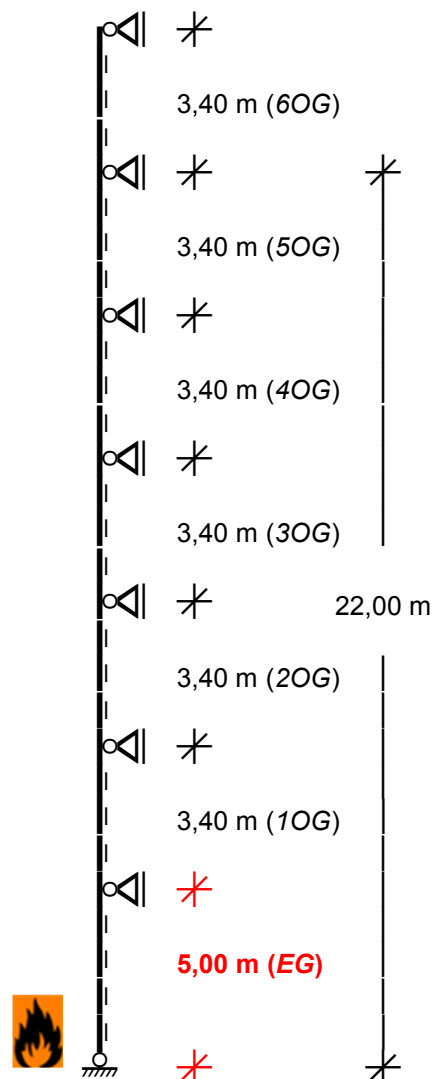


Abbildung 81: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 1)

#### 4.6.2.1 Bemessung bei Raumtemperatur

Für die Stützenbemessung bei Raumtemperatur wird im Rahmen dieser Arbeit auf den Anhang O verwiesen. Für Kat.1 sind die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengestellt:

Tabelle 8: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung)

Querschnitt:	Nachweis der Stütze (5 m):	Ergebnis:
<b>RO 406,4 x 45</b> (S235)	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,79</b>
QSK 1 / QSK <sub>fi</sub> 1	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,83</b>
<b>HD 400 x 463</b> (S235)	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,68</b>
QSK 1 / QSK <sub>fi</sub> 1	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,81</b>

#### 4.6.2.2 Bemessung im Brandfall (Level 2)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der vereinfachten Bemessung im Brandfall in Kurzform grafisch dargestellt (Abbildung 82 bis Abbildung 87). Der Verlauf der einwirkenden Flammentemperatur entspricht der grünen Linie, der Verlauf der Bauteiltemperatur der roten Linie. Der Bauteilwiderstand wird durch die blaue Linie gekennzeichnet. Ragt der Verlauf der roten Linie über die blaue Grenzlinie hinaus, wird der Bauteilwiderstand überschritten. In dem Fall werden brandschutztechnische Ertüchtigungsmaßnahmen oder ein anderer Stützenquerschnitt erforderlich.

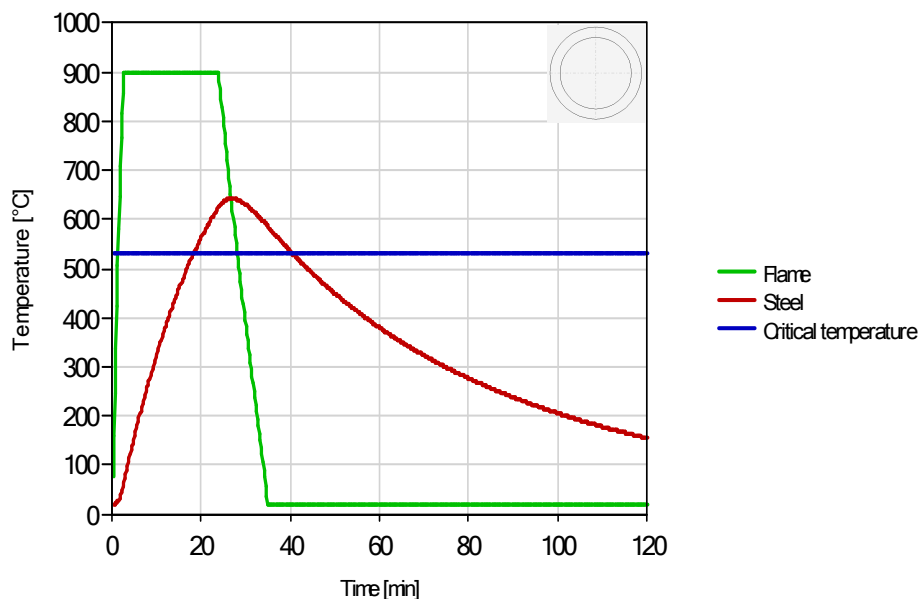


Abbildung 82: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

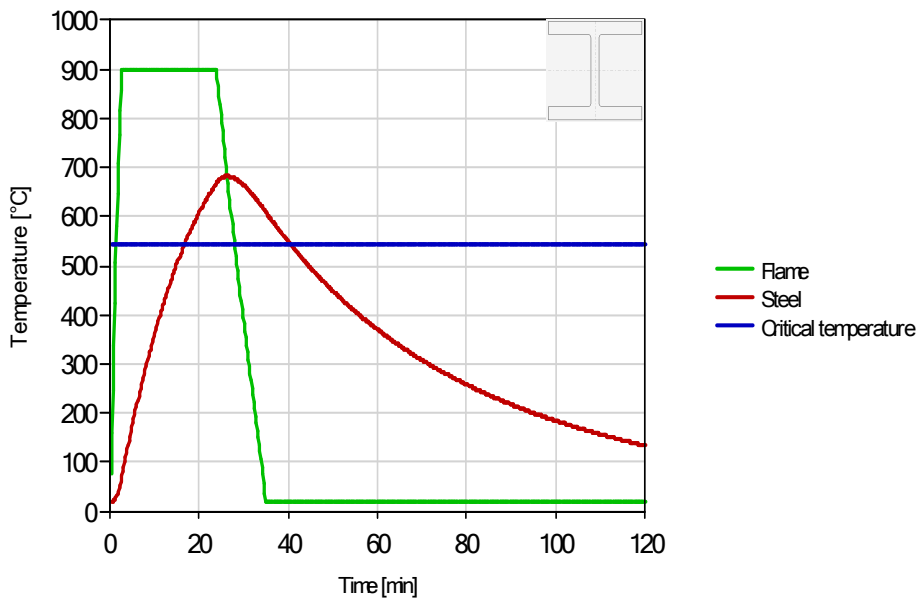


Abbildung 83: Kat. 1, HD 400 x 463: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Trotz Profilkfaktoren kleiner  $50 \text{ m}^{-1}$  erwärmen sich beide Querschnitte über die kritische Stützentemperatur hinaus, was numerisch jeweils zum Bauteilversagen führt. Die Anhebung der Bemessungshöhe  $z$  von 50 cm auf 1,0 m hat bereits zur Auswirkung, dass beide Stützenquerschnitte das Brandszenario rechnerisch überstehen, wie folgt:

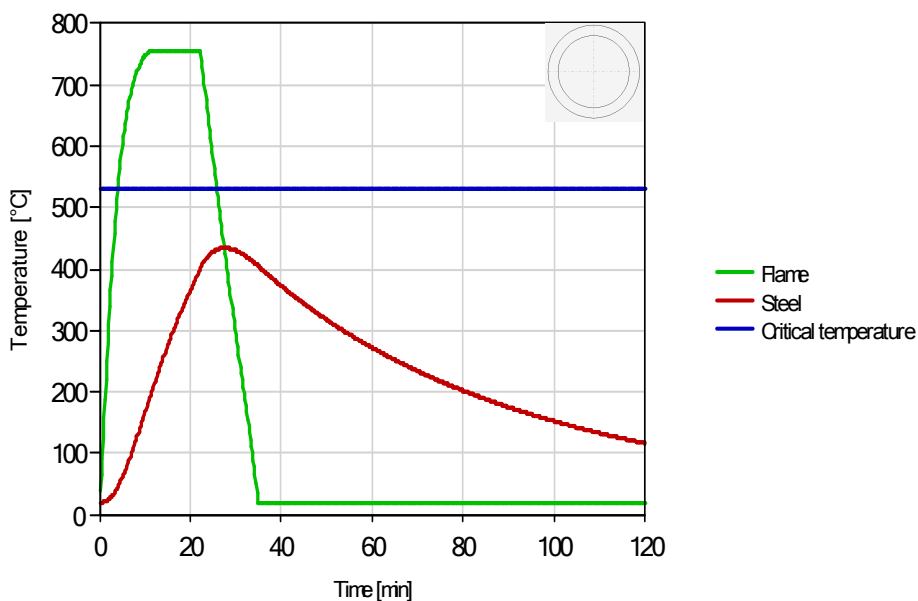


Abbildung 84: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

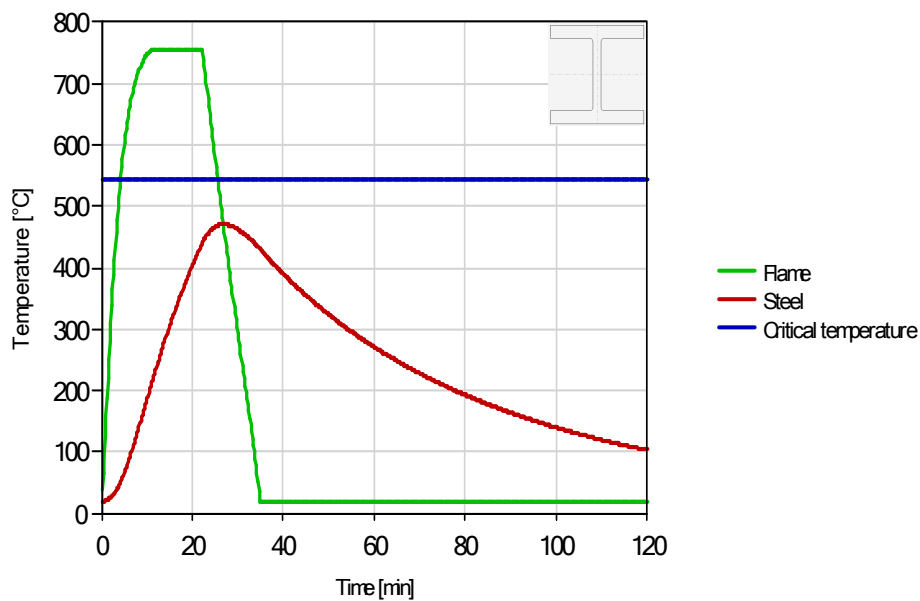


Abbildung 85: Kat. 1, HD 400 x 463: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der brandschutztechnischen Ertüchtigung, zumindest im unteren Bereich der Stütze. Lässt sich jedoch ausschließen, dass die Stütze unmittelbar von der Brandlast umgeben ist, bietet der Ansatz des H-D-Modells hier die Möglichkeit, bereits bei 0,5 m Abstand zur Brandquelle beide Querschnitte ungeschützt nachzuweisen, wie nachfolgend ersichtlich ist:

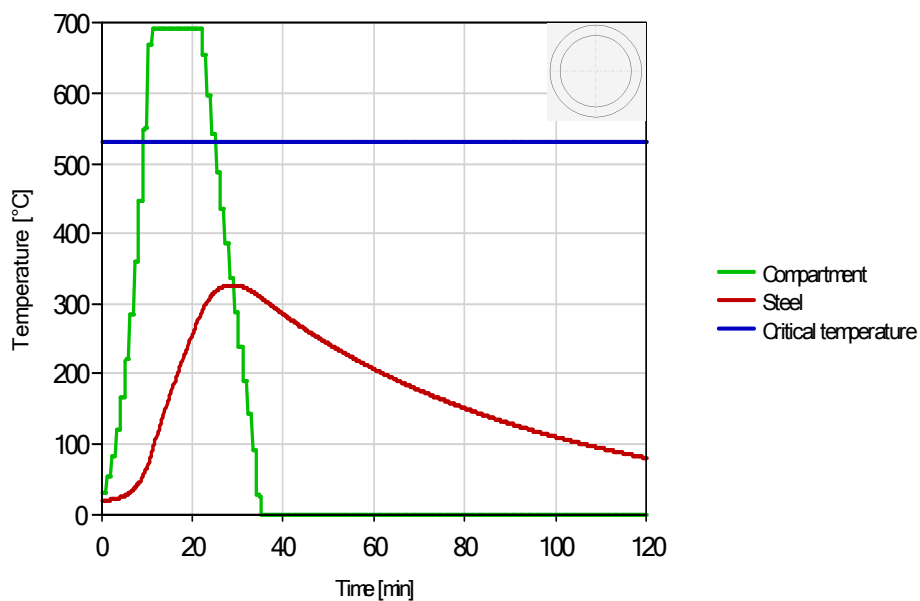


Abbildung 86: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m}$ /  
 $z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

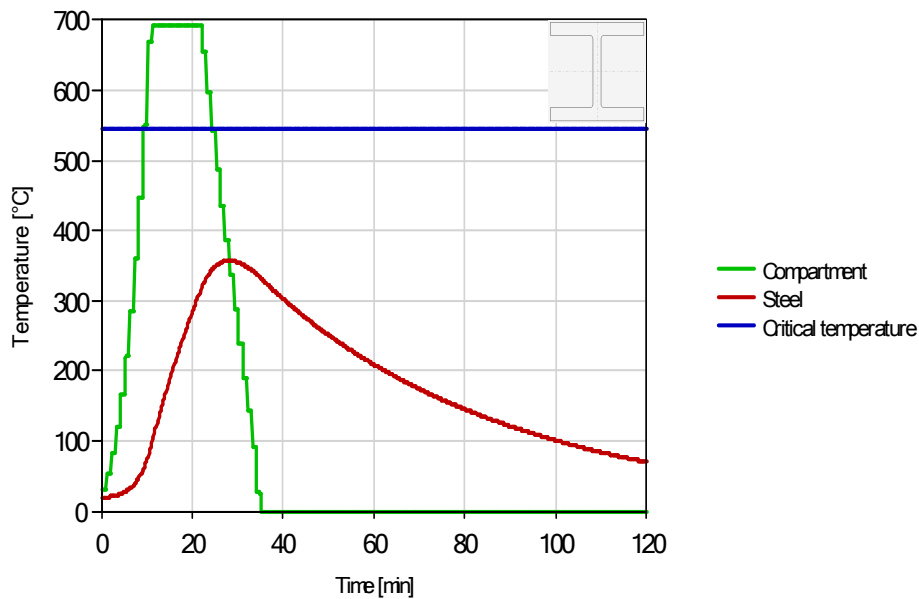


Abbildung 87: HD 400 x 463: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m} / z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

#### 4.6.2.3 Bemessung im Brandfall (Level 3)

Für die thermische und mechanische Analyse des Rohrprofils wird im Rahmen des allgemeinen Berechnungsverfahrens das strukturmechanische Stabwerksprogramm *SAFIR* verwendet, siehe auch Kapitel 4.6.1. Dabei wird die zeitlich veränderliche, einwirkende Temperatur gestaffelt über die Höhe der Stütze gemäß nachfolgendem Temperaturprofil aufgebracht, um so in der Stütze (hier RO 406,4 x 45) einen

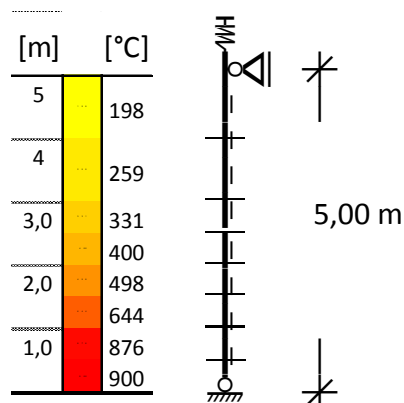


Abbildung 88: Umgebungstemperaturprofil der einzelnen Stützenabschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes

realistischen Temperaturgradienten zu erzeugen. In Abbildung 88 ist die maximal auftretende, äußere Temperatur je Stützenabschnitt dargestellt. Die unteren drei Meter der Stütze wurden dafür in 50 cm-Abschnitte aufgeteilt, die Abstufung darüber erfolgt in ganzen Meter-Abschnitten. Für die Stützenabschnitte wird die Gastemperatur jeweils in Abschnittsmittle zugrunde gelegt, um die mittlere Bauteiltemperatur des jeweiligen Stützenabschnittes zu berechnen. Beispielsweise wird für den untersten Abschnitt die Temperatur auf Höhe  $z = 25 \text{ cm}$  angesetzt.

Dabei werden beide Systeme untersucht: Mit vertikaler Feder gemäß Abbildung 88 und mit vertikal verschieblicher Lagerung. Entgegen dem vereinfachten Berechnungsverfahren besteht gemäß Tabelle 9 das Bauteil (RO 406,4 x 45) den lokalen Brand rechnerisch ohne Querschnittsversagen. Das gilt für beide untersuchte statische Systeme. Parallel dazu wird die Versagenszeit anhand der ETK, womit der gesamte Querschnitt beflammt wird, ermittelt. Wie zu erwarten, tritt bei der Stütze infolge der ETK gegenüber dem lokalen Brand ein Bauteilversagen ein. Die Versagenszeit beträgt 1810 s (30,2 min). Dadurch kann die Stütze sogar ungeschützt in die Feuerwiderstandsklasse F30 eingeordnet werden. Jedoch beträgt die Differenz der Versagenszeit zwischen der Pendelstütze und dem T-förmigen Ersatzsystem hier nur 20 s. Dieses ist darauf zurück zu führen, dass das Ersatzsystem nur eine geringfügig höhere Last ( $\Delta < 1\%$ ) infolge thermischen Zwangs aufweist.

Tabelle 9: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 1)

Stütze (5 m)	Versagenszeit infolge des <b>lokalen Brandes</b> ( $r = 0$ )	Versagenszeit infolge der <b>ETK</b>
<b>RO 406,4 x 45</b> als Pendelstütze (ohne thermischen Zwang)	<b>kein Bauteilversagen!</b> $\Theta_{m,max} 553\text{ °C}$ (grad T) unter $N_{d,fi} = 5495\text{ kN}$	<b>1830 s</b> (30,5 min) bei $\Theta_m = 525\text{ °C}$ unter $N_{d,fi} = 5495\text{ kN}$
<b>RO 406,4 x 45</b> am Ersatzsystem (inkl. thermischen Zwang)	<b>kein Bauteilversagen!</b> $\Theta_{m,max} 553\text{ °C}$ (grad T) $N_{fi,max} \triangleq 5518\text{ kN}$ (+ 0,5 %)	<b>1810 s</b> (30,2 min) bei $\Theta_m = 518\text{ °C}$ $N_{fi,max} \triangleq 5563\text{ kN}$ (+ 1 %)

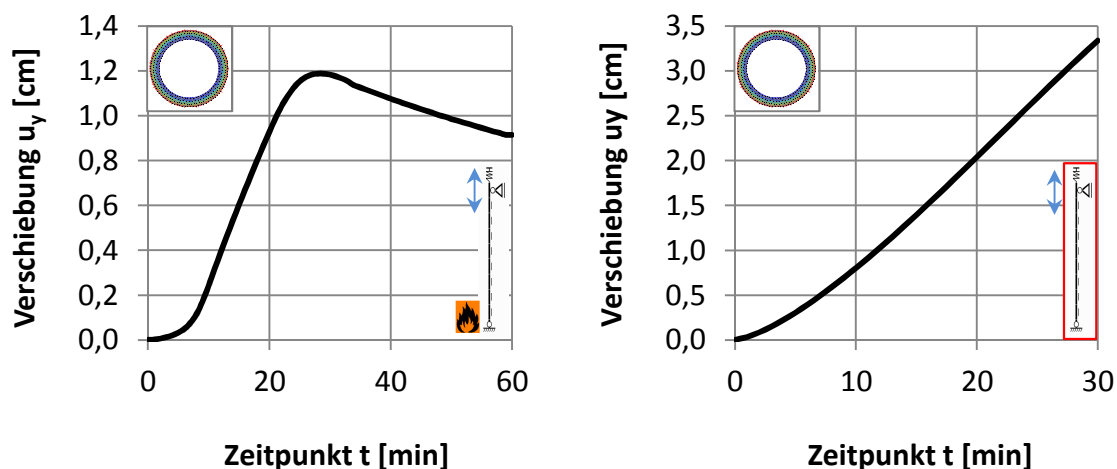


Abbildung 89: Gegenüberstellung der Knotenverschiebungen am Ersatzsystem der 5 m-Stütze unter lokalem Brand und unter der ETK

Die Auswirkungen unterschiedlicher Brandszenarien auf die Stütze können anhand der unterschiedlichen Knotenverschiebungen in vertikaler Richtung entnommen werden (Abbildung 89). Zur Dokumentation der Massigkeit des untersuchten Profils (RO 406,4 x 45) wird beispielhaft die Temperaturverteilung über den Stahlquerschnitt in der Ebene zum Zeitpunkt der maximalen Querschnittstemperatur dargestellt (siehe Abbildung 90). Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite beträgt 37,1 K und ist in Abbildung 91 über den Brandverlauf dargestellt.

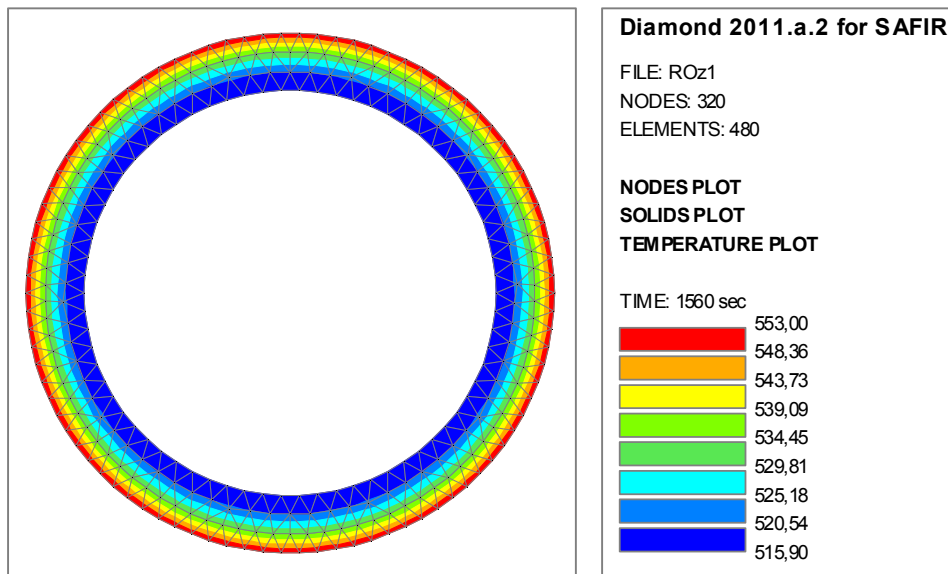


Abbildung 90: Temperaturverteilung über den Stahlquerschnitt RO 406,4 x 45 des untersten Stützenabschnittes ( $z = 0,5$  m) zum Zeitpunkt  $t = 1560$  s des lokalen Brandes

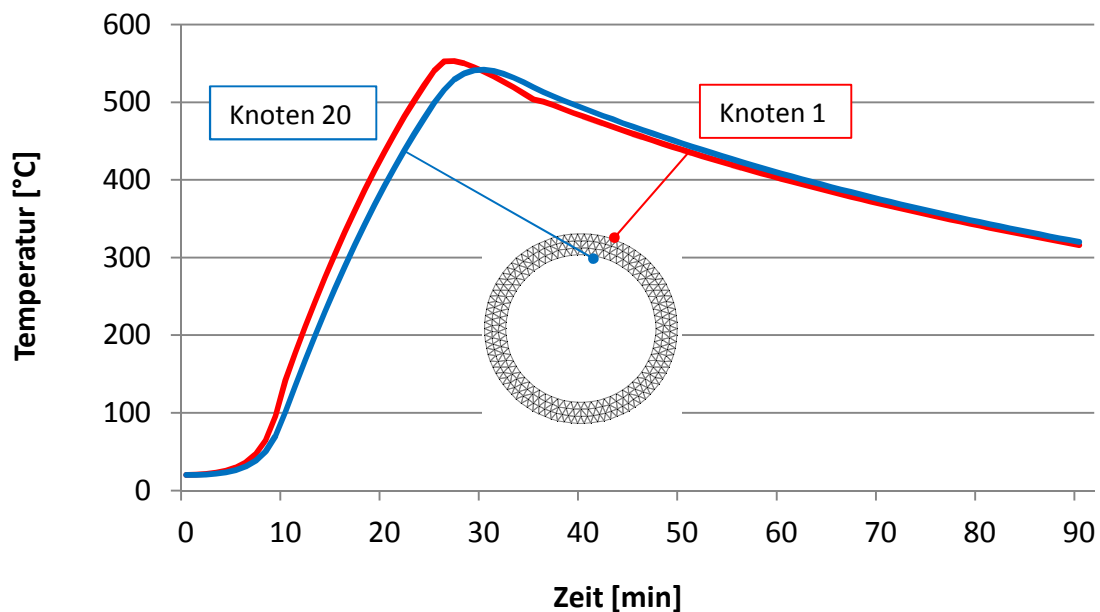


Abbildung 91: Knotentemperaturen eines Innen- und Außenknoten des untersten Stützenabschnittes (RO 406,4 x 45) im Brandverlauf des lokalen Brandes mit SAFIR

### 4.6.3 Kategorie 2: Mittleres Foyer mit Stahlstütze

Entsprechend der Kategorisierung von Eingangssituationen gemäß Kapitel 2.5.2 wird nachfolgende Stütze aus einem mittleren, mehrgeschossigen Foyer innerhalb eines aufgehenden Gebäudes unter einem lokalen Brand (Anhang K und Anhang L) berechnet.

#### Mechanische Einwirkungen

Siehe auch Kapitel 4.3. Für die ausführliche Lastzusammenstellung wird auf Anhang I verwiesen:

$$G_k/Q_k = 4077/1256 \text{ [kN]},$$

$$(G+Q)_{d,fi} = 4843 \text{ kN}$$

#### Festlegung der Stützenabmessungen

$$\text{RO } 406,4 \text{ mm} \times 45 \quad (A/V = 22,2 \text{ m}^{-1})$$

alternativ

$$\text{HD } 400 \times 551 \quad (A/V = 35,2 \text{ m}^{-1})$$

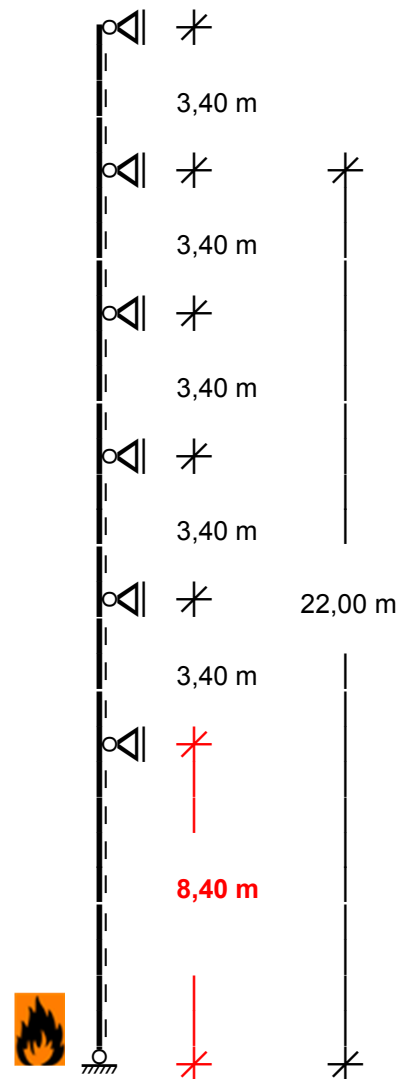


Abbildung 92: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 2)

#### 4.6.3.1 Bemessung bei Raumtemperatur

Für die Stützenbemessung bei Raumtemperatur wird im Rahmen dieser Arbeit auf den Anhang O verwiesen. Die Ergebnisse von Kategorie 2 sind in Tabelle 10 dargestellt:

Tabelle 10: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung)

Querschnitt:	Nachweis der Stütze (5 m):	Ergebnis:
<b>RO 406,4 x 45</b> (S235) QSK 1 / QSK <sub>fi</sub> 1	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,68</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,80</b>
<b>HD 400 x 551</b> (S235) QSK 1 / QSK <sub>fi</sub> 1	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,49</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,77</b>



#### 4.6.3.2 Bemessung im Brandfall (Level 2)

Die numerische Umsetzung der lokalen Bemessung erfolgt wie in Kapitel 4.6.2 mit *Elefir-EN*, siehe auch Anhang P. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 93 bis Abbildung 98:

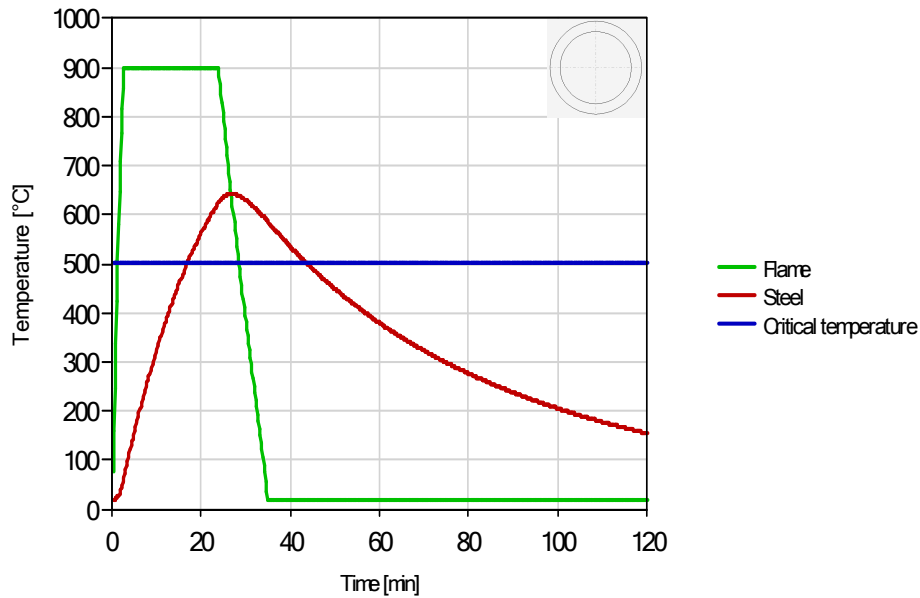


Abbildung 93: Kat. 2, RO 406,4 x 45 mm: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

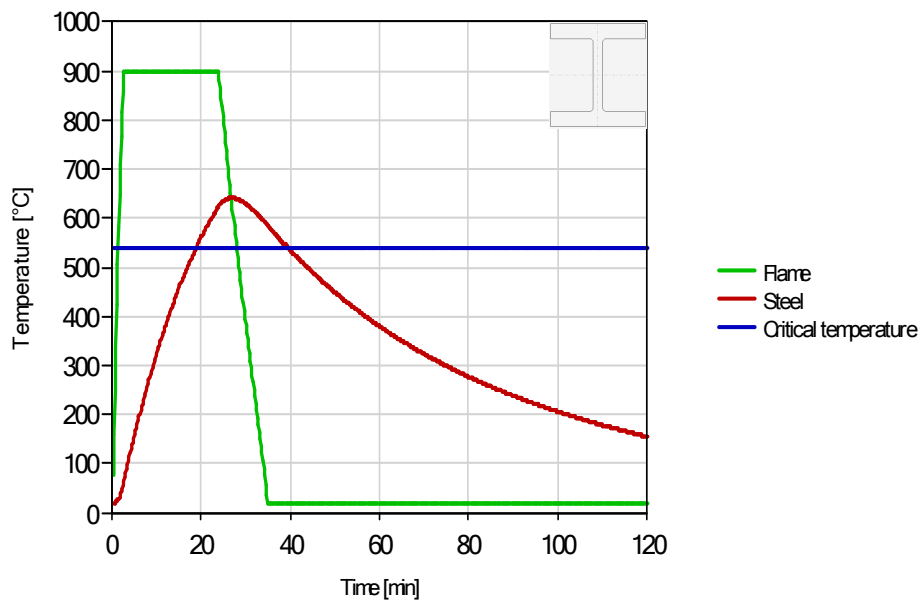


Abbildung 94: Kat. 2, HD 400 x 551: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Bei den Stahlstützen mit der Länge von 8,40 m zeigt sich ein vergleichbares Tragverhalten wie bei der 5 m-Stütze. Der Ansatz der Bemessungshöhe von  $z = 50$  cm führt ebenfalls zum Stützenversagen beider Querschnitte (Abbildung 93 und Abbildung 94). Bei einer Bemessungshöhe von  $z = 1,0$  m werden beide Querschnitte aufgrund der Massigkeit in Relation zur thermischen Einwirkung nachweisbar (Abbildung 95 und Abbildung 96):

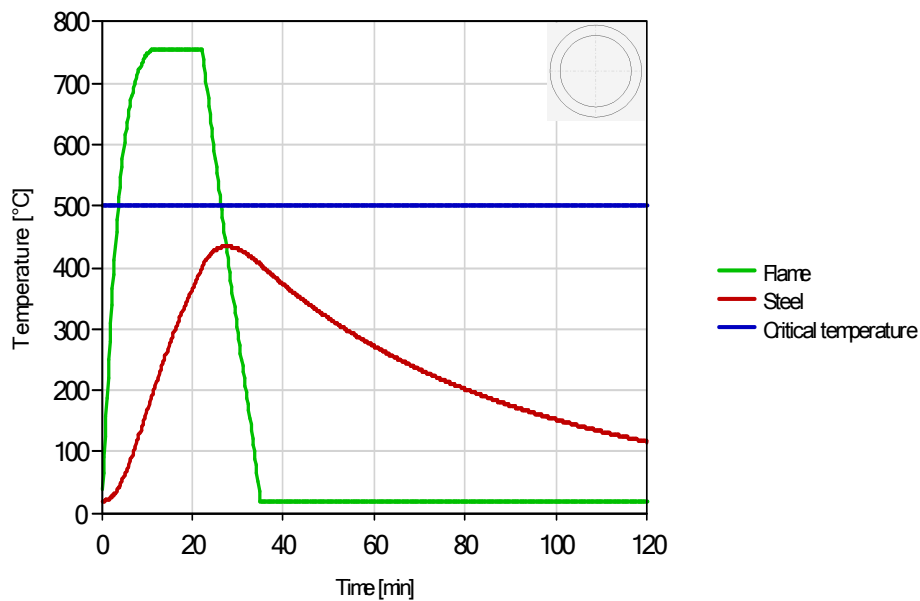


Abbildung 95: Kat. 2, RO 406,4 x 45 mm: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

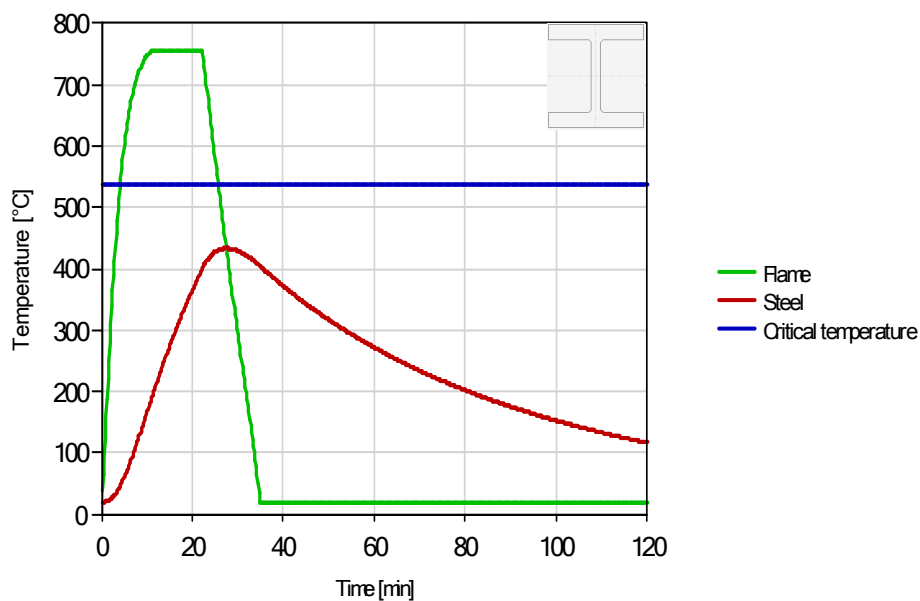


Abbildung 96: Kat. 2, HD 400 x 551: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Wie auch bei Kategorie 1 ist eine mindestens partielle brandschutztechnische Ertüchtigung im unteren Bereich der Stütze notwendig. Auch für diese Kategorie wird die Auswirkung eines geringen horizontalen Abstandes zur Plumeachse gemäß Abbildung 52 untersucht. Die Ergebnisse sind mit denen der Kategorie 1 vergleichbar. Wie Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen, können beide Profile nachgewiesen werden.

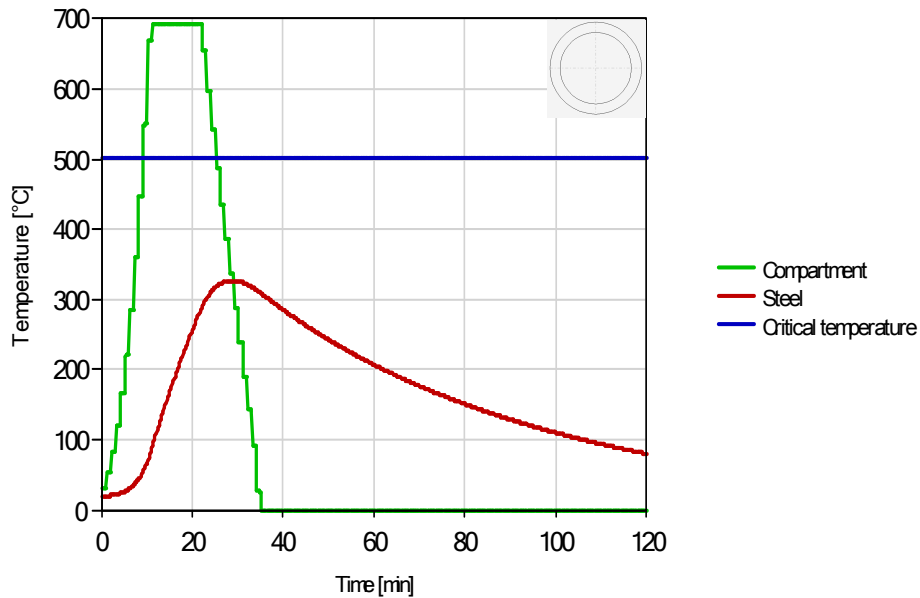


Abbildung 97: Kat. 2, RO 406,4 x 45: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m}$ /  
 $z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

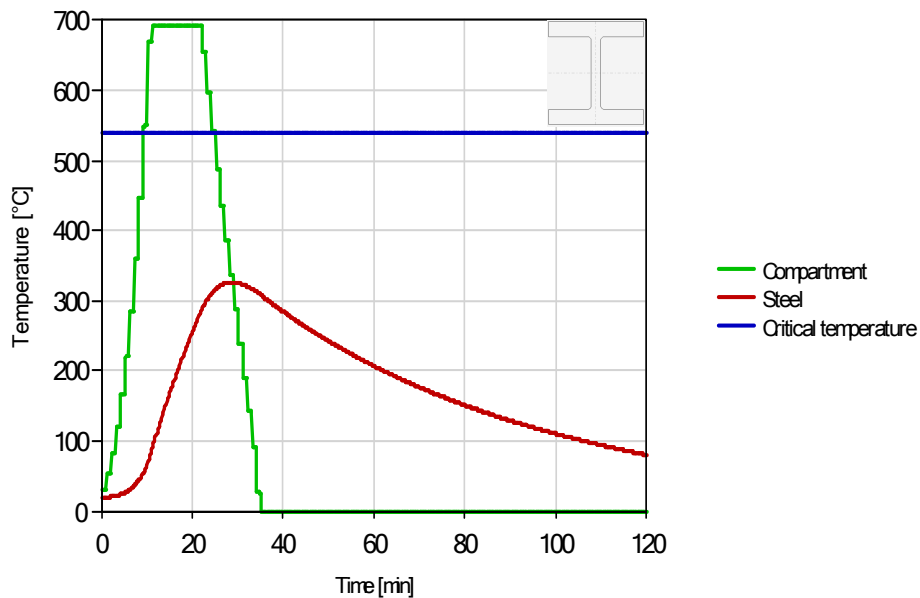


Abbildung 98: Kat. 2, HD 400 x 551: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m}$ /  
 $z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

### 4.6.3.3 Bemessung im Brandfall (Level 3)

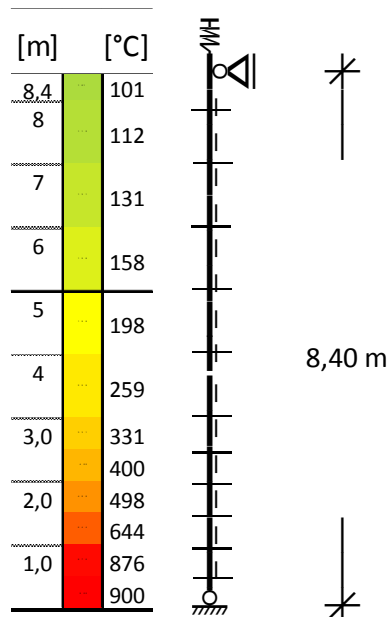


Abbildung 99: Umgebungstemperaturprofil der einzelnen Stützenabschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes

Wie auch bei der Stützenkategorie 1 wird die thermische und mechanische Analyse des Rohrprofils der Kategorie 2 (RO 406,4 x 45) mit dem strukturmechanischen Stabwerksprogramm *SAFIR* durchgeführt. Dabei wird das nebenstehende Temperaturprofil (siehe Abbildung 99) angesetzt. Auch mit einer vergrößerten Knicklänge lohnt sich bei dem massigen Stahlprofil der Aufwand der allgemeinen Berechnungsmethode. Entgegen dem vereinfachten Berechnungsverfahren übersteht die Stütze mit Temperaturgradient in Längsrichtung rechnerisch den lokalen Brand ohne Querschnittsversagen (siehe Tabelle 11). Die parallel dazu ermittelte Versagenszeit anhand der ETK beträgt am T-förmigen Ersatzsystem 1740 s, womit ein klassifizierter Feuerwiderstand gemäß der

ETK um eine Minute verfehlt wird. Beide Aussagen gelten unabhängig von der Berücksichtigung des thermischen Zwanges.

Tabelle 11: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 2)

Stütze (8,4 m)	Versagenszeit infolge des lokalen Brandes ( $r = 0$ )	Versagenszeit infolge der ETK
RO 406,4 x 45 als Pendelstütze (ohne thermischen Zwang)	<b>kein Bauteilversagen!</b> $\Theta_{m,max}$ 553 °C (grad T) unter $N_{d,fi}$ = 4705 kN	<b>1745 s</b> (29,1 min) bei $\Theta_m$ = 501 °C unter $N_{d,fi}$ = 4705 kN
RO 406,4 x 45 am Ersatzsystem (inkl. thermischen Zwang)	<b>kein Bauteilversagen!</b> $\Theta_{m,max}$ 553 °C (grad T) $N_{fi,max} \cong 4725$ kN (+ 0,5 %)	<b>1740 s</b> (29,0 min) bei $\Theta_m$ = 498 °C $N_{fi,max} \cong 4765$ kN (+ 1 %)

Zum Vergleich der Ergebnisse werden die jeweiligen Knotenverschiebungen am Ersatzsystem in Abhängigkeit des Brandszenarios gegenübergestellt (Abbildung 100).

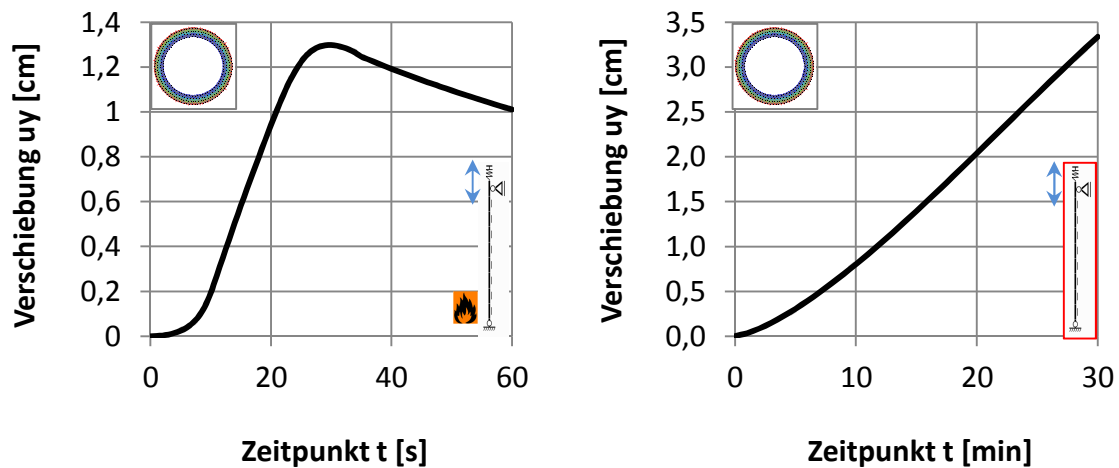


Abbildung 100: Gegenüberstellung der Knotenverschiebungen am Ersatzsystem der 8,40 m-Stütze unter lokalem Brand (Centerline) und unter der ETK

#### 4.6.4 Kategorie 3: Großes Atrium mit Stahlstütze

Entsprechend der Kategorisierung von Eingangssituationen gemäß Kapitel 2.5.2 wird nachfolgende Stütze aus einem großen Foyer innerhalb eines eingeschossigen Atriums unter einem lokalen Brand nach Anhang K und Anhang L berechnet.

##### Mechanische Einwirkungen

Siehe auch Kapitel 4.3. Für die ausführliche Lastzusammenstellung wird auf Anhang I verwiesen:

$$G_k/Q_k = 233/77 \text{ [kN]},$$

$$(G+Q)_{d,fi} = 245 \text{ kN}$$

##### Festlegung der Stützenabmessungen

$$\text{RO } 323,9 \text{ mm} \times 5,0 \text{ mm} \quad (A/V = 200 \text{ m}^{-1})$$

alternativ

$$\text{HE } 300\text{-A} \quad (A/V = 153 \text{ m}^{-1})$$

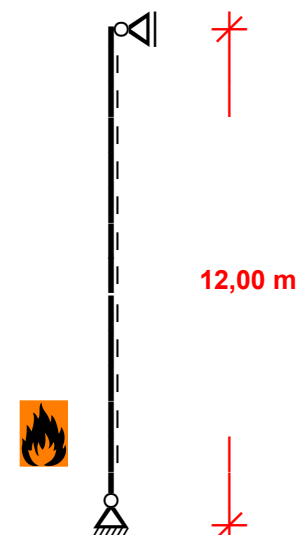


Abbildung 101: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 3)

##### 4.6.4.1 Bemessung bei Raumtemperatur

Für die Stützenbemessung bei Raumtemperatur wird im Rahmen dieser Arbeit auf den Anhang O verwiesen. Nachfolgend werden die Ergebnisse für Kategorie 3 nur in Kurzform dargestellt (Tabelle 12). Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse werden

bereits Unterschiede zu den Ergebnissen der vorangegangenen Kategorien deutlich. Bei dieser Kategorie fällt auf, dass die Querschnittstragfähigkeiten trotz vergleichbarer Ausnutzung im Biegeknicknachweis lediglich zu 37 und 26 % ausgenutzt sind. Folglich resultiert der Stützenquerschnitt dieser Kategorie offensichtlich nicht aus der statischen Auflast, sondern aus der Knicklänge.

Tabelle 12: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung)

Querschnitt:	Nachweis der Stütze (5 m):	Ergebnis:
<b>RO 323,9 x 5,0</b> (S235) QSK 2 / QSK <sub>fi</sub> 3	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E): Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,37</b> <b>0,70</b>
<b>HE 300-A</b> (S235) QSK 1 / QSK <sub>fi</sub> 2	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E): Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,26</b> <b>0,77</b>

#### 4.6.4.2 Bemessung im Brandfall (Level 2)

Wie auch zuvor wird die Stütze mit beiden alternativen Querschnitten unter einem lokalen Brand mit *Elefir-EN* berechnet (Abbildung 102 bis Abbildung 109); siehe auch Anhang P für die vollständigen Ergebnisse:

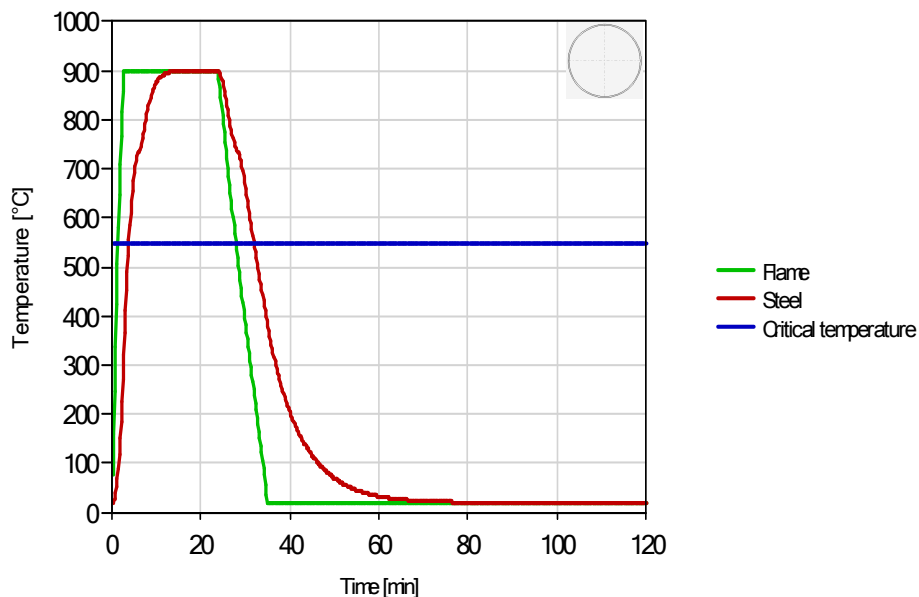


Abbildung 102: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

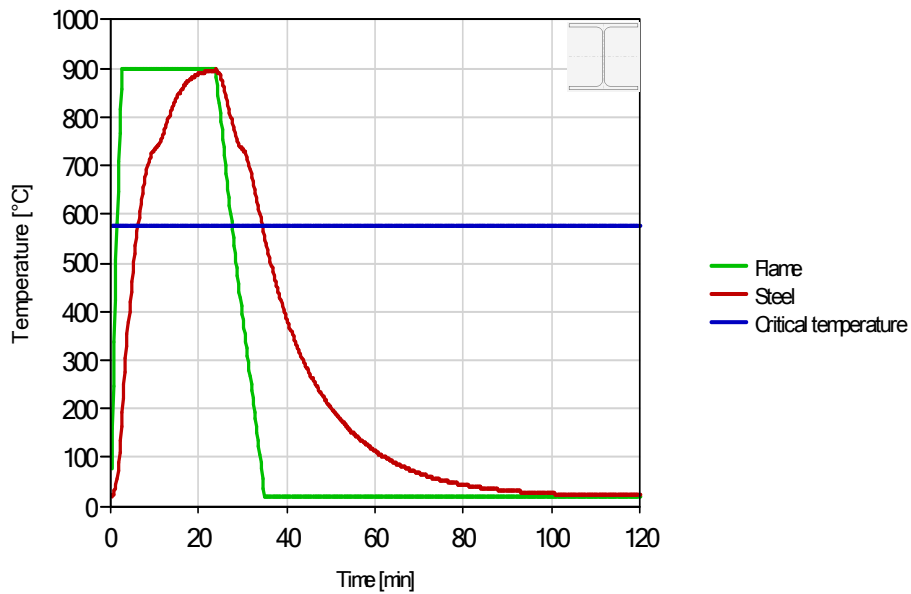


Abbildung 103: Kat. 3, HE 300-A: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Schlanke Atriumstützen mit Profilmomenten oberhalb von  $150 \text{ m}^{-1}$  übernehmen im ungeschützten Zustand bei Brandszenarien nahezu vollständig die Umgebungstemperatur des lokalen Brandes. Liegt diese oberhalb der für das Bauteil kritischen Temperatur, sind ungeschützten Stahlstützen wie diese anhand des vereinfachten Bemessungsverfahrens im Brandfall nicht nachweisbar (Abbildung 102 und 103).

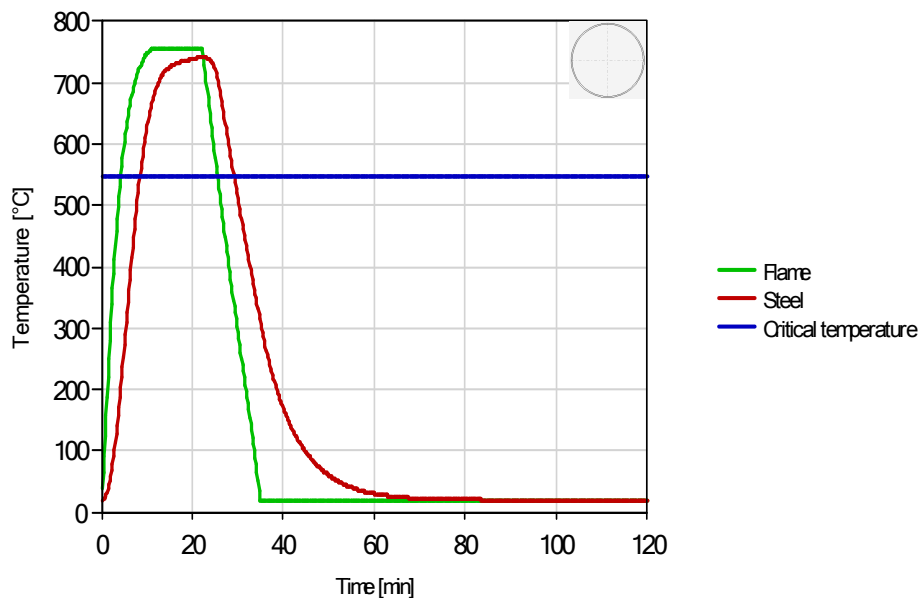


Abbildung 104: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Anders als bei den Kategorien 1 und 2 wird die Stütze mit den vorliegenden Querschnitten (RO 323,9 x 5,0 und HE 300-A) auch dann nicht nachweisbar, wenn die Bemessungshöhe auf 1,0 m angehoben wird (siehe Abbildung 104).

Das alternative I-Profil weist ein etwas besseres Erwärmungsverhalten auf (siehe Abbildung 105), was lediglich auf die größere Massigkeit zurückzuführen ist. Die Ausnutzung bei Raumtemperatur ist bei beiden Profilen vergleichbar, sodass keine statischen Querschnittsreserven aus einer geringeren Lastausnutzung resultieren können. Im Ergebnis liegt aber auch dort die maximale Bauteiltemperatur ca. 150 K über der für das Bauteil kritischen Temperatur (578 °C), sodass für die Stütze der vereinfachte rechnerische Nachweis nicht erbracht werden kann.

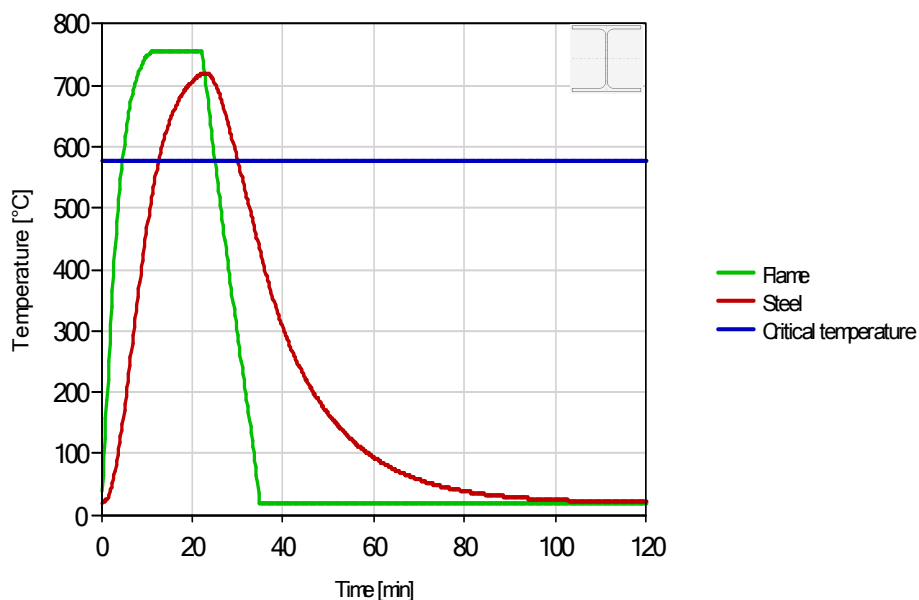


Abbildung 105: Kat. 3, HE 300-A: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Denkbar ist hier zur Verbesserung des Bauteilwiderstandes eine partielle Brandschutzbeschichtung im unteren Bereich. Nachfolgend wird unter den vorliegenden Randbedingungen untersucht, bis zu welcher Höhe eine partielle Beschichtung erforderlich wäre. Dafür wird derselbe Nachweis in drei Meter Höhe geführt (siehe Abbildung 106).



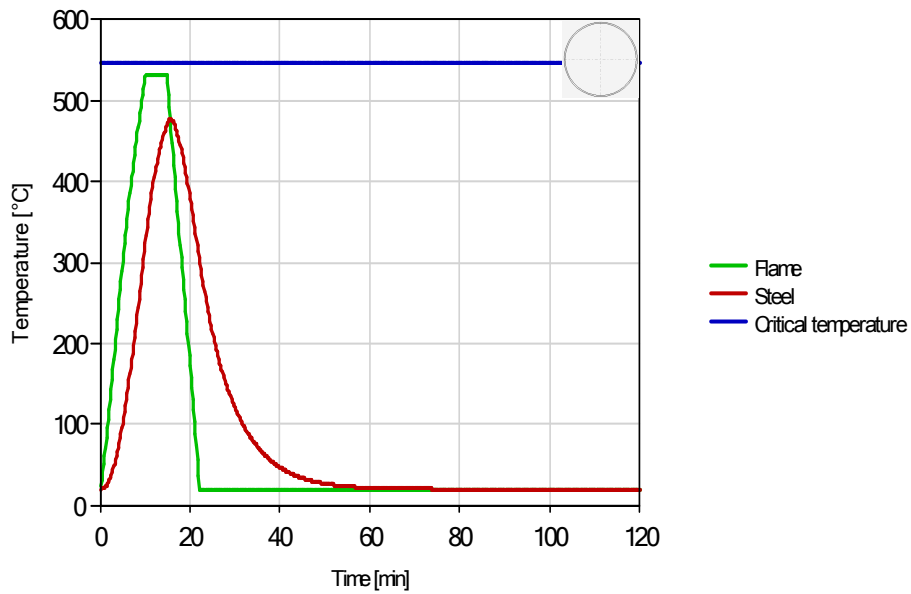


Abbildung 106: Nachweis des ungeschützten Rohrprofils (RO 323,9 x 5,0) mit der Plumetemperatur in 3,0 m Höhe gemäß *Elefir-EN*

Daran ist ersichtlich, dass eine Beschichtung oberhalb von 3,0 m Höhe nicht mehr erforderlich wäre. Alternativ werden die beiden ungeschützten Querschnitte der Atriumstütze der Kategorie 3 ebenfalls mit dem alternativen Brandszenario gemäß dem H-D-Modell (nach Abbildung 52) und gleicher Auflast untersucht. Die Ergebnisse sind Abbildung 107 zu entnehmen.

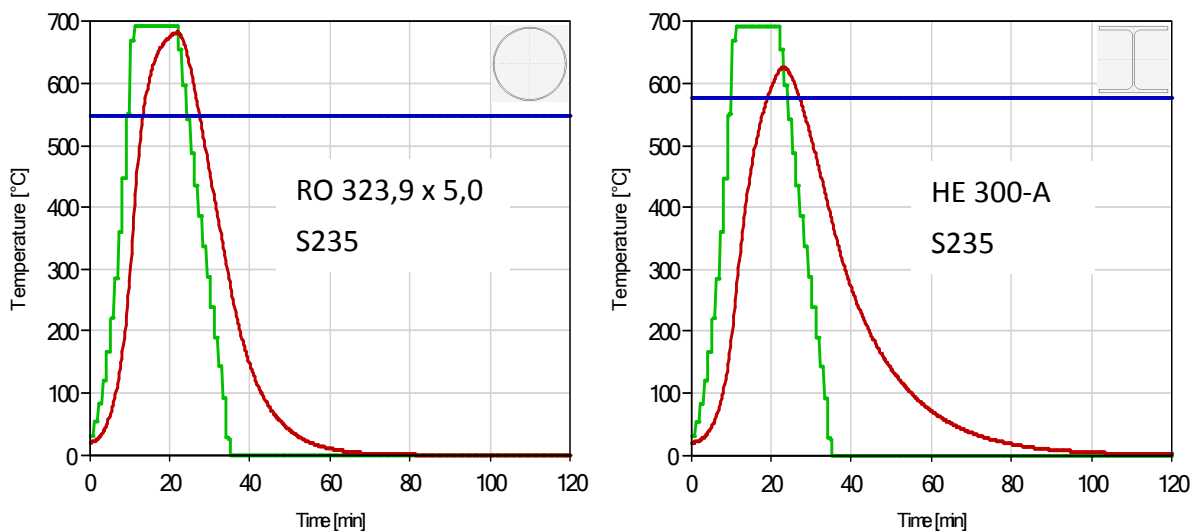


Abbildung 107: RO 323,9 x 5,0 und HE 300-A: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m} / z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

Auch bei Vergrößerung des Abstands zwischen Stützenachse und Plumeachse auf einen Meter wird das Rohrprofil nicht nachweisbar (siehe Abbildung 108):

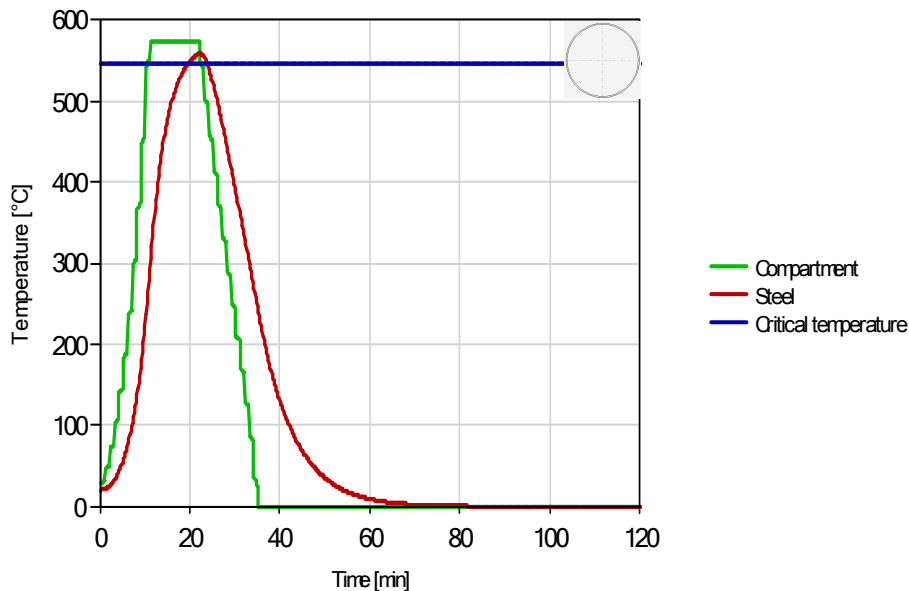


Abbildung 108: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit  $r = 1,0 \text{ m}$ /  
 $z = 0,5 \text{ m}$  eingelesen in *Elefir-EN*

Die kritische Bauteiltemperatur wird hier trotzdem überschritten. Alternativ werden die Querschnitte verändert. Der Abstand zur Plumeachse wird wieder auf  $r = 0,5 \text{ m}$  gesetzt (siehe Abbildung 109).

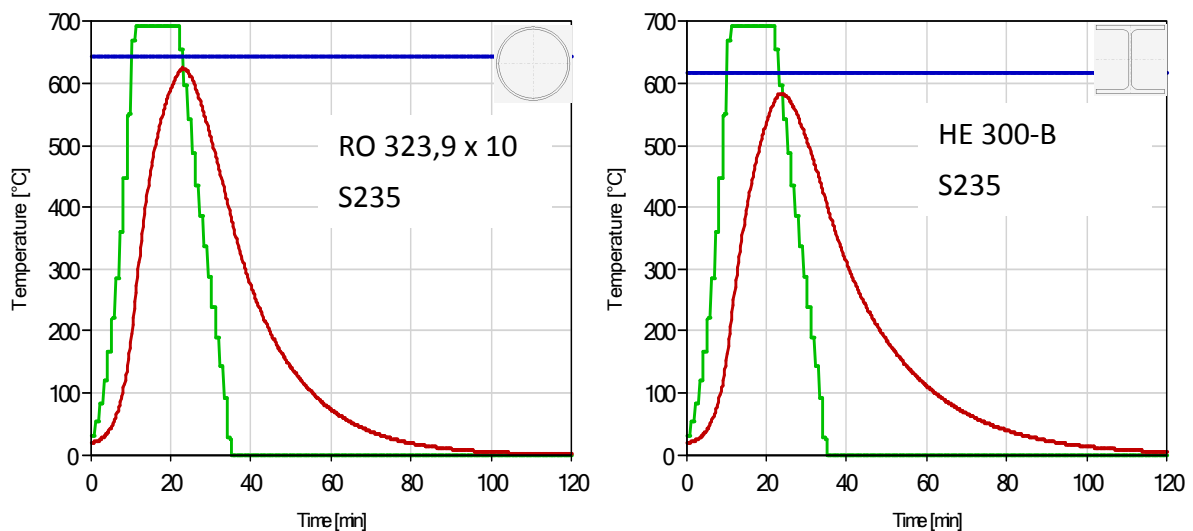


Abbildung 109: Kat. 3, Brandschutzbedingt vergrößerte Querschnitte, H-D-Modell mit  
 $r = 0,5 \text{ m}$  /  $z = 0,5 \text{ m}$  gemäß *Elefir-EN*

Bei Vergrößerung der Querschnitte von HE 300-A (QSK<sub>fi</sub> 2) auf HE 300-B (QSK<sub>fi</sub> 1) sowie von RO 323,9 x 5 (QSK<sub>fi</sub> 3) auf RO 323,9 x 10 (QSK<sub>fi</sub> 1) überstehen die Atriumstützen das lokale Brandszenario ( $r = 0,5 \text{ m} / z = 0,5 \text{ m}$ ) in ungeschützter Bauweise. Durch das Überdimensionieren der Querschnitte vergrößert sich deren Massigkeit. Der Profilmassfaktor des Hohlprofils ändert sich dadurch von  $200 \text{ m}^{-1}$  auf  $100 \text{ m}^{-1}$  und der des I-Profils von  $105 \text{ m}^{-1}$  auf  $81 \text{ m}^{-1}$ . Dadurch fällt die im Brandfall auftretende Bauteiltemperatur insgesamt niedriger aus (rote Linie). Gleichzeitig reduziert sich bei größeren Querschnitten und gleicher Auflast auch die Lastausnutzung im Brandfall, wodurch sich die aufnehmbare Temperatur des Bauteils zusätzlich vergrößert (blaue Linie). Diese positiven Effekte wirken gleichzeitig und in der Grafik gegenläufig.

#### 4.6.4.3 Bemessung im Brandfall (Level 3)

Für die thermische und mechanische Analyse des schlanken Hohlprofils der Foyer-Kategorie 3 wird ebenfalls das strukturmechanische Stabwerksprogramm *SAFIR* verwendet, siehe auch Kapitel 4.6.1. Dabei wird das äußere Temperaturprofil gemäß Abbildung 110 zugrunde gelegt. Aufgrund des Temperaturgradienten wird auch hier der untere Bereich der Stütze feiner unterteilt. Für die Stützenabschnitte wird jeweils die Gastemperatur in Abschnittsmitte zugrunde gelegt. Die Ergebnisse können Tabelle 13 entnommen werden.

Am T-förmigen Ersatzsystem hat die Stütze eine Versagenszeit von 11,7 min. Sie

übersteht rechnerisch den lokalen Brand nicht in ungeschützter Bauweise. Die Vergleichsrechnung als Pendelstütze, ohne thermischen Zwang, ergibt hier nur unwesentlich längere Versagenszeiten (11,8 min > 11,7 min) als bei der Stütze unter Berücksichtigung der thermischen Zwangskräfte. Anhand der Verformungsfigur des Ersatzsystems unter lokalem Brand wird der numerische Versagenszeitpunkt näher

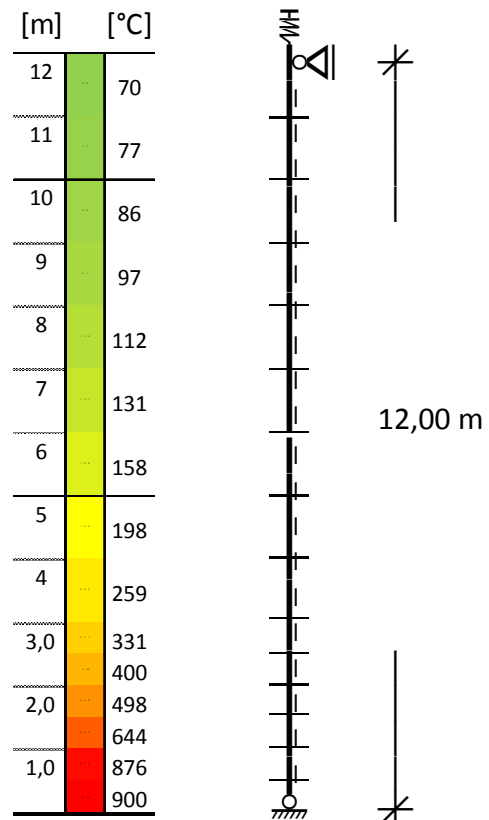


Abbildung 110: Umgebungstemperaturprofil der einzelnen Stützenabschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes

betrachtet. Aus Abbildung 111 ist ersichtlich, dass das System am Übergang zwischen dem untersten und dem darüber liegenden Stützenabschnitt ausknickt ( $z = 0,5$  m).

Tabelle 13: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des jeweiligen Brandszenarios (Kategorie 3)

Stütze (12 m)	Versagenszeit infolge des <b>lokalen Brandes</b> ( $r = 0$ )	Versagenszeit infolge der <b>ETK</b>
<b>RO 323,9 x 5,0</b> als Pendelstütze (ohne thermischen Zwang)	<b>710 s</b> (11,8 min) $\Theta_{m,u} = 710$ °C, $\Theta_{m,o} = 41$ °C unter $N_{d,fi} = 245$ kN	<b>600 s</b> (10,0 min) bei $\Theta_m = 557$ °C unter $N_{d,fi} = 245$ kN
<b>RO 323,9 x 5,0</b> am Ersatzsystem (inkl. thermischen Zwang)	<b>700 s</b> (11,7 min) $\Theta_{m,u} = 700$ °C, $\Theta_{m,o} = 40$ °C $N_{fi,max} \hat{=} 259$ kN (+ 6 %)	<b>500 s</b> (8,3 min) bei $\Theta_m = 486$ °C $N_{fi,max} \hat{=} 339$ kN (+ 37 %)

Die Lastvergrößerung aus thermischem Zwang beträgt zu diesem Zeitpunkt gegenüber der Pendelstütze erst 4 %. Dabei beträgt die Querschnittstemperatur im unteren Stützenabschnitt 700 °C. In Verbindung mit der Tatsache, dass die Pendelstütze nur 10 s später als das Ersatzsystem ausknickt, wird deutlich, dass der Lastzuwachs aus thermischem Zwang bei diesem Beispiel von untergeordneter Bedeutung ist. Aufgrund des vorzeitigen lokalen Stabilitätsversagens kann sich die Zwangskraft am Ersatzsystem infolge des lokalen Brandes gemäß Abbildung 77 nicht vollständig ausbilden.

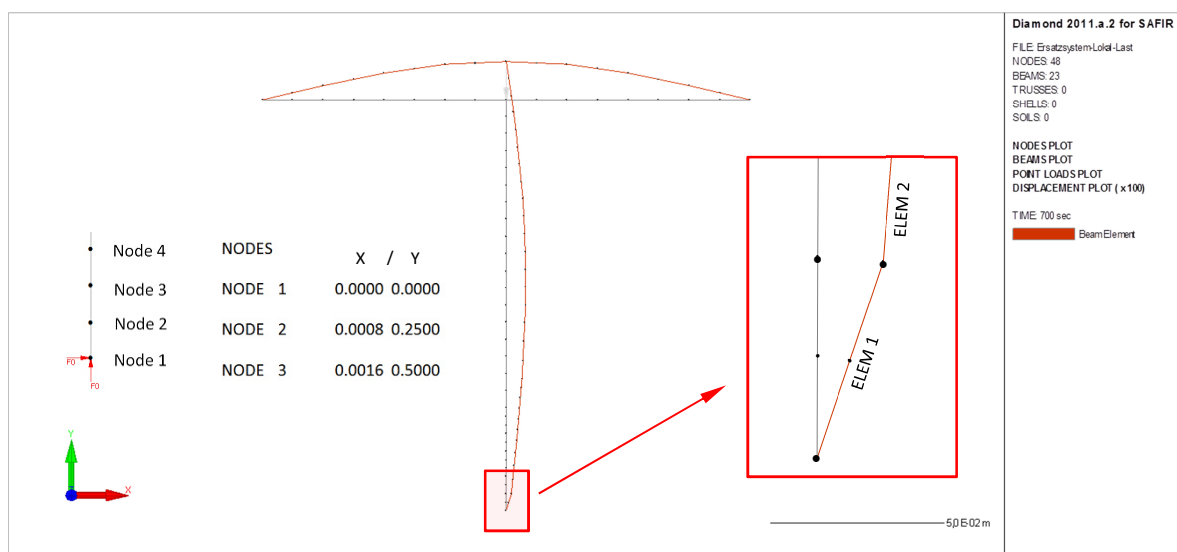


Abbildung 111: Verformungsfigur am Ersatzsystem der Atriumstütze (RO 323,9 x 5,0) infolge des lokalen Brandes zum Versagenszeitpunkt mit SAFIR

Die zugehörige Temperaturverteilung infolge des lokalen Brands kann für den unteren Stützenabschnitt der Abbildung 112 entnommen werden. Ein signifikanter Temperaturgradient innerhalb der Querschnittsebene ist nicht vorhanden. Zum Zeitpunkt des Bauteilversagens beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite lediglich 4,9 K. Der zugehörige Verlauf der Bauteilerwärmung ist in Abbildung 113 dargestellt.

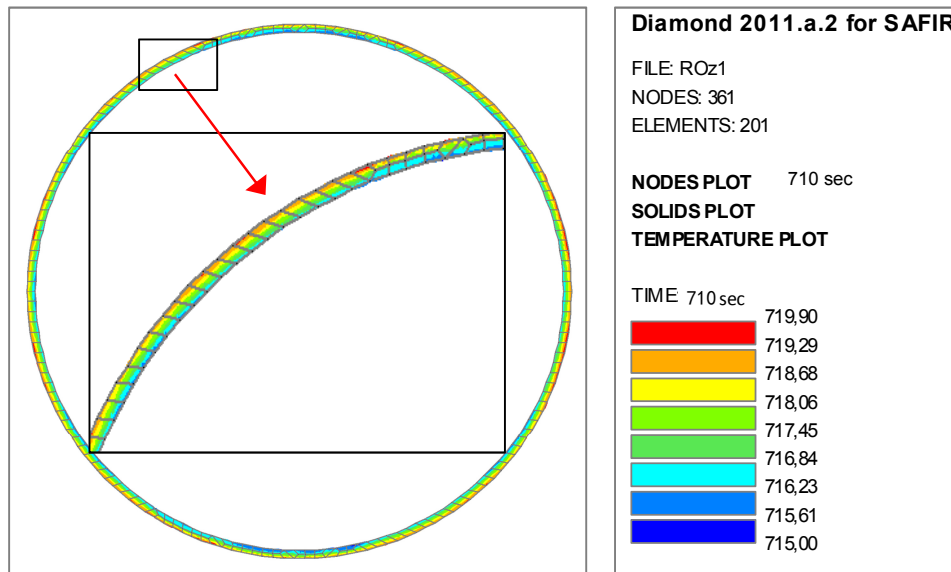


Abbildung 112: Temperaturverteilung über den Querschnitt RO 323,9 x 5,0 im untersten Stützenabschnitt zum Versagenszeitpunkt infolge des lokalen Brands mit *SAFIR*

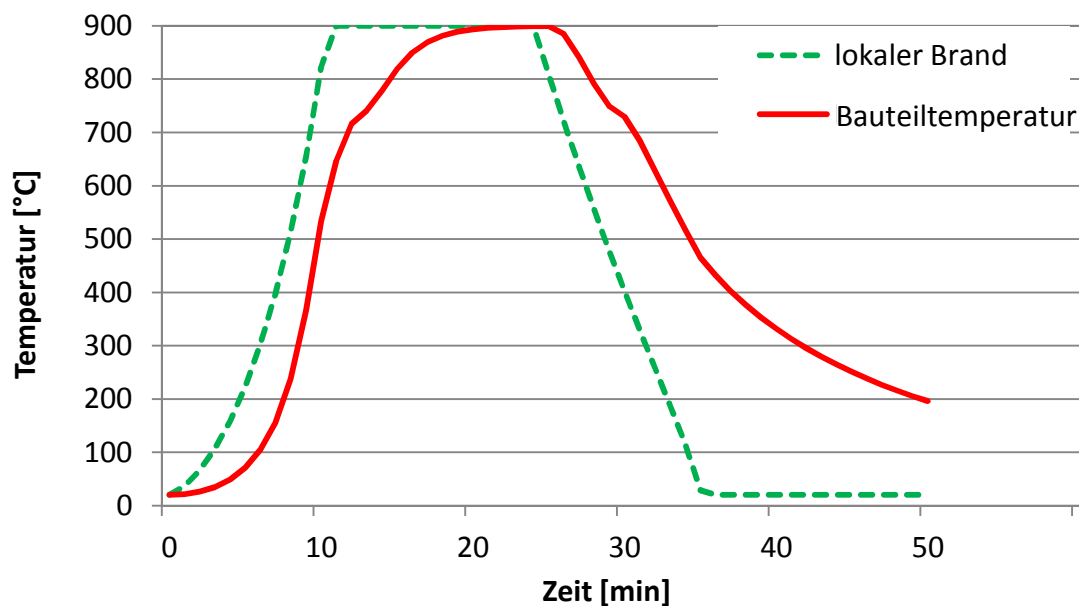


Abbildung 113: Bauteilerwärmung des unteren Stützenabschnittes infolge des lokalen Brands gemäß *SAFIR*

Bei Betrachtung der Ergebnisse infolge der ETK zeigen sich jedoch im Vergleich zum lokalen Brand deutliche größere Unterschiede in den Versagenszeiten der statischen Systeme (vergleiche Tabelle 13). Der steilere Anstieg der Bauteiltemperatur infolge der ETK (siehe Abbildung 114) führt bei diesem Querschnitt zu entsprechend kürzeren Versagenszeiten als unter Naturbrand. Gleichzeitig entsteht am Ersatzsystem eine thermische Zwangskraft in der Größenordnung von 90 kN, was ca. 37 % der Gesamtlast entspricht.

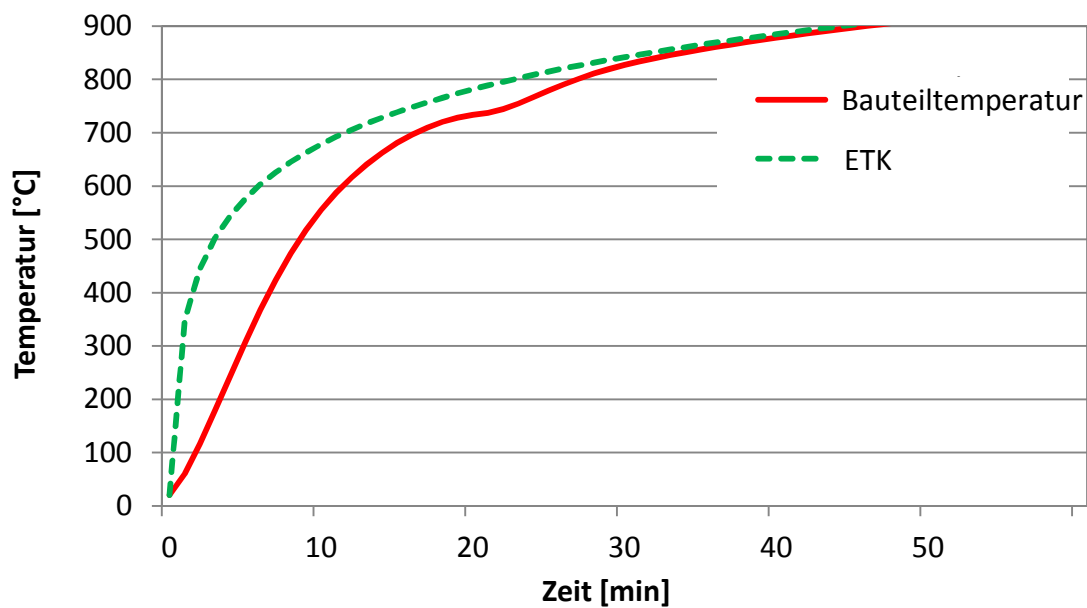


Abbildung 114: Bauteilerwärmung des Stützenabschnittes infolge der ETK gemäß SAFIR

Das Erwärmungsverhalten sehr filigraner Querschnitte ( $A/V = 200 \text{ m}^{-1}$ ) hat offenbar zur Folge, dass sich mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren unter Ansatz eines Temperaturgradienten in Längsrichtung bei Ansatz der Centerline-Temperatur von lokalen Bränden gegenüber der vereinfachten Bemessung im Brandfall im Ergebnis noch keine nennenswerten Systemreserven ergeben. Rechnerisch konnte die Versagenszeit gegenüber dem vereinfachten Bemessungsverfahrens zwar deutlich gesteigert werden (11,8 min gemäß Tabelle 13 im Vergleich zu 3,7 min gemäß Abbildung 102), jedoch bleibt das Ergebnis qualitativ dasselbe: Das Bemessungsziel einer *ungeschützten Bauweise* kann unter Zugrundelegung der Centerline-Temperatur noch nicht erreicht werden.

Wird hingegen das H-D-Modell angesetzt, ergeben sich in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes folgende Ergebnisse am T-förmigen Ersatzsystem (siehe Tabelle 14). Bereits einen Meter neben der Plume-Centerline ergibt sich selbst bei diesem filigranen, brandschutztechnisch ungeschützten Bauteil trotz seiner sehr

geringen Massigkeit rechnerisch kein Versagen im Brandfall. Dieses ist auf die reduzierten maximalen Bauteiltemperaturen im maßgebenden Stützensegment zurückzuführen. Zum Versagenszeitpunkt (15 min) beträgt diese 701 °C ( $r = 0,5$  m) und reduziert sich bei Vergrößerung des Abstandes auf einen Meter entsprechend auf 444°C (ebenfalls nach 15 min). Über den Brandverlauf wird an dieser Stelle der maximale Wert von 548 °C nicht überschritten.

Tabelle 14: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 3)

<i>Stütze (12 m)</i>	<i>Versagenszeit infolge H-D-Modell (<math>r = 0,5</math> m)</i>	<i>Versagenszeit infolge H-D-Modell (<math>r = 1,0</math> m)</i>
<b>RO 323,9 x 5,0</b> als Pendelstütze (ohne thermischen Zwang)	<b>920 s (15,3 min)</b> $\Theta_{m,u} = 711$ °C, $\Theta_{m,o} = 47$ °C unter $N_{d,fi} = 245$ kN	<b>kein Versagen!</b> $\Theta_{m,u} = 548$ °C, $\Theta_{m,o} = 54$ °C (Zeitpunkt max. $\Theta$ : 1320 s) unter $N_{d,fi} = 245$ kN
<b>RO 323,9 x 5,0</b> am Ersatzsystem (inkl. thermischen Zwang)	<b>900 s (15 min)</b> $\Theta_{m,u} = 701$ °C, $\Theta_{m,o} = 47$ °C $N_{fi,max} \hat{=} 263$ kN (+ 8 %)	<b>kein Versagen!</b> $\Theta_{m,u} = 548$ °C, $\Theta_{m,o} = 54$ °C (Zeitpunkt max. $\Theta$ : 1320 s) $N_{fi,max} \hat{=} 267$ kN (+ 9 %) (Zeitpunkt max. $N_{fi}$ : 1440 s)

## 4.7 Zusammenfassung

Um die wesentlichen Einflussfaktoren und Systemreserven von Stahlstützen in brandlastarmen Atrien und Foyers unter lokalen Brandszenarios zu untersuchen, wurden in diesem Kapitel numerische Untersuchungen im Bereich der thermischen als auch mechanischen Analyse durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Brandraumtemperatur als thermische Einwirkung für Bauteile untersucht und auf die Besonderheiten der einzelnen Verfahren eingegangen. Neben vereinfachten Ansätzen zur Ermittlung der Brandtemperaturen wurden auch Berechnungen mit dem Feldmodell *FDS* durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die unmittelbare Flammenzone für die numerische Simulation als auch für das Bauteil selber einen sensiblen Bereich darstellt. Mit zunehmendem Abstand der Stütze zur

Brandquelle zeigte sich eine stetig bessere Übereinstimmung zwischen vereinfachten und allgemeinen Berechnungsansätzen zur Ermittlung der Brandgastemperatur.

Für die mechanische Analyse wurden sowohl vereinfachte als auch allgemeine Berechnungsmodelle herangezogen. Im Rahmen von Grenzbetrachtungen wurden ferner die Gültigkeit und die Auswirkungen des statischen Systems in Verbindung mit über den Brandverlauf zeitlich veränderlichen, thermischen Zwangskräften überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass thermische Zwangskräfte in Stützenlängsrichtung für ungeschützte Atriumstützen mit geringer Auflast eine bemessungsrelevante Größenordnung einnehmen können. Das hat zur Folge, dass die Verwendung des statischen Systems *Pendelstütze* bei der Untersuchung ungeschützter, filigraner Stahlstützen unter lokaler Brandbeanspruchung nicht immer auf der sicheren Seite liegt. Es wurde gezeigt, in welcher Größenordnung thermische Zwangskräfte infolge lokaler Brände unberücksichtigt bleiben, sofern die Pendelstütze als statisches System gewählt wird. Die am unbeanspruchten Ersatzsystem der Kategorie 3 ermittelte thermische Zwangskraft reduziert sich mit zunehmendem radialem Abstand zur Brandquelle, was Tabelle 15 entnommen werden kann.

Tabelle 15: Positions- und lastabhängige thermische Zwangskräfte am Ersatzsystem der Kategorie 3 infolge des lokalen Brandes

	thermische Zwangskraft bei Stützenposition <b>r = 0,0 m</b>	thermische Zwangskraft bei Stützenposition <b>r = 0,5 m</b>	thermische Zwangskraft bei Stützenposition <b>r = 1,0 m</b>
am Ersatzsystem <b>(unbeansprucht)</b>	$F_{th,HD-0,0} = 40,6 \text{ kN}$	$F_{th,HD-0,5} = 33,0 \text{ kN}$	$F_{th,HD-1,0} = 25,4 \text{ kN}$
am Ersatzsystem <b>(unter statischer Auflast <math>F_{d,fi} = 245 \text{ kN}</math>)</b>	$F_{th,HD-0,0} = 14,0 \text{ kN}$ <i>vorzeitiges Versagen</i>	$F_{th,HD-0,5} = 18,0 \text{ kN}$ <i>vorzeitiges Versagen</i>	$F_{th,HD-1,0} = 22,0 \text{ kN}$

Unter statischer Auflast stellt sich die am unbeanspruchten Ersatzsystem ermittelte thermische Zwangskraft in Relation zum jeweiligen Abstand zwischen Bauteil- und Flammenachse nur anteilig ein. Nur bei einem Achsabstand von 1,0 m wurde die Größenordnung der Zwangskraft des unbeanspruchten Ersatzsystems erreicht. Bei geringeren Abständen trat vor dem Erreichen der vollständigen Zwangskraft im System jeweils lokales Versagen auf.



Weiterhin wurde gezeigt, dass mit allgemeinen Bemessungsverfahren bei lokalen Bränden ein Temperaturgradient in Stützenlängsrichtung berücksichtigt werden kann, woraus gegenüber dem vereinfachten Verfahren eine weitere Systemreserve resultiert und der Nachweis von ungeschützten Stützen im Brandfall grundsätzlich möglich ist. Befinden sich jedoch schlanke Atriumstützen mit A/V-Verhältnissen von  $200 \text{ m}^{-1}$  direkt in der Plume-Centerline, lassen sich trotz Berücksichtigung eines Temperaturgradienten keine ungeschützten Querschnitte nachweisen. Der Nachweis gelang mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren nur unter Berücksichtigung von gewissen horizontalen Abständen zum Brandherd (1 m). Dadurch können auch ungeschützte Stützenquerschnitte mit geringer Massigkeit eine Bemessung infolge eines lokalen Brandes rechnerisch bestehen.

## 5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels erläutert und diskutiert. Dabei werden die maßgebenden Einflussfaktoren der Atriumbauweise auf das Tragverhalten von Stützen bei Naturbrandszenarien herausgearbeitet. Da das Bauteilversagen im Brandfall entscheidend durch die Bauteiltemperatur beeinflusst wird, welche wiederum signifikant von der Brandraumtemperatur abhängt, werden nachfolgend jeweils die unterschiedlichen Einflüsse auf diese beiden Einflussgrößen dargelegt.

### 5.2 Brandraumtemperaturen

#### 5.2.1 Einfluss der Brandlastdichte

Geringe Brandlastdichten reduzieren die Dauer der Vollbrandphase. Bei brandlastgesteuerten Bränden, wie sie hier unterstellt werden, beeinflussen sie nicht das Niveau der Wärmefreisetzung, sondern die Länge des horizontalen Plateaus der maximalen Wärmefreisetzungsrates (siehe Visualisierung auf Abbildung 115).

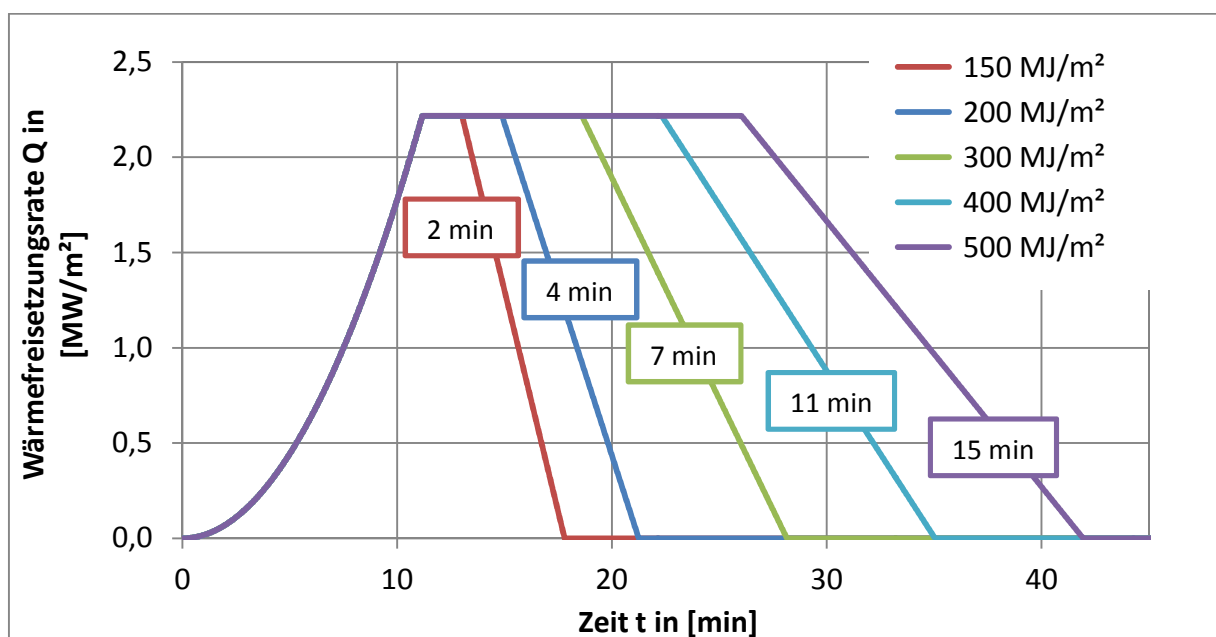


Abbildung 115: Unterschiedliche Längen der Vollbrandphasen bei gleicher Brandfläche (9 m<sup>2</sup>) und gleicher RHR (250 kW/m<sup>2</sup>) in Abhängigkeit von der Brandlastdichte

Die Wärmefreisetzungsraten sind dabei in Abhängigkeit von realistischen Brandlastdichten gemäß der Datenerhebung in Kapitel 3.6.7 auf eine lokale Brandlastfläche von  $9 \text{ m}^2$  (siehe Anhang J) bezogen. Das bedeutet für die Bauteilbemessung in Atrien und Foyers, dass die Brandlastdichte allein keinen Einfluss auf die Höhe der maximal auftretenden Temperaturen im Brandfall hat, sondern auf die jeweilige Einwirkungsdauer der maximalen Temperatur. Jedoch gerade, wenn Stahlbauteile einer maximalen Temperatur hinreichend lange ausgesetzt sind, führt eine längere Einwirkungsdauer auf dem maximalen Temperaturniveau mit der hohen Wärmeleitfähigkeit zu einer schnelleren Erwärmung, was sich in Konsequenz negativ auf den Feuerwiderstand auswirkt.

### 5.2.2 Einfluss des Bemessungsmodells

Mit dem Fokus auf die Stützenbemessung im Brandfall für brandlastarme Umgebungen wurden in Kapitel 4.4 alternativ zu Normbrandszenarien verschiedene realitätsnahe Bemessungsansätze zur Ermittlung der maßgebenden Brandraumtemperaturen untersucht. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.4.1 zeigen sehr deutlich, dass gemittelte Brandraumtemperaturen aus Zonenmodellen nicht geeignet sind, um realistische Stützentemperaturen infolge lokaler Brände zu berechnen. Im Vergleich zu den sowohl vereinfachten als auch zum allgemeinen Berechnungsverfahren werden die einwirkenden Temperaturen deutlich unterschätzt.

Hingegen sind vereinfachte Centerline-Temperaturen lokaler Brände gemäß *Heskestad* [DIN EN1991-1-2] für die Stützenbemessung im Brandfall deutlich realistischer, da diese den lokalen Temperatureinfluss im brandnahen Bereich berücksichtigen, wie in Kapitel 4.4.2 näher erläutert. Gleichzeitig haben Centerline-Temperaturen allerdings die Eigenart, dass sie implizit voraussetzen, dass sich die betrachtete Stütze stets direkt im Zentrum einer Brandlast befindet, respektive die Brandlast um eine Stütze herum angeordnet ist. Dadurch wären die Lage von Stützenachse und Plume-Centerline absolut identisch. Unter baupraktischen Gesichtspunkten ist es jedoch als sehr konservativ und unwahrscheinlich zu bezeichnen, dass der Abstand zwischen einer Bauteilachse und der Flammenachse gleich Null ist. Selbst bei unmittelbarer Anordnung einer lokalen Brandlast neben einer Stütze ergibt sich zwischen der Stützenachse und der mittleren Flammenachse ein realistischer Abstand von etwa 50 - 100 cm, wie in Kapitel 5.2.3 dargelegt.

Wird für diesen Abstand trotzdem Null angenommen, folgt aus dieser Annahme für lokale Brände, dass normgemäß [DIN EN1991-1-2/NA:2010] im unteren Meter einer

Stütze pauschal 900 °C anzusetzen sind - im unmittelbaren Flammenbereich gilt dasselbe. Ein wirtschaftlich bemessenes Stahlbauteil übersteht diese Temperaturen in der Regel nur mit entsprechender brandschutztechnischer Ertüchtigung, wie in Kapitel 4.6.4 gezeigt wurde. Überdies wurden unabhängig von der Lage einer Stütze zur Brandlast in [Byström2012] und [Sjöström2013] die vereinfachten Eurocode-Ansätze hinsichtlich der Centerline-Temperaturen lokaler Brände überprüft und mit realen Versuchsdaten verglichen (siehe auch Tabelle 16).

Tabelle 16: Brandtemperaturen nach 10 Minuten eines lokalen Brandversuches nach [Sjöström2013]

Brennstoff- u. Wannendurchmesser	Höhe über Oberfläche (m)	T <sub>Gas</sub> , (°C)*	T <sub>Gas</sub> , Eurocode (°C)	T <sub>Stahl</sub> , (°C)	T <sub>Stahl</sub> , Eurocode (°C)
Heptan, Ø 1.10 m	1.2	900	900	584	747
	2.2	300-650	900	265-457	747
	3.2	500	661-883	214	514-706
	4.2	150-280	353-442	76-122	204-280
	5.2	180	260-325	63	97-183
Diesel, Ø 1.10 m	1.2	800	900	495	747
	2.2	250-500	720-900	175-281	583-747
	3.2	250	363-455	96	212-292
	4.2	110-150	212-263	54-65	82-141
	5.2	120	162-200	44	66-104
Diesel, Ø 1.90 m	1.2	950	900	711	747
	2.2	480-800	900	415-660	747
	3.2	640	825-900	363	699-747
	4.2	220-400	464-583	144-261	301-426
	5.2	250	347-435	118	200-248

\*Gemessene Brandtemperaturen an Position 1, wenn nur ein Wert angegeben ist. In Höhen, wo die Temperaturen um die Stütze herum gemessen wurden, werden die Werte in Intervallen angegeben.

Die schwedischen Versuchsergebnisse in Tabelle 16 ergeben entlang der Plumeachse, dass die Temperaturen beim Eurocode-Ansatz nach Heskestad tendenziell überschätzt werden. Bei den Versuchsdaten zeigt sich, dass entlang der Plume-Centerline auf gleicher Höhe keine homogen wirkende Temperatur vorliegt. Insbesondere durch das Flackern der Flammen entlang der Plumeachse ergeben sich beispielsweise auch ohne erkennbaren Luftzug im Versuchsraum einseitige, asymmetrische thermische Belastungen mit Temperaturdifferenzen zwischen den verschiedenen Positionen auf gleicher Ebene um die Stütze herum. Diese belaufen sich teilweise auf über 250 K bei Diesel und 350 K bei Heptan. Selbst die maximalen Temperaturen einer Höhenkote liegen teilweise noch 250 K unter den berechneten Temperaturen nach

[DIN EN 1991-1-2:2010]. Auf Basis der Versuchsergebnisse resümiert [Sjöström2013], dass sich im Vergleich dazu für die Gas- und Stahltemperaturen gemäß der im Eurocode beschriebenen Rechenverfahren konservative Ergebnisse ergeben. Interessant dabei ist, dass diese Aussage bereits unabhängig davon getroffen wurde, ob die angenommenen geometrischen Verhältnisse des Versuchsaufbaus gemäß des Heskestad-Ansatzes (Plumeachse = Bauteilachse) in der Hochbaupraxis überhaupt realistisch sind. Zur Verdeutlichung dieser besonderen Lage siehe Abbildung 19.

Lässt sich ausschließen, dass Stützenachse und Plumeachse direkt übereinander liegen, also dass die Stütze außerhalb des direkten Flammenbereiches steht, werden in der Literatur noch Möglichkeiten vorgesehen, diese Konstellation über sowohl vereinfachte als auch allgemeine Methoden rechnerisch zu berücksichtigen. Dabei erscheint das **H-D-Modell** [Heskestad1978] gemäß Kapitel 4.4.3 für baupraktische Bemessungen grundsätzlich ein geeignetes Instrument für die Temperaturermittlung im Brandfall lokaler Brände zu sein. Es basiert auf dem bauaufsichtlich eingeführten Heskestad-Modell und liefert über die Höhe der Centerline ( $r = 0$ ) identische Ergebnisse (siehe hierzu Abbildung 51). Gleichzeitig wird die Abnahme der Temperaturstrahlung mit zunehmendem Abstand erkennbar berücksichtigt (siehe Abbildung 53). Dort ist am Beispiel der Höhenkote  $z = 50$  cm ersichtlich, dass sich die einwirkende Temperatur auf gleicher Höhe bereits bei geringen horizontalen Abständen von der Flammenachse signifikant reduziert. Die Schwierigkeit besteht nach Ansicht des Verfassers jedoch darin, hier einen sinnvollen Abstand ( $> 0$ ) zu bestimmen, welcher gleichzeitig die Randbedingungen mit einer ausreichenden Sicherheit berücksichtigt. Das gilt ebenfalls für die Bemessungshöhe  $z$ .

Die zusätzliche Überprüfung der Situation mit dem Feldmodell **FDS** [McGrattan2013] ergibt beim Vergleich der Ergebnisse einige Besonderheiten. Bezogen auf die Höhenkote  $z = 50$  cm lagen die berechneten Temperaturspitzen im Bereich der Centerline noch 100 K unterhalb der allgemeinen, mittleren Flammentemperatur von 900 °C gemäß [Hosser2009]. Im horizontalen Abstand von 0,5 m zur Centerline ergibt sich eine gute Übereinstimmung des maximalen Niveaus (Abbildung 60). Die Abweichungen zwischen den Verfahren bei einem Meter Abstand sind mit ca. 50 K ( $< 10\%$ ) noch akzeptabel (Abbildung 60). Jedoch liegen die FDS-Temperaturen im horizontalen Abstand zwischen 1,5 m und 3,5 m von der Plume-Centerline stets oberhalb der Temperaturen des H-D-Modells (siehe Abbildung 61). Auffällig dabei ist, dass sich gerade diese Radien außerhalb der Brandlastfläche befinden. Das bedeutet, an diesen Stellen überwiegt die Strahlung, denn die Wirkung der Konvektion wird außerhalb der Brandlastfläche marginal. Ein Erklärungsansatz für die unterschätzten

H-D-Temperaturen in diesem Bereich ist, dass der Strahlungsanteil beim H-D-Modell herausgerechnet wird (siehe auch Gleichung (2-17)). Hingegen wird der Strahlungsanteil bei FDS mit dem gewählten Verbrennungsmodell in Verbindung mit den AST-Elementen berücksichtigt. Das Phänomen, dass die maximal erreichten Temperaturen im Bereich der Flammenachse mit etwa 800 °C noch unterhalb der mittleren Flammentemperatur nach [Hosser2009] liegen, verwundert, da die berechneten Temperaturverläufe in gewissen Abständen zur Plume-Centerline im Vergleich stets oberhalb denen des H-D-Modells liegen (siehe Abbildung 59). Generell ist der unmittelbare Flammenbereich für numerische Simulationen sowie auch für das Bauteil selbst als kritisch zu bezeichnen (siehe auch die Temperaturschwankungen infolge Flammenflackern in Abbildung 58). Gerade im Flammenbereich werden Temperaturen tendenziell unterschätzt, insbesondere wenn die Netzdiskretisierung nicht fein genug ist und die Flamme nur einen Bruchteil des jeweiligen Zellvolumens einnimmt ([Kwon2006] und [Lee2011]). Das gilt für den Nahbereich unmittelbar um die Flamme herum genauso wie innerhalb der Flamme [Fridolf2014]. Dieser Einfluss wurde in [Stock2010] genauer untersucht, dessen Ergebnis am Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zellgröße zu sehen ist (Abbildung 116).

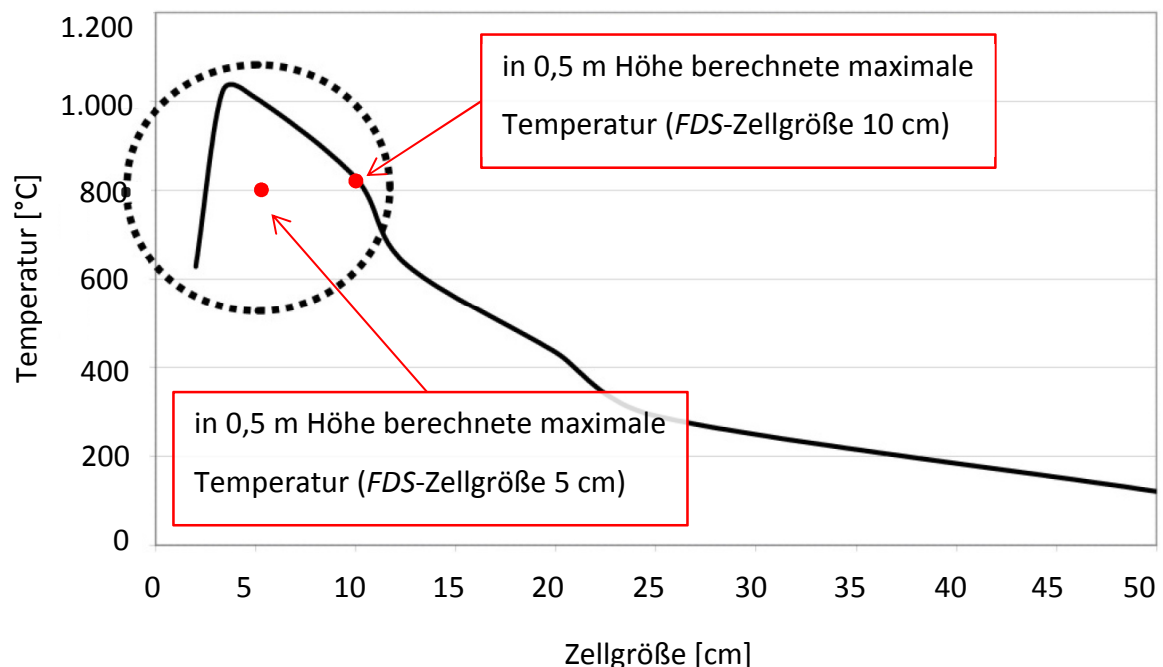


Abbildung 116: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zellgröße bei  $h = 0$  m nach [Stock2010] mit Eintragungen aus eigenen Vergleichsrechnungen

Bei Zellgrößen von 10 cm, welche auch im Rahmen dieser Arbeit überwiegend verwendet wurden, werden im Flammenbereich lediglich Achstemperaturen von bis zu

800 °C erreicht. Diese Größenordnung der Maximaltemperaturen wurde auch vom Verfasser in den eigenen FDS-Berechnungen erreicht (siehe Abbildung 60, in Kapite 4.4.4). Nach Abbildung 116 erreicht die Plumetemperatur bei einer Zellgröße von etwa 5 cm ihren Maximalwert. Sowohl kleinere als auch größere Zellen führen zu niedrigeren Temperaturen [Stock2010]. Um diesen Einfluss ausschließen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit einzelne Rechengänge mit lokal reduzierter Zellgröße im Flammenbereich von 5 cm durchgeführt. Die dabei berechneten Maximaltemperaturen blieben jedoch auf demselben Niveau wie vorher (siehe Eintragungen in Abbildung 116). Da der Fokus dieser Arbeit jedoch primär auf die Entwicklung der Temperaturen außerhalb der Plumeachse gerichtet ist, wurde auf die weitere Überprüfung der unmittelbaren Flammentemperatur verzichtet. Hier wird ein Ansatzpunkt für weiterführende Fragestellungen gesehen.

Beim kritischen Hinterfragen der FDS-Ergebnisse im Flammenbereich lokaler Brände sind folgende Versuchsbeispiele aus der Literatur von Interesse: Bei einem Brandversuch eines lokalen Brandes von [Wald2009] lag die gemessene, maximale Flammentemperatur 1,5 m oberhalb der lokalen Brandlast bei 798 °C. Bei einem anderen Beispiel erreichten die gemessenen Maximaltemperaturen im Flammenbereich des schwedischen Brandversuches an einer Stahlstütze von [Sjöström2013] bei einer mit Diesel gefüllten Wanne mit einem Durchmesser von  $D = 1,10$  m ebenfalls nur 800 °C (siehe auch Tabelle 16). Entgegen der Eurocode-Temperatur von 900 °C lagen die gemessenen Temperaturen des Versuches in der gleichen Größenordnung, wie auch die hier berechneten, maximalen FDS-Temperaturen.

Die Maximaltemperaturen lagen wiederum bei den schwedischen Brandversuchen mit anderen Brandlasten (beispielsweise mit Heptan) bei 900 °C und darüber (Tabelle 16). Das bedeutet, trotz der Tatsache, dass die Größenordnung der berechneten Flammentemperatur von nur 800 °C bei einem lokalen Brand nicht vollkommen unrealistisch ist, wie die Versuchsergebnisse zeigen, ist es durchaus berechtigt, eine rechnerisch ermittelte Flammentemperatur von 800 °C kritisch zu hinterfragen.

Häufig werden bei Brandversuchen lokaler Brände nur Flüssigkeitsbrände untersucht, Feststoffbrände laufen jedoch weniger homogen ab. Bei einem vergleichbaren Brandversuch eines Empfangstresens von [Wilk2013c] ergaben sich an einzelnen Messstellen zwar auch Temperaturen von über 1000 °C (grün), jedoch haben andere Temperaturfühler innerhalb der gleichen Brandlastfläche zur selben Zeit lediglich Temperaturen von unter 300 °C gemessen (gelb) (siehe Abbildung 117). Das zeigt, wie unterschiedlich das Temperaturniveau innerhalb einer Brandlastfläche bei Feststoffbränden sein kann. Bei Betrachtung der Tastatur-Messstelle erscheint es

jedoch fragwürdig, dass eine Tastatur mit Abmessungen von 45 x 20 x 2,5 [cm] und einem Gewicht von weniger als einem Kilogramm als Brandlast in der Lage ist, über einen Zeitraum von über 30 Minuten auf dem Niveau von über 800 °C zu verbrennen (siehe roter Temperaturverlauf).

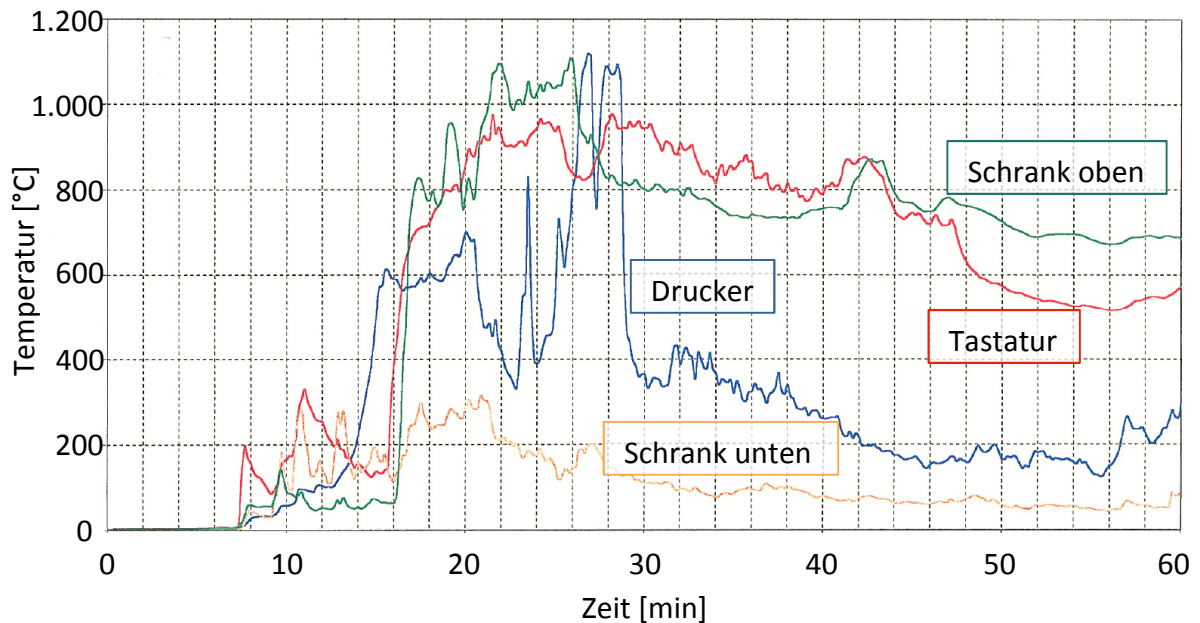


Abbildung 117: Temperatur-Zeitverhalten einzelner Messwerte an den jeweiligen Messstellen im Bereich der Brandlast „Empfangstresen“ nach [Wilk2013c]

Bei der Interpretation des Versuches ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Temperaturfühler direkt an den jeweiligen Objekten befestigt waren, was auch der Versuchsleiter bestätigt hat. In Verbindung mit dem Temperaturverlauf zeigen die Bilder der 20. und 32. Prüfminute, dass sich die Messstelle der Tastatur mittlerweile offenbar innerhalb der zusammengefallenen Brandlast oder innerhalb der Glut befindet (siehe Abbildung 118).



Abbildung 118: 20. Prüfminute (links) und 32. Prüfminute (rechts) des Brandversuchs aus [Wilk2013c]



Ein direkter Bezug der Temperatur zum ursprünglichen Objekt ist daher in Frage zu stellen. Im Vergleich dazu scheint der Messfühler „Schrank unten“ ebenfalls keinen Bezug zum brennenden Objekt zu haben, da dieser nicht über 300 °C ansteigt (siehe gelber Temperaturverlauf). Selbst wenn sich dieser Temperaturfühler - allerdings nach dem Zusammenbruch der Brandlastgegenstände - ebenfalls in der Brandglut befindet, so liegt innerhalb dieser lokalen Brandlastfläche augenscheinlich eine Temperaturdifferenz von 700 K vor.

### 5.2.3 Einfluss des Abstands zwischen Brandquelle und Bauteil

Für lokale Bauteilbemessungen im Brandfall stellt sich die Frage nach dem bemessungsmaßgebenden Abstand der Stütze zur Brandquelle bzw. zur Plumeachse. Dabei ist unklar, welcher kleinste Abstand  $> 0$  baupraktisch überhaupt möglich ist bzw. was diese Abstände bedeuten.

Steht eine Brandlast, beispielsweise in Form eines runden Holztisches ( $\varnothing = 1,0$  m), selbst unmittelbar an einer hier betrachteten Stahlstütze aus Kapitel 4.7 (RO 323,9 x 5,0), so ergibt sich rechnerisch bereits ein Achsabstand von ca. 66 cm. Bereits bei einem Achsabstand von bis zu einem Meter zwischen Stützenachse und Plumeachse ergeben sich mit dem H-D-Modell gegenüber den Plume-Temperaturen des Heskestad-Ansatzes gemäß Eurocode-Anhang C rechnerisch um bis zu 350°K niedrigere Temperaturen. Zum Vergleich sind in Abbildung 119 die einzelnen Bauteiltemperaturen infolge der unterschiedlichen Bemessungsbrandszenarien jeweils im maßgebenden Stützenabschnitt gegenübergestellt.

Mit der Realisierung von Abständen in diesen Größenordnungen lassen sich bereits bei geringfügigen Überdimensionierungen von ungeschützten Querschnitten mit vereinfachten Bemessungsverfahren im Brandfall ausreichende Feuerwiderstände erzielen (siehe Kapitel 4.6.2 bis 4.6.4). Bei entsprechendem Temperaturgradienten ist mit allgemeinen Bemessungsverfahren in Einzelfällen sogar eine ungeschützte Bauweise ohne Überdimensionierung des Querschnittes möglich. Das zeigt, welchen großen Einfluss die Lage im Brandraum eines lokalen Brandes auf mögliche Bauteilwiderstände von Stützen im Brandfall hat. Dabei beeinflusst die Position der Stütze zur Brandquelle indirekt auch die Versagensart dieser Stütze, welche von der absoluten Höhe der Temperatur und dessen Verteilung im Bauteil beeinflusst wird. Bei unmittelbarer Bauteillage in der Plume-Centerline sowie direkt daneben versagt die Stütze der Kategorie 3 (RO 323,9 x 5) infolge lokalem Stabilitätsversagen (siehe Abbildung 111). Das gleiche Phänomen infolge lokaler Brände hat auch [Zhang2014a]

an I-Profilen festgestellt. Bei dem schlanken Hohlprofil der Kategorie 3 betrug die Versagenstemperatur im maßgebenden Stützenabschnitt etwa 700 °C. Im Vergleich dazu hat sich gezeigt, dass die Versagenstemperatur der Stütze unter Einfluss der ETK niedriger ist, als unter Einfluss des lokalen Brandes. Diese liegt bei einer homogenen Temperaturverteilung infolge der ETK bei 486 °C bzw. 557 °C (mit Berücksichtigung des thermischen Zwangs bzw. ohne, siehe auch Tabelle 11). Bei der über die Höhe gleichmäßigen Temperaturbeanspruchung unter der ETK wurde jedoch kein lokales Stabilitätsversagen festgestellt. Mit zunehmendem Abstand der Stütze zur Plume-Centerline nimmt auch der Einfluss der Wärmestrahlung ab und die Bauteiltemperatur verringert sich (siehe Abbildung 119). Das führte bei dem untersuchten Stützenquerschnitt der Querschnittsklasse 3 (bei erhöhter Temperatur) dazu, dass bei einem radialen Abstand von 1 m weder lokales noch globales Bauteilversagen eintritt. Ähnliche Effekte hat auch [Zhang2014b] bei der Untersuchung von I-Profilen unter lokaler Brandbeanspruchung festgestellt.

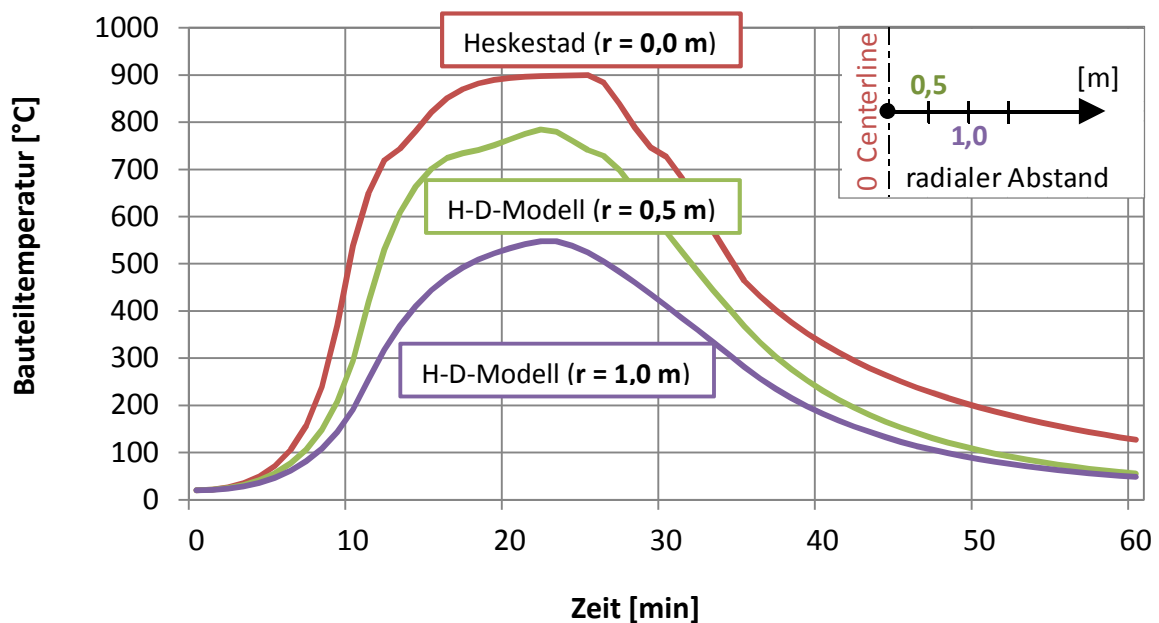


Abbildung 119: Bauteiltemperaturen (RO 323,9 x 5,0) im untersten Stützenabschnitt (mittig der unteren 50 cm) in Abhängigkeit von der Lage der Stütze zur Flammenachse

Für den baupraktischen Ansatz von Abstandsflächen zwischen Brandquelle und Bauteil wäre hierfür grundsätzlich zu klären, in wieweit Abstände organisatorisch sichergestellt werden können, um auf dieser Grundlage Bestandteil von Genehmigungen zu werden. Da hier von architektonisch sensiblen Bereichen auszugehen ist, scheiden klassische Kennzeichnungen auf dem Boden aus, wie sie in Industriebauten üblich sind. Nach

Auffassung des Verfassers erscheint die Umsetzung mit am Boden verschraubtem Mobiliar denkbar, was bereits in Einzelfällen praktiziert wird. Die brandlastfreien Flächen könnten zum Beispiel in den Genehmigungen vorgegeben werden.

## 5.3 Bauteiltemperaturen

### 5.3.1 Einfluss des Profilkfaktors

Neben den auftretenden Brandraumtemperaturen gemäß Kapitel 5.2 werden die Bauteilbemessungstemperaturen im Brandfall noch von einem weiteren Faktor beeinflusst, dem Profilkfaktor.

Interessant ist die Tatsache, dass sich bereits bei Primärtraggliedern in Gebäuden der Gebäudeklasse 5 Stützenquerschnitte ergeben, die bei Ausführung als reine Stahlkonstruktion eine Massigkeit aufweisen, mit der bereits Feuerwiderstandsdauern von bis zu 30 Minuten gemäß der ETK erzielt werden können. Vor dem Hintergrund, dass Stahlstützen der Kategorien<sup>13</sup> 1 und 2 einen Profilkfaktor von unter  $50 \text{ m}^{-1}$  bzw. teilweise sogar noch unterhalb von  $25 \text{ m}^{-1}$  haben, wird deutlich, welche Massigkeit sie besitzen und damit verbunden, welche Temperaturunempfindlichkeit sie gegenüber den Stützen der Kategorie 3 aufweisen. Deren Profilkfaktoren liegen, sofern sie aus der Bemessung bei Raumtemperatur abgeleitet werden, bei  $150 \text{ m}^{-1}$  und darüber. Daraus ergibt sich, dass diese nahezu ungeschützt die Umgebungstemperatur annehmen.

Tabelle 17: Bauteilerwärmung in Abhängigkeit des Profilkfaktors

A/V [ $\text{m}^{-1}$ ]	Bauteiltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ETK <sub>30</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Bauteiltemperatur/ ETK <sub>30</sub>
25	499,5	842	59,3%
50	691,5	842	82,1%
75	737,5	842	87,6%
100	768,5	842	91,3%
125	798,5	842	94,8%
150	815,5	842	96,9%
175	824,0	842	97,9%
200	829,0	842	98,5%

} Kat. 1+2  
} Kat. 3

<sup>13</sup> Es handelt sich hierbei um die Foyer-Kategorien, die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellt wurden, siehe dazu Kapitel 2.5.2 sowie 2.5.3.

Anhand von Tabelle 17 wird dieser Effekt deutlich. Am Beispiel von einer 30-minütigen Brandeinwirkung gemäß der ETK werden die korrespondierenden Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit des Profilkoeffizienten gegenübergestellt. Der Profilkoeffizient, ausgedrückt durch das A/V-Verhältnis, spielt daher bei lokalen Bränden eine sehr große Rolle. Mit dem Verfahren zur Entwicklung der Stahltemperatur von ungeschützten, innenliegenden Stahlkonstruktionen nach [DIN EN1993-1-2:2010] wurden die Bauteiltemperaturen in Tabelle 17 mit  $\alpha_c = 25$  [W/m<sup>2</sup> K] und  $\epsilon_{res} = 0,7$  [-] berechnet. Wie Tabelle 17 zu entnehmen ist, besitzen Stahlstützen der Kategorien 1 und 2 noch eine gewisse Erwärmungsträgheit. Im Gegensatz dazu ergeben sich für bei Raumtemperatur wirtschaftlich bemessene Stützen der Kategorie 3 nach einer 30-minütigen Brandeinwirkung gemäß der ETK Bauteiltemperaturen in gleicher Größenordnung wie die der Umgebungstemperatur. Liegt diese nun im Bereich der kritischen Bauteiltemperatur einer betrachteten Stütze, so wird deutlich, warum Überlegungen hinsichtlich einer anzustrebenden ungeschützten Bauweise wieder verworfen werden müssen. Im Vergleich dazu werden in Abbildung 120 die Bauteiltemperaturen der untersuchten Stützen der Kategorie 1 und 2 sowie der Kategorie 3 jeweils infolge eines lokalen Brandes (Centerline) und der ETK gegenübergestellt. Dabei ergibt sich, dass sich die Naturbrandtemperatur trotz geringerer Erwärmungsgeschwindigkeit in der Brandentstehungsphase bereits nach 10 Minuten auf demselben Niveau befindet, wie die ETK und diese zwischen der 10. und 25. Minute sogar übersteigt (siehe Abbildung 120, links). Bei dem filigranen Profil der Kategorie 3 verläuft dieser Effekt nahezu zeitgleich ab, was das rechte Diagramm zeigt. Dessen Erwärmungswiderstand ist marginal.

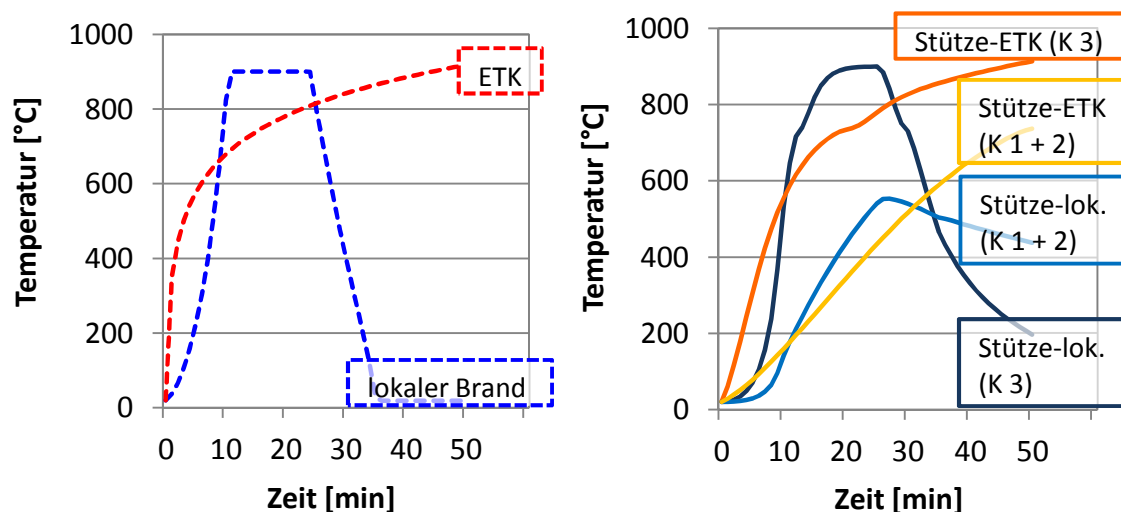


Abbildung 120: Gegenüberstellung von Brandraumtemperaturen im direkten Vergleich zur ETK sowie korrespondierende Bauteiltemperaturen ermittelt mit SAFIR

Die Erwärmung des massigen Profils der Kategorie 1 und 2 erfolgt hingegen deutlich verzögert sowie auch in abgeschwächter Form. Die beschriebenen Effekte bei der Bauteilerwärmung einer Stütze der Kategorie 3 zwischen der ETK und dem Naturbrand lassen sich bei Querschnitten der Kategorie 1 und 2 nur schemenhaft wiedererkennen (siehe Abbildung 120, rechts). Die Erwärmung in unmittelbarer Bauteilumgebung auf 900 °C überträgt sich nur sehr langsam auf das massige Bauteil. Bedingt durch den Erwärmungswiderstand des Querschnittes wird eine Bauteiltemperatur von 541 °C nicht überschritten.

### 5.3.2 Einfluss des Temperaturgradienten

Insbesondere bei lokalen Bränden in brandlastarmen Umgebungen führte die Annahme eines Temperaturgradienten in Stützenlängsrichtung (siehe auch Abbildung 110) in Verbindung mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren gegenüber den pauschalen Bauteiltemperaturen der vereinfachten Bemessung bereits dazu, dass die Stütze im Brandfall nachweisbar wird. Das gilt insbesondere für Stützen der Querschnittsklassen 1 in den Kategorien 1 und 2. Hingegen ist es zum Beispiel nicht möglich, die massigen Stützen selbst mit einem Abstand zur Plumeachse im Rahmen des vereinfachten Berechnungsverfahrens mit einheitlicher Bauteiltemperatur nachzuweisen (siehe Kapitel 4.6.2 und 4.6.3). Jedoch lassen sich dieselben Stützen unter Berücksichtigung eines Temperaturgradienten infolge des lokalen Brandes wiederum selbst bei mittiger Lage innerhalb der Flammenachse rechnerisch nachweisen. Bei großer Auflast oder bei entsprechender Überdimensionierung haben Stützen derart massige Querschnitte, dass sie im Brandfall einen entsprechenden Erwärmungswiderstand aufweisen (siehe auch Kapitel 5.3.2).

In Verbindung mit horizontalen Abständen zu lokalen Brandquellen lassen sich unter Berücksichtigung eines Temperaturgradienten in Längsrichtung der Stütze auch sehr schlanke Stützen der Kategorie 3 rechnerisch nachweisen. Bei diesen Stützen der Querschnittsklasse 2 und 3 überwiegt jedoch der Einfluss des Abstandes zur Brandquelle gegenüber der Berücksichtigung inhomogener Bauteiltemperaturen (vergleiche Tabelle 14), da sich die absolute Temperatur im maßgebenden Stützenabschnitt binnen eines Meters um ca. 350 K reduziert.

## 5.4 Einfluss des thermischen Zwangs

Neben der Brandraumtemperatur und der Bauteiltemperatur wird die Versagenszeit einer Stütze im Brandfall qualitativ auch noch von thermischen Zwangskräften beeinflusst, siehe auch Kapitel 4.5.1. Zum Vergleich sind in nachfolgender Übersicht (Tabelle 18) die am beanspruchten System ermittelten thermischen Zwangskräfte der hier untersuchten Foyer-Kategorien in Abhängigkeit des Brandszenarios zusammengefasst.

Tabelle 18: Thermische Zwangskräfte  $F_{\text{therm}}$  [kN] von verschiedenen Foyerstützen in Abhängigkeit des Brandszenarios, berechnet am beanspruchten System mit SAFIR

[kN]	ETK	lokal (Heske.)	lokal (H-D <sub>0,5 m</sub> )	lokal (H-D <sub>1,0 m</sub> )
Kategorie 1: 5,0 m Foyer RO 406,4 x 45 (G+Q) <sub>d,fi</sub> = 5495 kN	<b>67,83</b> (30 min)	<b>33,57</b> (30 min)	*)	*)
Kategorie 2: 8,4 m Foyer RO 406,4 x 45 (G+Q) <sub>d,fi</sub> = 4843 kN	<b>60,14</b> (21 min)	<b>30,57</b> (30 min)	*)	*)
Kategorie 3: 12 m Atrium RO 323,9 x 5 (G+Q) <sub>d,fi</sub> = 245 kN	<b>116,40</b> (13 min)	<b>40,62</b> (23 min)	<b>32,97</b> (30 min)	<b>25,35</b> (30 min)
*) nicht untersucht, da der Einfluss hier << 1 % der Gesamtlast beträgt				

Daraus wird ersichtlich, dass der Einfluss des Brandszenarios auf die Zwangskräfte, insbesondere bei Stützen der Kategorie 3, erheblich ist. In Kombination mit der Steifigkeit des jeweiligen angeschlossenen Riegels ergibt sich daraus die entsprechende Zwangskraft, welche im Brandschutznachweis bei Verwendung des statischen Systems *Pendelstütze* unberücksichtigt bliebe. Dabei ist zu berücksichtigen, dass unabhängig von der absoluten Größe der thermischen Zwangskraft dessen prozentualer Anteil an der Gesamtlast darüber entscheidet, ob eine Berücksichtigung dieses Anteils wesentlich für die Bemessung ist oder nicht. Bei dem untersuchten Beispiel der Foyer-Kategorie 3 auf Seite 119 ergibt sich am beanspruchten System eine zusätzliche thermische Zwangskraft in der Größenordnung von fast 17 % der

Auflast. Wird dieselbe Stütze mit der ETK thermisch beaufschlagt, vergrößert sich dieser Lastanteil auf über 47 %, bis die Stütze nach 13 Minuten ohne Auflast versagt (siehe auch Tabelle 18).

Unter Auflast versagt die Stütze noch vor dem Erreichen der Größenordnung dieser Zwangskräfte (vergleiche Tabelle 15). Nur im Abstand von 1 m von der Brandquelle entfernt tritt die maximal mögliche Zwangskraft ein, ohne dass das Bauteil versagt. Diese entspricht einer zusätzlichen Last in Höhe von 9 % der Auflast.

Dieser Zusammenhang lässt sich anhand einer Brutto-Netto-Einteilung verdeutlichen. Die am unbeanspruchten System ermittelte *Brutto*-Zwangskraft infolge des lokalen Brandes vergrößert sich mit abnehmenden Bauteilabstand zur Plume-Centerline bis auf den Maximalwert von  $F_{th}$  bei  $r = 0$  m. Der tatsächliche Einfluss der thermischen Zwangskraft (*Netto*-Zwangskraft) reduziert sich unter Auflast mit geringeren Bauteilabständen zur Brandquelle, da bereits vor der vollständigen Entwicklung der thermischen Zwangskraft vorzeitiges lokales Stabilitätsversagen eintritt. Das bedeutet, insbesondere für schlanke Stützen der Foyer-Kategorie 3 gibt es eine gegenläufige Entwicklung der maximal möglichen thermischen Zwangskraft und der sich unter Auflast tatsächlich einstellenden Zwangskraft (Abbildung 121).

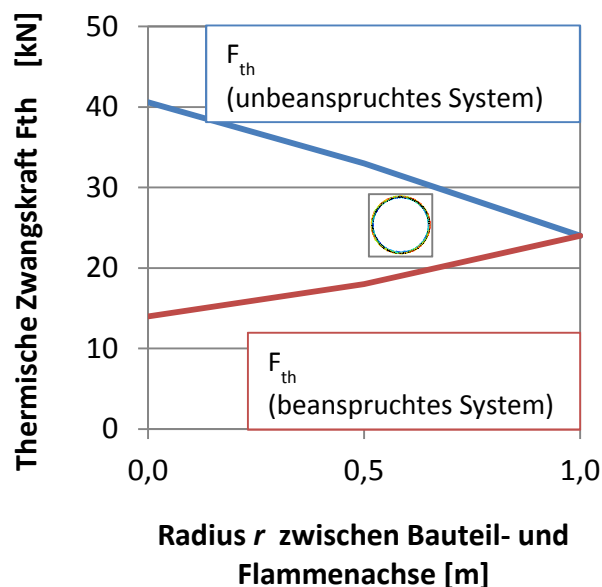


Abbildung 121: Gegenüberstellung der rechnerisch möglichen thermischen Zwangskraft infolge des lokalen Brandes und der sich unter Auflast einstellenden Zwangskraft in Abhängigkeit des Bauteilabstandes zur Plume-Centerline gemäß Tabelle 15

Mit dem Fokus auf eine ungeschützte Bauweise kann der Lastanteil aus thermischem Zwang infolge eines lokalen Brandes für schlanke Stützen unter geringer Auflast bemessungsrelevant sein und sollte daher berücksichtigt werden. Hingegen bleibt bei

massigen, ungeschützten Stahlstützen in aufgehenden Gebäuden der Einfluss aus nicht berücksichtigtem thermischem Zwang bei unter einem Prozent, was als vernachlässigbar einzustufen ist.

## 5.5 Brandschutzmaßnahmen im Vergleich

Neben den bereits erläuterten Einflussfaktoren auf die Versagenszeiten von Foyer- oder Atriumstützen im Brandfall bestehen verschiedene Möglichkeiten der brandschutztechnischen Ertüchtigung. Bereits durch die Ergebnisse der vereinfachten Bemessung der Atriumstütze stellt sich auch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen. Dabei ergibt sich die Überlegung der vollständigen oder partiellen Ertüchtigung der Stütze. Beispielsweise im Bereich der unteren zwei bis drei Meter oder einer entsprechenden Überdimensionierung des Querschnittes, um für eine ungeschützte Bauweise die erforderlichen Systemreserven vorzuhalten. Bezogen auf 12 m Stützenlänge bedeutet diese Überdimensionierung am Beispiel des Rohrprofils gemäß Kapitel 4.6.4 eine Erhöhung von ca. 0,5 t auf ca. 1,0 t und beim I-Profil von ca. 1,1 t auf ca. 1,4 t. Die Differenz beträgt somit 0,5 t bzw. 0,3 t (siehe Tabelle 19). Bei einem aktuell geschätzten Baustahlpreis von etwa 1.650,- bis 2.100,- €/t<sup>14</sup> betragen die Mehrkosten der 12 m-Hohlprofilstütze infolge der Überdimensionierung, um den Brandschutznachweis zu bestehen etwa 1.000,- € je Stütze (0,5 t x 2.000,- €/t).

Tabelle 19: Materialgewicht der einzelnen Querschnitte bezogen auf die Gesamtlänge

<u>Stahlquerschnitt</u>	<u>Tonnage</u>
<b>RO 323,9 x 5</b> QSK 3, A/V = 200 m <sup>-1</sup>	<b>472 kg</b> (12 m) 39,3 kg/m
<b>RO 323,9 x 10</b> QSK 1, A/V = 100 m <sup>-1</sup>	<b>929 kg</b> (12 m) 77,4 kg/m
<b>HE 300-A</b> QSK 2, A/V = 153 m <sup>-1</sup> (105 m <sup>-1</sup> bei Berücks. von k <sub>sh</sub> )	<b>1060 kg</b> (12 m) 88,3 kg/m
<b>HE 300-B</b> QSK 1, A/V = 116 m <sup>-1</sup> (81 m <sup>-1</sup> bei Berücks. von k <sub>sh</sub> )	<b>1404 kg</b> (12 m) 117,0 kg/m

<sup>14</sup> gemäß [bauforumstahl2013] sowie auf Nachfrage bei Baufirmen, Stand Frühjahr 2015



Preise für die brandschutztechnische Beschichtung von Stahlprofilen hängen hingegen von vielen Faktoren ab. Insbesondere die teilweise sehr hohe Anzahl an einzelnen Arbeitsgängen in Abhängigkeit des Profils entscheiden über die Wirtschaftlichkeit, wie in Kapitel 2.4.4 erläutert. Laut telefonischer Auskunft von Stahlbaufirmen in Verbindung mit [IGSB2014] sind folgende Kostenansätze für dämmschichtbildende Brandschutzbeschichtungen realistisch:

**R30- Beschichtung: zwischen 20,- bis 30,- €/m<sup>2</sup>** Diese Größenordnung basiert auf einem offenen Profil mit einem Profilmfaktor von 140-180 m<sup>-1</sup>. Bei  $A/V \leq 160 \text{ m}^{-1}$  ergibt sich eine erforderliche *Trockenschichtdicke* von etwa 400 µm.

**R60- Beschichtung: zwischen 40,- bis 60,- €/m<sup>2</sup>** Grundlage ist derselbe Profilmfaktor bei einem offenen Profil. Die erforderliche *Trockenschichtdicke* beträgt in diesem Fall ca. 1750 µm.

Der Sprung bei der dämmschichtbildenden Beschichtung von R30 auf R60 bedeutet etwa eine Verdopplung der Kosten. Das entspricht gleichzeitig ungefähr einer Vervierfachung der Schichtdicke (von 400 µm auf 1750 µm). Da es sich hierbei um aufwand- respektive materialbezogene Kosten handelt, lässt sich im Rahmen einer Kostenschätzung bei Kenntnis der jeweils erforderlichen Schichtdicken die Größenordnung auch auf andere Profile extrapolieren, wie im Folgenden ausgeführt wird. Eine R30-Beschichtung erfordert für geschlossene Profile mit einem Profilmfaktor von  $\leq 200 \text{ m}^{-1}$  eine Trockenschichtdicke von etwa 900-1000 µm. Bei Übertragung der Verhältnisse zueinander kostet der R30-Anstrich für das Hohlprofil (RO 323,9) etwa 45,- €/m<sup>2</sup>. Da der Umfang des Profils nahezu einen Meter beträgt (1,018 m<sup>2</sup>/m), entspricht dieser Wert auch ungefähr dem Preis je beschichteten Meter der Stütze. Bezogen auf 12 m Stütze ( $A/V = 200 \text{ m}^{-1}$ ) kostet die R30-Beschichtung ab Werk folglich etwa 540,- €. Bei einer partiellen R30-Beschichtung der unteren 2,50 m ergibt sich ein Mehrpreis von etwa 113,- € je Stütze.

R90- Beschichtung: zwischen **70,- bis 90,- €/m<sup>2</sup>** Grundlage ist ein offenes Profil mit demselben Profilmfaktor ( $A/V \leq 160 \text{ m}^{-1}$ ). Die erforderliche *Trockenschichtdicke* beträgt in diesem Fall ca. 3100  $\mu\text{m}$ .

Bezogen auf das Hohlprofil der Kategorie 3 wäre eine R90-Beschichtung zulassungsbedingt gemäß [bauforumstahl2012] derzeit erst ab einem Profilmfaktor  $\leq 125 \text{ m}^{-1}$  möglich (geschlossenes Profil). Das entspräche bei einem Hohlprofil RO 323,9 einer Wanddicke von mindestens 8,8 mm (RO 323,9 x 8,8;  $A/V = 117,1 \text{ m}^{-1}$ ;  $G = 68,4 \text{ kg/m}$ ) und ließe eine Trockenschichtdicke von etwa 5900  $\mu\text{m}$  erforderlich werden. Bezogen auf eine erforderliche R90-Schichtdicke von 3100  $\mu\text{m}$  mit Kosten von 70,- bis 90,- €/m<sup>2</sup> ergeben sich bei 5900  $\mu\text{m}$  Kosten in Höhe von etwa 170 €/m<sup>2</sup>. Eine vollständige R90-Beschichtung der 12 m-Stütze kostet demnach etwa 2.040,- €. Hierbei ist zusätzlich die erhöhte Stahltonnage von 350 kg zu berücksichtigen, welche mit ca. 600-700,- € beziffert werden kann. Die Kosten für den Brandschutz je Stütze belaufen sich bei der Feuerwiderstandsklasse R90 insgesamt auf etwa 2.700,- € pro Stütze. Eine partielle Beschichtung erscheint hier aus ästhetischen Gründen für unerwünscht, da sich der Übergang vom ungeschützten Bereich zum partiell geschützten Bereich bei einer Trockenschichtdicke von 6 mm bereits mit bloßem Auge sichtbar absetzen würde. Insbesondere im Fall von architektonisch anspruchsvollen Gebäudebereichen wäre das sicherlich aus optischen Gründen auszuschließen. Neben rein monetär-geprägten Argumenten ergeben sich bei den Erwägungen zur brandschutztechnischen Ertüchtigung von geschlossenen Profilen mit dem Ziel *R90* auch zulassungsbedingte und nicht zuletzt architektonische Aspekte, welche eine Rolle spielen.

## 5.6 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurden die einzelnen Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel näher betrachtet und erläutert. Wesentliche Erkenntnisse und deren Auswirkungen wurden dokumentiert und mögliche Grenzen der Bemessung wurden aufgezeigt. Es hat sich gezeigt, dass die Charakteristika des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten, besonderen Gebäudeteils neben der Brandlastmenge und -verteilung vor allem das Brandszenario beeinflusst. Dabei üben neben dem Bemessungsmodell vor allem die

Abstandsflächen zwischen einer Stütze und der Flammenachse einen sehr großen Einfluss auf die Umgebungstemperatur des jeweils betrachteten Bauteils infolge lokaler Brände aus.

Im Flammen- bzw. flammennahen Bereich herrscht eine mittlere Flammentemperatur von ca. 900 °C. Aufgrund normativer Vorgaben bei der vereinfachten Berechnung lokaler Brände ist mindestens partiell stets die mittlere Flammentemperatur zugrunde zu legen. Die mit dem Feldmodell FDS berechneten Ergebnisse lagen ca. 100 K unterhalb der mittleren Flammentemperatur. FDS scheint die Temperaturen im unmittelbaren Flammenbereich zu unterschätzen, auch wenn einzelne Versuchsergebnisse der Literatur ähnlich niedrige Ergebnisse lieferten, wie beispielsweise Tabelle 16 zeigt. Bei der CFD-Simulation lokaler Brände spielt neben einem geeigneten Verbrennungsmodell die Netzdiskretisierung eine wesentliche Rolle. Zu Lasten der Rechenzeit sollte insbesondere im Bereich der Flamme eine ausreichend kleine Gitterstruktur gewählt werden, damit die gemittelten Zelltemperaturen nicht unterschätzt werden und eine realistische Größenordnung erreichen. Unabhängig von deren Größenordnung erscheinen jedoch unmittelbare Flammentemperaturen aus Feldmodellen für die Stützenbemessung infolge lokaler Brände nicht geeignet zu sein. Durch das turbulente Flackern der Flammen können schnelle und große Temperaturschwankungen auftreten, welche zu numerischen Instabilitäten bei der weiteren Bauteilbemessung zum Beispiel mit *SAFIR* führen können (siehe auch Abbildung 58).

Beim Vergleich des allgemeinen Berechnungsverfahrens (Feldmodell FDS) mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren (H-D-Modell) zur Ermittlung der Temperatur in bestimmten Abständen zu lokalen Brandquellen liegen die maximalen FDS-Temperaturen um bis zu 100 K unter denen des H-D-Modells. Dafür liegen die vereinfacht ermittelten Temperaturen in der Brandentstehungsphase bei gleichem Verlauf der Wärmefreisetzungsrates um bis zu 200 K unter den FDS-Temperaturen.

Beim direkten Vergleich der Temperaturen in bestimmten Abständen zum Zentrum der Brandlast beider Verfahren ist außerdem zu berücksichtigen, dass dem H-D-Modell eine punktförmige Brandquelle zugrunde liegt. Die Brandlastfläche geht nur rechnerisch mit ein. Eine Berücksichtigung der Tatsache, dass sich ein bestimmter Radius gerade noch auf dem Rand der Brandlastfläche oder noch innerhalb dieser befindet, wird innerhalb des vereinfachten Verfahrens nicht berücksichtigt. Außerdem liegt vielen Brandversuchen und daraus abgeleiteten Berechnungsansätzen eine flüssige Brandlast zugrunde, welche jedoch gegenüber Feststoffbränden wesentlich homogener innerhalb der Brandlastfläche verbrennt, wie auch die Temperaturverläufe

gemäß Abbildung 117 zeigen. Gleichzeitig überwiegen im allgemeinen Hochbau Brandlasten aus Feststoffen, während brennbare Flüssigkeiten eine Ausnahme darstellen. Die Auswirkungen auf den Brandverlauf und die Temperaturen zeigt die Versuchsauswertung eines vergleichbaren Brandversuches nach [Wilk2013c] (siehe Abbildung 117).

Bei der Auswertung der Bauteilnachweise ergaben sich folgende Erkenntnisse: Falls nicht ein Mindestabstand von 0,5 m bis 1,0 m realistisch nachgewiesen werden kann, bietet der Naturbrand gegenüber der ETK nur bei sehr massigen Stahlbauteilen einen Vorteil, sofern nicht zusätzlich das allgemeine Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung eines Temperaturgradienten zur Anwendung kommt. Die Berücksichtigung eines Temperaturgradienten wirkt sich im Rahmen des allgemeinen Bemessungsverfahrens vor allem dann auch bei schlanken Stahlbauteilen positiv aus, wenn die Temperaturen nur über einen begrenzten Zeitraum wirken, was maßgebend durch die Brandlastdichte beeinflusst wird (siehe auch Abbildung 115). Können noch zusätzlich Abstände zwischen der Bauteil- und der Flammenachse unterstellt werden, lassen sich sogar schlanke Stahlstützen brandschutztechnisch ungeschützt nachweisen. Das Bauteil selber beeinflusst dabei mit seiner Massigkeit indirekt die Intensität, mit der hohe Temperaturen auf das Bauteil wirken. Bei 900 °C überstehen rechnerisch nur sehr massige Stahlbauteile einen statischen Nachweis. Vergleichsweise ergeben sich 900 °C Brandraumtemperatur nach 45 Minuten der ETK. Schlanke Bauteile verfügen nur über einen geringen Erwärmungswiderstand und übernehmen fast ungeschützt die Umgebungstemperatur. Dieses Verhalten ist bekannt. Jedoch ist die Bedeutung des Profilkoeffizienten gerade bei der Betrachtung lokaler Brandszenarien in Atrien und Foyers mit dem Fokus auf eine ungeschützte Bauweise sehr groß. Liegt die Brandraumtemperatur in einer bauteilkritischen Größenordnung vor, ist ohne weitere Ertüchtigungsmaßnahmen oder Überdimensionierungen von Querschnitten ein Bauteilversagen im Brandfall mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Stützen der Foyer-Kategorie 3<sup>15</sup> zeichnen sich häufig durch sehr schlanke Querschnitte aus, während Stützen der Kategorie 1 und 2 bereits aufgrund der statischen Auflast über massige Querschnitte verfügen, die bei den denkbaren thermischen Einwirkungen ihre Tragfähigkeit auch im Brandfall häufig ungeschützt behalten.

Ferner wurde an beanspruchten Stützen gezeigt, in welcher Größenordnung der thermische Zwang einer Stütze infolge einer gehinderten thermischen Dehnung in Abhängigkeit vom statischen System und vom Brandszenario auftreten kann. Unter

---

<sup>15</sup> Es handelt sich hierbei um die Foyer-Kategorien, die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellt wurden, siehe dazu Kapitel 2.5.2 sowie 2.5.3.

Auflast stellte sich nicht die vollständige Zwangskraft ein, da die Stützen teilweise vorher versagten. Weiterhin wurde in Abhängigkeit von der Foyer-Kategorie gezeigt, ob für eine Stütze der Einfluss thermischer Zwänge eine bemessungsrelevante Größenordnung einnimmt oder nicht. Das klassische statische System *Pendelstütze* (Eulerfall 2) liegt demnach für schlanke, brandschutztechnisch ungeschützte Stahlstützen in eingeschossigen Gebäudeteilen bei dem Brandszenario *lokaler Brand* ohne zusätzliche Berücksichtigung thermischer Zwänge nicht auf der sicheren Seite. Sofern Stahlstützen brandschutztechnisch geschützt ausgeführt werden, kommen bei der im Rahmen dieser Arbeit unterstellten architektonischen Besonderheit des Einbauortes für Atrien und Foyers überwiegend dämmschichtbildende Systeme zur Erlangung des Feuerwiderstandes in Frage. Bei der Untersuchung zeigte sich, dass mit steigenden Anforderungen an den Feuerwiderstand der Aufwand überproportional ansteigt. Dabei ergab sich, dass eine nur partielle Ertüchtigung im unteren Bereich der Stütze bereits aus optischen Gründen infolge der erforderlichen Schichtdicken nur bei feuerhemmenden Anstrichen in Frage kommt. Gerade dabei kommt der Aspekt hinzu, dass nur vereinzelte Materialkennwerte von Dämmschichtbildnern für die Brandsimulation vorliegen. Diese wurden von [Tabeling2014] für allgemeine Rechenverfahren untersucht. Ferner haben Schaumann, Tabeling und Weisheim in [Schaumann2015] ein Näherungsverfahren zur rechnerischen Berücksichtigung von Dämmschichtbildnern vorgeschlagen. Für vereinfachte Rechenverfahren lassen sich die Wirkungen von bestimmten Schichtdicken jedoch nicht über, temperaturunabhängige konstante Werte, wie für Bekleidungen gemäß Anhang AA [DIN EN 1993-1-2/NA:2010] berücksichtigen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit widmet sich dem Problem der brandschutztechnischen Bemessung von Stützen in Eingangssituationen von Atrien und Foyers. Die Hypothese des Verfassers lautet, dass eine Übertragung der Standardbemessung im Brandfall auf Stützen in brandlastarmen Eingangsbereichen von Atrien und Foyers zu sehr konservativen Ergebnissen führt und gleichzeitig verschiedene Systemreserven unberücksichtigt bleiben.

Nach der Erläuterung der Problemstellung in Kapitel 1 werden in Bezug auf diese Fragestellung die theoretischen Grundlagen und wesentlichen Zusammenhänge des Standes der Erkenntnisse erläutert (Kapitel 2). Dabei wird auf die bauordnungsrechtlichen Brandschutzanforderungen an die Bauteile in Eingangssituationen von Atrien und Foyers eingegangen (Kapitel 2.2). Weiterhin werden die physikalischen Grundlagen der thermischen und mechanischen Analyse mit dem Fokus auf die lokale Bemessung unter Naturbrand dargelegt (Kapitel 2.3 und 2.4). Daneben wird insbesondere auf die Besonderheiten der Nutzung und der Brandlasten (Kapitel 2.5) sowie der korrespondierenden Bemessungsbrandszenarien eingegangen (Kapitel 2.3.4).

Aufgrund der nicht eindeutigen Datenlage bei Atrien und Foyers in Bezug auf die Geometrie, die Brandlasten sowie die Brandentstehungswahrscheinlichkeiten werden dafür eigene Daten im Rahmen der Delphi-Methodik erstmalig erhoben (Kapitel 3). Auf Basis dieser Daten werden Atrien und Foyers in drei Kategorien zusammengefasst, um bestimmte Charakteristiken verschiedener Eingangssituationen zu identifizieren. Diese Kategorien unterscheiden sich vor allem in der Geschossigkeit, der Höhe des Systems und der statischen Auflast. Ferner wird durch die erhobenen Daten die Vermutung des Verfassers bestätigt, dass die flächig-verteilt anzunehmende, normative Bemessungsbrandlast für Bürogebäude bei Übertragung auf Atrien und Foyers eine Überschätzung der tatsächlichen Verhältnisse bedeutet. Demgemäß liegen überwiegend lokal konzentrierte Brandlasten vor, deren Brandlastdichte unterhalb der normativen Vorgaben des Eurocodes liegt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ebenfalls Risikoabwägungen und wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen durchgeführt (Kapitel 3.7). Diese führen in Form der ergänzenden Befragung von Feuerwehren in Bezug auf Erfahrungen mit Bränden in diesen Gebäudenutzungen zur Bestätigung einer weiteren Annahme des Verfassers,

wenn auch nur qualitativer Art: *Alle wenigen Brände, die in Atrien aufgetreten sind, konnten in Deutschland in den letzten Jahrzehnten stets rasch gelöscht werden.*

Das bedeutet, dass die durch Normbrandszenarien implizit unterstellten Bauteilgefährdungen im Brandfall bei keinem bekannten Fall eintraten. Damit zeigt das Ergebnis trotz der diffizilen Datenlage mit fehlenden nationalen Erfahrungswerten eines deutlich: Offenbar brennt es in den Nutzungen oder den hier betrachteten Gebäudebereichen nur sehr selten und falls es brennt, dann gehen die Brandereignisse nicht über einen Entstehungsbrand hinaus. Baurechtlich ist jedoch stets zu unterstellen, dass ein entsprechendes Brandereignis auch in Atrien und Foyers durchaus auftreten kann. Die möglichen Einflüsse und Auswirkungen auf die tragenden Bauteile werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und aufgezeigt.

Da dieses qualitative Ergebnis für numerische Untersuchungen wahrscheinlichkeitstheoretischer Art nicht direkt genutzt werden kann, werden die Auswirkungen von reduzierten Brandentstehungswahrscheinlichkeiten auf das Sicherheitskonzept des Eurocodes im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht (Kapitel 3.7.3). Ein Herabsetzen der Brandentstehungswahrscheinlichkeit hätte zur Folge, dass sich die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrate reduzieren würden (siehe Abbildung 47), woraus folgt, dass sich das Niveau eines Bemessungsbrandes verkleinert und die Branddauer verkürzt.

In den numerischen Untersuchungen dieser Arbeit werden in Kapitel 4 mittels verschiedener Brandszenarien die jeweiligen Brandraumtemperaturen für die anschließende Bauteilbemessung ermittelt. Es zeigt sich, dass Zonenmodelle für die lokale Bemessung von Stützen im Brandfall nicht geeignet sind, da die lokalen Temperaturen im Brandfall stark unterschätzt werden. Hingegen führt die direkte Centerline-Temperatur lokaler Brände zur konservativen Unterstellung, dass Plumeachse und Stützenachse direkt übereinander liegen, was im klassischen Hochbau bei üblichem Mobiliar nicht möglich ist. Mit verschiedenen vereinfachten und allgemeinen Methoden lässt sich die Wirkung der Temperatur auch in gewissen Abständen zur Brandquelle berücksichtigen. Es wird gezeigt, dass bereits ein radialer Achsabstand von der Brandquelle von einem Meter in Verbindung mit dem entsprechenden Brandszenario einen großen Einfluss auf das Bemessungsergebnis von Stützen im Brandfall hat.

Es wird zudem in Kapitel 4.5 gezeigt, dass bei Foyerstützen in aufgehenden Gebäuden, das heißt in Eingangssituationen der Kategorien 1 und 2, die implizite Vernachlässigung des thermischen Zwangs aufgrund der gewählten Lagerungsform *Pendelstütze* zu keinen bemessungsrelevanten Auswirkungen führt. In den untersuchten Fällen beträgt

der dadurch unberücksichtigte Lastanteil an der Gesamtlast weniger als 1 %. Hingegen wird bei ungeschützten, schlanken Atriumstützen mit einer geringen Auflast unter lokaler Brandbeanspruchung in Abhängigkeit vom Abstand zur Brandquelle eine Größenordnung des unberücksichtigten Lastanteiles von bis zu 17 % infolge gehinderter Längenänderung festgestellt. Im Rahmen der in dieser Arbeit untersuchten Fragestellung ist das als durchaus bemessungsrelevant zu betrachten. Gleichzeitig ist hierbei festzuhalten, dass der Einfluss des Abstandes der Stütze zur lokalen Brandquelle gegenüber dem unberücksichtigten thermischen Zwang beim Nachweis überwiegt.

Im weiteren Verlauf der mechanischen Analyse werden in Kapitel 4.6 vereinfachte und allgemeine Bemessungsverfahren untersucht. Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich Stützen in Atrien nach ihren statischen Systemen und nach ihrer Auflast unterscheiden. Gegenüber der vereinfachten Bauteilbemessung im Brandfall ist es mit strukturmechanischer Bemessungssoftware im Rahmen des allgemeinen Bemessungsverfahrens möglich, bei einem lokalen Brand einen Temperaturgradienten in Stützenlängsrichtung zu berücksichtigen. Sofern es sich um Haupttragglieder von Geschossbauten handelt, verfügen Stützen bedingt durch ihre statische Auflast bereits über eine so große Massigkeit, dass infolge der hier betrachteten, lokalen Brandszenarien auch ungeschützte Stahlstützen ihre Tragfähigkeit im Brandfall nicht verlieren. Das zeigen die Untersuchungen mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung eines Temperaturgradienten über die Stützenhöhe.

Eine wirtschaftlich bemessene, schlanke Stütze weist hingegen wenige Systemreserven im Brandfall auf. Trotz einer brandlastarmen Umgebung, wie bei architektonisch hervorgehobenen Eingangsbereichen der Fall, stellt sich mit dem Fokus auf die ungeschützte Stahlbauweise die Frage nach der Art und Anordnung von Brandlasten. Die Untersuchungen haben gezeigt, wie sensibel ungeschützte schlanke Stahlstützen auf die Lage zum Brandherd reagieren. Lassen sich bestimmte Mindestabstände von Bauteil und Brandlast einhalten, ist bei filigranen Querschnitten mit einem  $A/V$ -Verhältnis von  $200 \text{ m}^{-1}$  eine ungeschützte Bauweise möglich. Vor dem Hintergrund einer flexiblen Nutzung ist daher abzuwägen, ob Mindestabstände im laufenden Betrieb realistisch eingehalten werden können, die eine Zustimmung der Bauaufsicht voraussetzen. In Abhängigkeit von der Lage im Brandraum können daher auch von schlanken, ungeschützten Stahlstützen in eingeschossigen Gebäudeteilen entsprechende Bauteilwiderstände im Brandfall nachgewiesen werden. Für Stahlverbundstützen resp. Stahlbetonstützen gilt dieser Sachverhalt bei günstigerem Erwärmungsverhalten des Stahlbetons im Besonderen.



Alternativ ist natürlich auch eine partielle Brandschutzertüchtigung der Stütze möglich (Kapitel 5.5). Da bereits eine relativ kurze Brandzeit auf dem Niveau der mittleren Flammentemperatur für schlanke Bauteile zum Versagen im Brandfall führen kann, erhöht alternativ eine partielle Brandschutzertüchtigung im unteren Bereich der Stütze dessen Feuerwiderstand.

Es ist zu konstatieren, dass Eingangsbereiche in Form von Atrien oder Foyers besondere Gebäudebereiche darstellen, die sich aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften insbesondere in der Geometrie, der Nutzung sowie der Größe und Anordnung der Brandlasten von hochbauüblichen Gebäudeteilen signifikant unterscheiden. Das haben die Untersuchungen in Kapitel 2.5 sowie die Ergebnisse der Delphi-Befragung in Kapitel 3 gezeigt. Die Charakteristika dieser Gebäudeteile haben entsprechende Konsequenzen auf die möglichen Brandszenarien, welche wiederum die korrespondierenden Bauteilwiderstände im Brandfall von Stützen in Atrien und Foyers beeinflussen. Zusammenfassend wird die Hypothese, dass eine Übertragung der Standardbemessung im Brandfall auf Stützen in brandlastarmen Atrien und Foyers zu sehr konservativen Ergebnissen führt und gleichzeitig verschiedene Systemreserven unberücksichtigt bleiben, durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen bestätigt.

## 6.2 Ausblick

Bei Berücksichtigung aller Auswertungen dieser Arbeit ergeben sich zu nachfolgenden Fragestellungen Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen.

In Bezug auf vereinfachte Methoden bei Brandszenarien ist dem Verfasser bei der normativen Umsetzung des Heskestad-Ansatzes gemäß [DIN EN 1991-1-2] die folgende Ungereimtheit aufgefallen. Im Eurocode wird die mittlere Flammenlänge  $L_f$  als Eingangswert für das Heskestad-Verfahren berechnet, da beim rechnerischen Erreichen der Deckenhöhe das alternative *Ceiling Jet Modell* von *Hasemi* anzuwenden ist. Im Nationalen Anhang wird nach Meinung des Verfassers die Auswirkung des unmittelbaren Flammenbereiches nur indirekt und auch nur teilweise berücksichtigt. Es wird unabhängig vom Rechenergebnis unterhalb von 1,0 m eine mittlere Flammentemperatur von 900 °C angenommen. Damit werden niedrigere Temperaturen pauschal angehoben und gleichzeitig die numerischen Singularitäten in unmittelbarer Nähe zur Brandquelle ausgeglichen. In der weiteren Betrachtung wird

jedoch der Zusammenhang zwischen der mittleren Flammenlänge und den Temperaturen im unmittelbaren Flammenbereich nicht hergestellt.

Zu überprüfen wäre beispielsweise, ob innerhalb der Plumeachse nicht unterhalb von einem Meter, sondern unterhalb von  $L_f$  die mittlere Flammentemperatur anzusetzen wäre. Es ist fraglich, ob eine Bemessungstemperatur aus einem Bereich innerhalb der Flamme stets auf der sicheren Seite liegen kann, die gleichzeitig unterhalb der mittleren Flammentemperatur liegt. Hierzu wären Versuche interessant, die die Temperaturen in der Centerline zwischen der Höhe  $z = 1,0$  m und der jeweiligen mittleren Flammenlänge  $L_f$  bei verschiedenen Brandlasten messen.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse auf Basis des H-D-Modells die große Auswirkung von bereits geringen Abständen zwischen der Bauteilachse und der Plumeachse. Beispielsweise wurden im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen von Brandszenarien mit Achsabständen bis zu einem Meter aufgezeigt. Insbesondere, wenn sich lokale, hochbauübliche Brandlasten in Stützennähe befinden, stellt sich daher die Frage, welche Abstände numerisch unterstellt werden dürfen. In wieweit bestimmte Abstände, die gleichzeitig noch auf der sicheren Seite liegen, in ein normatives Bemessungsverfahren mit aufgenommen werden können, müssten weitere Untersuchungen klären. Dabei stellt sich die Frage, unter welchen Randbedingungen sie baupraktisch umsetzbar und damit auch anrechenbar sind.

In dem Zusammenhang wird auf den folgenden, weiteren Ansatzpunkt verwiesen, die Art der Brandlast in Versuchen. In den Rechenansätzen wird stets indirekt unterstellt, dass es sich um Flüssigkeitsbrände handelt, die sich tendenziell gleichmäßig ausbreiten. Das gilt auch für die FDS Berechnung mit den pauschalen Ansätzen des Verbrennungsmodells. Die schwedischen Versuche ([Byström2012] und [Sjöström2013]) basierten ebenfalls auf Flüssigkeitsbränden. Die Versuche von [Wilk2013c] haben jedoch gezeigt, dass es innerhalb der Brandlastfläche, bestehend aus hochbauüblichen Feststoffen, über den Brandverlauf große Temperaturunterschiede gibt. Eine hochbauübliche Brandlast ist jedoch kein homogenes Konstrukt wie eine Flüssigkeit. Um sowohl die Ergebnisse des H-D-Modells als auch von CFD-Berechnungen besser beurteilen zu können, wäre es wünschenswert, wenn in Brandversuchen lokaler Brände zukünftig mit verschiedenen Brandlasten, vor allem aus hochbauüblichen Feststoffen, gezielt die Temperaturen in verschiedenen vertikalen und horizontalen Abständen zur Brandquelle gemessen würden. Dabei ist aus Sicht des Verfassers darauf zu achten, dass Effekte, wie die gemessene Temperatur

eines Objektes, welches sich bereits innerhalb einer zusammengefallenen Brandlast befindet, ausgeschlossen werden. Beispielsweise würden Temperaturmessstellen, die von der Decke hängen, diese Problematik berücksichtigen.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Quellen- und Literaturverzeichnis

- [Agarwal2012] Agarwal A., Varma A.H.: *Fire Induced Progressive Collapse of Steel Building Structures*, Tagungsband Structures Congress 2012, American Society of Civil Engineers (ASCE), Chicago, 2012
- [Ahmad2000] Ahmad M.H.: *Design Principles of Atrium Buildings for the Tropics*, Cetakan Pertama, Universiti Teknologi Malaysia, 2000
- [Assenmacher2010] Assenmacher W.: *Deskriptive Statistik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [Baehr2013] Baehr H.D., Stephan K.: *Wärme und Stoffübergang*, 8. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [Baldwin1970] Baldwin R. et al.: *Survey of fire-loads in modern office buildings – some preliminary results*, Fire Research Note No. 808, UK Fire Research Station (FRS), Borehamwood 1970
- [Bastings1988] Bastings D.: *Fire Safety in Atrium Buildings*, Building Research Association of New Zealand, BRANZ Study Report No.15 (1988)
- [bauforumstahl2012] bauforumstahl (BFS): *Dämmschichtbildende Brandschutzbeschichtung auf Stahlbauteile (offene und geschlossene Profile)*, Tabellenübersicht, Bauforumstahl e.V., Düsseldorf 13.03.2012, <http://www.bauforumstahl.de/>
- [bauforumstahl2013] bauforumstahl (BFS): *Kosten im Stahlbau 2013 – Basisinformationen zur Kalkulation*, Bauforumstahl e.V., Düsseldorf 2013, <http://www.bauforumstahl.de/>
- [Beilicke1990] Beilicke G.: *Bautechnischer Brandschutz – Brandlastberechnung*, Rudolf Haufe Verlag, Berlin 1990
- [Belaschk2012] Belaschk H.: *Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe*, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2012
- [Brein2001] Brein D.: *Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln)*, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Dezember, 2001

- [Briggs1942] Briggs L.J.: *Fire Resistance classifications of building constructions*, Report BMS92, National Bureau of Standards, Washington 1942
- [Boué1958] Boué P.: *Der Feuerschutz im Stahlhochbau insbesondere von Stahlstützen*, Dissertation, TH Aachen, 1958
- [Broadgate1991] Autorenkollektiv, *Investigation of Broadgate Phase 8 Fire*, P113, The Steel Construction Institute, Berkshire, June 1991
- [Bryl1975] Bryl S.: *Brandbelastungen im Hochbau*, Winterthur, Schweizerische Bauzeitung, Band 93, Heft 17, S. 243-249, April 1975
- [Bryson1967] Bryson J.O., Gross D.: *Techniques for the survey and evaluation of live floor loads and fire loads in modern office buildings*, NBS Building Science Series 16 (National Bureau of Standards, Washington DC, December 1967)
- [Byström2012] Byström A. et al: *Large Scale Test to explore thermal exposure of column exposed to localized fire*, Tagungsband, 7<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire, Zürich, 2012
- [Cadorin2001] Cadorin J.-F. et al: *The Design Fire Tool OZone V2.0 - Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests*, 1st DRAFT, University of Liege, Belgium, June 2001
- [Cadorin2003a] Cadorin J.-F., Franssen J.-M.: *A tool to design steel elements submitted to compartment fires OZone V2, Part 1: pre and post flashover compartment fire model*, Fire Safety Journal, 38 (5), p.395-427, Sep 2003
- [Cadorin2003b] Cadorin J.-F. et al: *A tool to design steel elements submitted to compartment fires OZone V2, Part 2: Methodology and application*, Fire Safety Journal, 38 (5), p.429-451, Sep 2003
- [Cajot2005] Cajot L.G. et al: *Thermische & mechanische Einwirkungen (WP1-Präsentation)*, Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge (DIFISEK), Vortrag vom 17.02.2005 in Hannover
- [Capote2009] Capote J.A. et al: *Scale Tests of Smoke Filling in Large Area*, Fire Technology, Volume 45, p.201-220, 2009
- [Chow1993] Wong W.K.: *On the Simulation of Atrium Fire Environment in Hong Kong Using Zone Models*, Journal of Fire Science, Vol. 11 – 1993, Hong Kong Polytechnic University, 1993

- [Claret2007] Claret A.M., Andrade A.T.: *Fire Load Survey of Historic Buildings: A Case Study*, Journal of Fire Protection Engineering, Volume 17, pp.103-112, 2007
- [Cohrs2003] Cohrs P.C.: *Parameterstudie zu Deckentragwerken von Stahlgeschossbauten mit ungeschützten Verbundträgern im Brandfall*, Diplomarbeit, Universität Hannover, 2003
- [Cohrs2008] Cohrs P.C.: *Brandschutztechnische Klassifizierung von Stahlbetonkragstützen*, Masterthese, Europäisches Institut für postgraduale Bildung an der TU Dresden e.V., 2008
- [Culver1975] Culver C.G., Kushner J.: *A Program for Survey of Fire Loads and Life Loads in Office Buildings*, NBS Technical Note 858 (National Bureau of Standards, Washington DC, May 1975)
- [Culver1976] Culver C.G.: *Survey Results for Fire Loads and Life Loads in Office Buildings*, NBS Building Science Series 85 (National Bureau of Standards, Washington DC, May 1976)
- [Culver1978] Culver C.G.: *Characteristics of Fire Loads in Office Buildings*, Fire Technology, February 1978, Volume 14, Issue 1, pp 51-60
- [Dehne2003] Dehne M.: *Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung*, Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 2003
- [DiNenno2002] DiNenno P.: *SFPE handbook of fire protection engineering*, 3rd Edition, National Fire Protection Association (NFPA), Bethesda, 2002
- [Fahrmeir2011] Fahrmeir L. et al: *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse*, 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011
- [Fang2011] Fang C. et al: *Robustness of steel-composite building structures subject to localized fire*, Fire Safety Journal, Volume 46 (2011) pp. 348-363
- [Fisch2011] Fisch M.N., Zargari M.: *Analyse und Bewertung von Atrien in Bürogebäuden*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011
- [Fontana2006] Fontana M. et al.: *Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie und Gewerbebauten*, Bauphysik 28 Heft 6/ 2006, Verlag Ernst & Sohn
- [Fouad2006] Fouad N.A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2006*, 6.Jahrgang, Ernst & Sohn, Berlin 2006

- [Fouad2011] Fouad N.A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2011*, 11.Jahrgang, Ernst & Sohn, Berlin 2011
- [Franssen2005] Franssen J.-M.: *SAFIR: A Thermal/ Structural Program for Modeling Structures Under Fire*, Engineering Journal, A.I.S.C., pp. 143-158, Vol. 42, No. 3 (2005)
- [Franssen2010] Franssen J.-M., Real P.V.: *Fire Design of Steel Structures*, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2010
- [Fridolf2014] Fridolf K., Wahlqvist J.: *Predictive Capabilities of Computer Models for Simulation of Tunnel Fires*, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 2014
- [Garlock2012] Garlock M., Neal M.C. et al: *Effects of Fire on a Tall Building Designed to Resist Progressive Collapse*, Tagungsband Structures Congress 2012, American Society of Civil Engineers (ASCE), Chicago, 2012
- [Geilinger1950] Geilinger E., Kollbrunner K.F.: *Feuersicherheit der Stahlkonstruktionen I. Teil*, Mitteilungen der Technischen Kommission des Schweizer Stahlbauverbandes Heft 3, Verlag Leemann, Zürich, Mai 1950
- [Geilinger1956] Geilinger E., Geilinger W.: *Feuersicherheit der Stahlkonstruktionen II. Teil*, Mitteilungen der Technischen Kommission des Schweizer Stahlbauverbandes Heft Nr. 15, Verlag Schweizer Stahlbauverband, Zürich, Juli 1956
- [Glück1990] Glück B.: *Wärmeübertragung*, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1990
- [Green2002] Green M., Young W.: *Die Brandversuche in Cardington im Originalmaßstab und ihre Bedeutung für den Tragwerksplaner*, Stahlbau 71 (2002), Heft 5, S. 351 ff., Ernst & Sohn, Berlin, Mai 2002
- [Gressmann2005] Gressmann H.-J.: *Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz*, Expert-Verlag, Renningen, 2005
- [Gretener1973] Gretener M.: *Bewertung der Brandgefährdung und Ableitung von Schutzmaßnahmen (Gretener Methode von 1968)*, Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen, Bern, 1973

- [Hadjisophocleous2010] Hadjisophocleous G., Zhengrong C.: *A Survey of Fire Loads in Elementary Schools and High Schools*, Journal of Fire Protection Engineering, 2010 20: pp. 55-71
- [Häder2009] Häder M.: *Delphi-Befragungen, Ein Arbeitsbuch*, 2. Auflage, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009
- [Häder2014] Häder M.: *Delphi-Befragungen, Ein Arbeitsbuch*, 3. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2014
- [Hansell1994] Hansell G.O., Morgan H.P.: *Design approaches for smoke control in atrium buildings*, Building Research Establishment report 258, Borehamwood, 1994
- [Hass1994] Hass R. et al: *Stahlbau Brandschutz Buch*, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 1994
- [Hass1995] Hass R.: *Brandschutzlösungen im modernen Stahlbau*, Tagungsband Braunschweiger Brandschutztagung 1995, S. 203-212
- [Hegger2014] Hegger T.: *Entwicklung einer nationalen Brandschadensstatistik*, Tagungsband Braunschweiger Brandschutztagung 2014, S. 261-272
- [Herwig2009] Herwig H., Moschallski A.: *Wärmeübertragung - Physikalische Grundlagen*, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2009
- [Heskestad1978] Heskestad G., Delichatsios M.A.: *The Initial Convective Flow in Fire*, 17th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, 1978, pp. 1113 - 1123.
- [Hohmann1997] Hohmann R., Setzer M.J.: *Bauphysikalische Formeln und Tabellen*, 3. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf 1997
- [Hosser2008a] Hosser D., Weilert A.: *Schutzziele und Sicherheitsanforderungen für Brandschutznachweise*, Tagungsband: vfdb Jahresfachtagung 2008, S. 295-320
- [Hosser2008b] Hosser D. et al: *Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung)*, ZP 52-5-4.168-1239/07, IBMB, TU Braunschweig 2008



- [Hosser2009] Hosser D. (Hrsg.) et al.: *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, 2. Auflage Mai 2009
- [Hosser2012] Hosser D. (Hrsg.) et al.: *Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes (Kommentar)*, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2012
- [Hosser2013] Hosser D. (Hrsg.) et al.: *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, 3. Auflage November 2013
- [Hung2003] Hung W.Y.: *Architectural Aspects of Atrium*, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Volume 5, p.131-137, The Hong Kong Polytechnic University, 2003
- [IGSB2014] IGSB: *Brandschutzbeschichtungen im Stahlbau - IGSB-INFO 1*, Interessengemeinschaft Stahl-Brandschutzbeschichtung (IGSB), Düsseldorf, Dezember 2014
- [Karlsson2000] Karlsson B., Quintiere J.G.: *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, Boca Raton 2000
- [Kerber2007] Kerber S., Milke J.A.: *Using FDS to simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium*, Fire Technology, Volume 43, p.45-75, 2007
- [Knaust2009] Knaust C.: *Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden*, Dissertation, TU Wien, 2009
- [Klein2009] Klein J.: *Zum Verhalten von Tragwerken bei natürlicher Brandeinwirkung unter Berücksichtigung technischer Maßnahmen*, Dissertation, ETH Zürich, 2009
- [Knetsch2006] Knetsch T., Marx M.: *Skript zur Vorlesung Brandentstehung/Explosionslehre*, Europäisches Institut für postgraduale Bildung an der TU Dresden e. V., 2006
- [König2003] König G., Liphardt S.: *Hochhäuser aus Stahlbeton*, Beton Kalender 2003, Band I, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin 2003
- [Kollbrunner1959] Kollbrunner K.F.: *Feuersicherheit der Stahlkonstruktionen III. Teil (Feuerversuche mit belasteten Stahlrahmen)*, Schweizer

- Stahlbauverband, Mitteilungen der Technischen Kommission Heft 18, Verlag Schweizer Stahlbauverband, Zürich, 1959
- [Kollbrunner1960] Kollbrunner K.F.: *Bewertung des Feuerschutzes der Stahlkonstruktionen nach dem Punktesystem*, Schweizerische Bauzeitung, Heft 9, S. 142-144, März 1960
- [Kollbrunner1965] Kollbrunner K.F.: *Für Brandbelastungen bis zu 20 kg/m<sup>2</sup> muß der Stahl das Feuer nicht fürchten*, Europäische Konvention der Stahlbauverbände, Heft Nr. 3, Verlag Schweizer Stahlbauvereinigung, Zürich, September 1965
- [Kordina1981] Kordina K., Meyer-Ottens C.: *Beton Brandschutz Handbuch*, Beton Verlag GmbH, Düsseldorf, 1981
- [Kordina1999] Kordina K., Meyer-Ottens C.: *Beton Brandschutz Handbuch*, 2. Auflage, Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf 1999
- [Krüger2014] Krüger D. et al: *Methoden in der naturwissenschafts-didaktischen Forschung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014
- [Kuhlmann2014] Kuhlmann U. (Hrsg.): *Stahlbaukalender 2014: Eurocode 3 - Grundnorm Außergewöhnliche Einwirkungen*, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2014
- [Kumar1997] Kumar S., Kameswara R.: *Fire Loads in Office Buildings*, Journal of Structural Engineering, March 1997, pp. 365-368
- [Kurzweil2008] Kurzweil P. et al: *Physik – Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Anwendungen und Experimente, Studium Technik, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2008
- [Kurzweil2012] Kurzweil P., Scheipers P.: *Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*, 9. Erweiterte Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2012
- [Kwon2006] Kwon J.-W.: *Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread*, Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester 2006
- [Langeheinecke2013] Langeheinecke K., Jany P. et al.: *Thermodynamik für Ingenieure*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [Lee2011] Lee S.: *Computational Investigation of Flashover Mechanisms using Fire Dynamic Simulator (FDS)*, Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011

- [Marx1975] Marx, H.: *Grossbrandversuch an einem 3-geschossigen Stahlskelettgebäude*, IVBH Berichte der Arbeitskommissionen, Wiesbaden, Band 21, Leipzig, 1975
- [McGrattan2013] McGrattan K. et al: *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication 1018, Sixth Edition, Gaithersburg, 2013
- [McGrattan2014a] McGrattan K. et al: *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 3: Validation*, NIST Special Publication 1018, Sixth Edition, Gaithersburg, 2014
- [McGrattan2014b] McGrattan K. et al: *Fire Dynamics Simulator, User's Guide*, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, Gaithersburg, 2014
- [Mayr2013] Mayr J., Battran L.: *Brandschutzatlas*, Feuertrutz Verlag, aktueller Stand: 09/2013
- [Melinek1993] Melinek S.J.: *The Distribution of Fire Load*, Fire Safety Journal, Volume 20 (1993) pp. 83-88
- [Merlan1931] Merlan E., *Das Großfeuer in dem Stahlskelettbau des Warenhauses „ARA“ in Prag*, Der Bauingenieur, Heft 27, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1931
- [Narayan1995] Narayanan P., *Fire Severities for Structural Fire Engineering Design*, Building Research Association of New Zealand, BRANZ Study Report No.67 (1995)
- [Neufert2012] Neufert E., Kister J.: *Bauentwurfslehre*, 40., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012
- [Nußelt1915] Nußelt W.: *Das Grundgesetz des Wärmeüberganges*, Gesundheits-Ingenieur 38, Zeitschrift für die gesamte Städtehygiene, 1915
- [Pasch1994] Pasch U.: *Untersuchung zur Simulation ausgewählter Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen*, Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht Nr. 91, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer – Arbeitskreis V (Unterausschuss Feuerwehrangelegenheiten), Juni 1994
- [Pettersen1980] Petersen C.: *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen*, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1980

- [Pettersson1976] Pettersson O. et al.: *Fire engineering design of structures*, Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50, 1976
- [Povh2014] Povh B., Soergel E.: *Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler*, 2. überarbeitete und ergänzte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- [Quenzel2009] Quenzel K.-H.: *Einrichtungen zur Rauch- und Wärmefreihaltung*, 4. überarbeitete Auflage, Feuertrutz Verlag, 2009
- [Radolsky2012] Radolsky L.: *Structural Fire Loads*, Mc Graw Hill, New York 2012
- [Raikainen2004] Raikainen J., Keski-Rahonen O.: *Statistical Determination of Ignition Frequency of Structural Fires in Different Premises in Finland*; Fire Technology, Volume 40, p.335-353, 2004
- [Rasbash1983] Rasbash D.J. (et al.): *Fire Load and Fire Exposure*, Fire Safety Journal, Volume 6, Issue 1, Pages 24–34, 1983
- [Rho1999] Rho J.S., Ryou H.S.: *A numerical study of atrium fires using deterministic models*, Fire Safety Journal, Volume 33, Pages 213–229, 1999
- [Richter2009] Richter E.: *Brandschutztechnische Bemessung von Betontragwerken nach Eurocode 2 Teil 1-2*, Tagungsband Braunschweiger Brandschutztag 2009, S. 133-152
- [Rodewald2007] Rodewald R.: *Brandlehre*, 6. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2007
- [Roik1983] Roik K.: *Vorlesungen über Stahlbau*, 2. überarbeitete Auflage, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1983
- [Schaumann1984] Schaumann P.: *Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung*, Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr Universität Bochum, 1984
- [Schaumann2002] Schaumann P., Heise A.: *Erläuterungen zur DAST-Richtlinie 019 Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden*, Stahlbau 71 (2002), Heft 5, Seiten 310 – 323
- [Schaumann2011] Schaumann P., Sothmann J. et al: *Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau*, erschienen in Bauphysikkalender 2011, Ausgabe Brandschutz, Seiten 383 – 407

- [Schaumann2014] Schaumann P., Kleibömer I.: *Brandschutztechnische Bemessung von Stahl- und Verbundkonstruktionen*, erschienen in Stahlbaukalender 2014, Ausgabe Eurocode 3 – Grundnorm, Außergewöhnliche Einwirkungen, Seiten 333 – 411
- [Schaumann2015] Schaumann P. et al.: *Fire design of steel structures with intumescent coatings*, Tagungsband Nordic Steel Construction Conference 2015, Tampere, Finland, September 2015
- [Schleich1999] Schleich J.B. et al.: *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in large compartments*, Final report, Contract No. 7210-SA/210/317/517/619/932, Science, Research and Development, Luxemburg, 1999
- [Schleich2001] Schleich J.B., Cajot L.: *Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand*, EGKS-Projekt 7215-PA/ PB/ PC-057, ARBED-Recherches, Esch/ Alzette, Luxemburg, 2001
- [Schleich2002a] Schleich J.B. et al.: *Competitive steel buildings through natural fire safety concepts*, Final report, Luxemburg 2002
- [Schleich2002b] Schleich J.B. et al.: *Valorisation project — Natural fire safety concept*, Final Report, Luxemburg 2002
- [Schleich2003] Schleich J.B. et al.: *Natural fire safety concept – Full-scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user friendly design tool*, Final Report, Luxemburg 2002
- [Schmitz2003] Schmitz H.-J.: *Akzeptanz von Arbeitsplatzbedingungen in Büros an Atrien unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtverhältnisse*, Dissertation, TU Dortmund, Tectum Verlag, Marburg, 2003
- [Schneider1992] Schneider U. et al.: *Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen*, Zusammenfassender Abschlussbericht 23-80.00-312, IRB-Verlag, 1992
- [Schneider1995] Schneider U.: *Grundlagen zur Festlegung von Brandszenarien für den Brandschutzentwurf*, Zeitschrift vfdB, Heft 3, Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, 1995
- [Schneider2006] Schneider U. et al.: *Systematische Zusammenstellung von Bemessungsbrandszenarien für den Brandschutzentwurf*, Dokumentation, Institut für Hochbau und Technologie, Wien, 2006

- [Schneider2007] Schneider U. et al: *Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz*, 5. Auflage, Expert Verlag, Renningen 2007
- [Schneider2008] Schneider U. et al: *Baulicher Brandschutz*, 2. Auflage, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2008
- [Schneider2009] Schneider U.: *Ingenieurmethoden im Brandschutz*, 2. Auflage, Werner Verlag, Köln 2009
- [Schwehr2005] Schwehr P.: *Atrium: Glasüberdeckte Höfe und Hallen - ein interdisziplinäres Planungswerkzeug*, Hochschule für Technik + Architektur Luzern, Zürcher Hochschule Winterthur, Verlag Birkhäuser, 2005
- [Sjöström2013] Sjöström J. et al: *Thermal exposure to a steel column from localized fires*, Fire Technology, SP Report 2012:04, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, 2013
- [Somaini2012] Stern-Gottfried J.: *Biegeknicken und lokales Beulen von Stahlstützen im Brandfall*, Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2012
- [Stern2011] Stern-Gottfried J.: *Travelling Fires for Structural Design*, PhD thesis, University of Edinburgh, 2011
- [Stern2012a] Stern-Gottfried J., Rein G.: *Travelling Fires for Structural Design-Part I: Literature review*, Fire Safety Journal, Volume 54, Pages 74–85, November 2012
- [Stern2012b] Stern-Gottfried J., Rein G.: *Travelling Fires for Structural Design-Part II: Design methodology*, Fire Safety Journal, Volume 54, Pages 96–112, November 2012
- [Stock2010] Stock B. et al: *Ingenieurmethoden nach Norm?*, FeuerTRUTZ Magazin Ausgabe 4.2010, Feuertrutz GmbH, Köln, 2010
- [Tabeling2014] Tabeling F.: *Zum Hochtemperaturverhalten dämmschichtbildender Brandschutzsysteme auf Stahlbauten*, Dissertation, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, 2014
- [Thomas1986] Thomas P.H.: *Design Guide - Structural Fire Safety*, CIB W14 Workshop-Report, Fire Safety Journal, Volume 10, Issue 2, Pages 77–137, March 1986
- [VilaReal2010] Vila Real P., Franssen J.-M.: *Elefir-EN*, Software for Fire Design of Structural Steel Members according to Eurocode 3, <http://elefired.web.ua.pt>, 2010

- [Wald2009] Wald F.: *Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes*, Fire Safety Journal, Volume 44, Pages 135–146, 2009
- [Wallasch2012] Wallasch K.: *Brandschutz in Europa – Großbritannien*, Tagungsband EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz 2012
- [Wallasch2013] Wallasch K.: *Brandschutzkonzepte im europäischen Vergleich*, Tagungsband FeuerTRUTZ Brandschutzkongress 2013
- [Weilert2008] Weilert A., Hosser D.: *Vergleichenden Analyse der Brandschutzanforderungen an Sonderbauten*, Tagungsband: vfdb Jahresfachtagung 2008, S. 389-415
- [Wickström2007] Wickström U. et al: *Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures*, Swedish National Testing and Research Institute (SP), presented at the 11<sup>th</sup> Int. Interflam Conference, London, England, 3–5 Sept. 2007
- [Wickström2008] Wickström U.: *Adiabatic surface temperature and the plate thermometer for calculating heat transfer and controlling fire resistance furnaces*, presented at the 9<sup>th</sup> Int. Symposium on Fire Safety Science, Karlsruhe, 21–26 Sept. 2008
- [Wickström2009] Wickström U. et al: *Validation fire tests on using the adiabatic surface temperature for predicting heat transfer*, Fire Technology SP Report 2009:19, Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås, 2009
- [Wilk2012a] Wilk E., Kotthoff I., *Der Brand in Räumen und seine Wirkung-Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit rechnerischen Lösungen*, vfdb – Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 2/2012, Ebner Verlag, Ulm, 2012
- [Wilk2012b] Wilk E., Kotthoff I., *Der Brand in Räumen und seine Wirkung-Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren Teil 1*, vfdb – Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 4/2012, Ebner Verlag, Ulm, 2012
- [Wilk2013a] Wilk E., Kotthoff I., *Der Brand in Räumen und seine Wirkung-Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren Teil 2*, vfdb – Zeitschrift für

- Forschung, Technik und Management im Brandschutz 1/2013, Ebner Verlag, Ulm, 2013
- [Wilk2013b] Wilk E., Kotthoff I., *Der Brand in Räumen und seine Wirkung-Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren Teil 3*, vfdb – Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 3/2013, Ebner Verlag, Ulm, 2013
- [Wilk2013c] Wilk E.: *Versuchsablauf Versuch 4: Empfangstresen in einer Halle*, persönliche Mitteilung, Arbeitsstand 07.08.2013
- [Wilk2014] Wilk E., Kotthoff I., *Der Brand in Räumen und seine Wirkung-Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren Teil 4*, vfdb – Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz 1/2014, Ebner Verlag, Ulm, 2014
- [Willems2013] Willems W. et al.: *Lehrbuch der Bauphysik*, 7. Vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [Woods1946] Woods C.R.: *Fire Grading of Buildings*, Post-War Building Studies No. 20, London, 1946
- [Yii2000] Yii H.W.: *Effect of Surface Area and Thickness on Fire Loads*, Fire Engineering Research Report 2000/13, University of Canterbury, March 2000
- [Zargari2013] Zargari M.: *Optimierung von Atrien und Verbesserung der Anwendung von Planungswerkzeugen*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013
- [Zalok2009] Zalok E. et al.: *Fire loads in commercial premises*, FIRE AND MATERIALS 2009, Vol.33: pp. 63–78
- [Zalok2011] Zalok E. et al.: *Validation of Methodologies to Determine Fire Load for Use in Structural Fire Protection*, Final Report, The Fire Protection Research Foundation, Quincy May 2011
- [Zanon2010] Zanon R. et al.: *Robuste Stahlbauten bei Brandbeanspruchungen*, Stahlbau 79 (2010), Heft 8, S. 598 ff., Ernst & Sohn, Berlin, August 2010
- [Zehfuß2002] Zehfuß, J.: *Risikogerechte brandschutztechnische Bemessung mehrgeschossiger Wohn- und Bürogebäude am Beispiel der Stahlbauweise*, Bauingenieur 77 (2002), H.7/8, S.336–343



- [Zehfuß2004] Zehfuß J.: *Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung*, Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 2004
- [Zehfuß2005] Zehfuß J., Hosser D.: *Vereinfachtes Naturbrandmodell für die Brandschutzbemessung von Bauteilen und Tragwerken*, Bauphysik 27 (2005), Heft 2, S. 79–86
- [Zehfuß2007] Zehfuß J., Hosser D.: *A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings*, Fire Safety Journal, Volume 42, Pages 115–126, March 2007
- [Zhang2014a] Zhang C. et al.: *Behavior of steel components subjected to localized fire*, Tagungsband, 8<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire, Shanghai, 2014
- [Zhang2014b] Zhang C., et al.: *Behavior of Unrestrained and Restrained Bare Steel Columns Subjected to Localized Fire*, Journal of Structural Engineering, 12 Dec 2014, persönliche Mitteilung

## 7.2 Normen-, Richtlinien- und Vorschriftenverzeichnis

- [ANPI1988] ANPI, *Evaluation des risques*, Association Nationale pour la Protection contre l'Incendie, Ottignies, 1988
- [AD-B:2007] *Approved Document B, Volume 2 – Buildings other than Dwelling houses*, Edition 2006 – Fire Safety, Department for Communities and Local Government, 2007
- [BS7974:2002] *BS 7974: 2002 Published Document – Application of fire safety engineering principles to the design of buildings*, BSI, 2002
- [BS9999:2008] *BS 9999: 2008 Code of practice for fire safety in the design, management and use of residential buildings*, BSI, October 2008
- [BS ISO13387:1999] *Fire safety engineering -- Part 1-8*, BSI, 1999
- [BuildReg2010] *The Building Regulations 2010*
- [DAST-RL019:2001] *DAST-Richtlinie 019 - Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden*, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf November 2001
- [DD BS240:1997] *Fire safety engineering in buildings, Guide to the application of fire safety engineering principles*, BSI, 1997
- [DIN EN ISO 13943:2000] *Brandschutz – Vokabular*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2000-10
- [DIN18230] *Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teile 1-3*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.,
- [DIN18230-1:2010] *Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-09
- [DIN18230-2:1999] *Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 2: Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung - Werte für den Abbrandfaktor m*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 1999-01
- [DIN18230-3:2002] *Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 3: Rechenwerte* DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2002-08

- [DIN18232-2:2007] *DIN 18232-2: Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau*, November 2007
- [DIN18234:2003] *DIN 18234 (Teile -1 bis -4): Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer, Brandbeanspruchung von unten*; Normenausschuss Bauwesen im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., September 2003
- [DIN4102-1:1981] *DIN 4102-1: Brandverhalten von Bauteilen und Baustoffen; Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen - Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*, 1981
- [DIN4102-2:1977] *DIN 4102-2: Brandverhalten von Bauteilen und Baustoffen; Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen - Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*, 1977
- [DIN4102-3:1934] *DIN 4102 Blatt 3: Widerstandsfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen gegen Feuer und Wärme – Brandversuche*, Deutscher Normenausschuss (DNA), August 1934
- [DIN4102-4:1994] *DIN 4102-4: Brandverhalten von Bauteilen und Baustoffen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile – Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*, 1994
- [DIN EN13501-1:2010] *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009: 2010-01
- [DIN EN1990:2010] *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1991-1-2:2010] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1991-1-2/NA:2010] *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2:*

- Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*,  
DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1991-1-7:2010] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen*; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1993-1-2:2010] *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1993-1-2/NA:2010] *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerks-bemessung für den Brandfall*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [DIN EN1994-1-2:2010] *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*; Deutsche Fassung EN 1994-1-2:2005 + AC:2008, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Ausgabe: 2010-12
- [ENV1991-1-2:1995] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*, Vornorm, CEN, Brüssel 1995
- [IndBauRL2000] *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie – MIndBauRL) - Fassung März 2000-*
- [IS-ARGEBAU2014] *Informationssystem der Bauministerkonferenz, Mustervorschriften, Mustererlasse und zugehörige Begründungen*, <http://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=75909860991> (Stand 04.03.2014)
- [ISO834] *Norm ISO 834 (Mehrteilige Normenreihe): Feuerwiderstandsprüfungen – Bauteile*, International Organization for Standardization, Genf (Schweiz)
- [KhBauVO1976] *Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern - Krankenhausbauverordnung (KhBauVO)*, Fassung Dezember 1976

- [MBO2002] *Musterbauordnung - MBO* – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008
- [MHHR2008] *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR)*, Fassung April 2008
- [MLTB2011] *Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen* – Fassung Dezember 2011,
- [MLTB2012] *Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen* – Fassung September 2012,
- [MLTB2014] *Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen* – Fassung September 2014,
- [MVStättV2005] *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster - Versammlungsstättenverordnung - MVStättV)*, Fassung Juni 2005
- [SIA1984] *SIA Dokumentation 81 – Brandrisikobewertung Berechnungsverfahren*, Schweizerischer Ingenieur und Architekten-Verein, Zürich, 1984
- [VdS2001] *VdS 2001: Regeln für die Ausrüstung von Arbeitsstätten mit Feuerlöschern; VdS Schadenverhütung, 03/1998*
- [VKF2003a] *Begriffe/ 40-03d*, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Bern, 2003
- [VKF2003b] *Aatriumbauten/ 101-03d*, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Bern, 2003
- [VKF2007] *Bewertung Brandabschnittsgrößen 115-03d*, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Bern, 2007

### 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Visualisierte Zündenergie eines Streichholzes .....	17
Abbildung 2:	Wärmeleitung im Festkörper oder ruhendem Fluid .....	18
Abbildung 3:	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Stahl und Beton (obere Grenze) im Vergleich nach [DIN EN 1994-1-2] .....	19
Abbildung 4:	Konvektiver Wärmeübergang .....	20
Abbildung 5:	Prinzip der freien Konvektion im Brandfall .....	20
Abbildung 6:	Konvektiver Wärmeübergang am Bauteil .....	21
Abbildung 7:	Wärmestrahlung.....	22
Abbildung 8:	Wärmestrahlung (grau hinterlegt) innerhalb des elektromagnetischen Wellenspektrums, in Anlehnung an [Herwig2009] .....	23
Abbildung 9:	Absorption ( $\alpha$ ), Reflexion ( $\rho$ ) und Transmission ( $\tau$ ) am nicht-transparenten (links) und am transparenten Bauteil (rechts) nach [Homan1997].....	23
Abbildung 10:	Strahlungsanteile am Gesamtwärmestrom hnet im Brandfall für bestimmte Oberflächentemperaturen, abhängig von $\Delta\Theta$ gemäß [DIN EN 1991-1-2:2010]	25
Abbildung 11:	Wärmestrahlung korrespondieren-der Flächen .....	26
Abbildung 12:	Erläuterung zum Konfigurationsfaktor beim Strahlungsaustausch zwischen zwei infinitesimalen Flächen dA im Abstand S1-2 .....	27
Abbildung 13:	Normative Temperaturzeitkurve (ETK) und Naturbrandszenario (lokaler Brand) im Vergleich.....	29
Abbildung 14:	Brandphasen eines ungelöschten Naturbrandes gemäß [Schneider1995] .....	29
Abbildung 15:	Ein-Zonenbetrachtung bei einem Vollbrand mit einheitlicher Temperatur.....	30
Abbildung 16:	Qualitative Einteilung der Zonen bei einem Naturbrand: Kaltgasschicht (I), Heißgasschicht (II) und Plumbereich (III) nach [Schneider2007] .....	31
Abbildung 17:	Die drei Zonen eines Auftriebplumes nach [Karlsson2000].....	32
Abbildung 18:	Schematische Darstellung eines Plumes mit virtuellem Ursprung der Punktquelle nach [Schneider2008] .....	35
Abbildung 19:	Versuchsaufbau einer Stütze mit flüssiger Brandlast aus [Sjöström2013].....	36
Abbildung 20:	Auszug aus einem Versuchsbericht von [Wilk2013c] .....	42
Abbildung 21:	Qualitative Gegenüberstellung von verschiedenen Methoden der Bauteilbemessung im Brandfall nach [Cajot2005] .....	46
Abbildung 22:	Stahlstützen in den Atrien von <i>Skygarden</i> (links, © CA Immobilien) und der <i>HDI-Zentrale</i> (rechts, © Esch) mit freundlichen Genehmigungen der Rechteinhaber .....	49
Abbildung 23:	Entwurfsgrundsätze zum gezielten Einsatz von Atrien zur Verbesserung der Tageslichtverhältnisse bei bestimmten Grundrissen nach [Hung2003].....	50

Abbildung 24: Überdachtes Atrium mit und ohne Brandabschnittsbildung in den Geschossen sowie ein oben offenes Atrium aus [VKF2003b] .....	51
Abbildung 25: Verschiedene Ausbildungen eines Atriums nach [Bastings1988] .....	51
Abbildung 26: Denkbare Stützenpositionen und qualitative Stützenlängen in Atrien und Foyers in Anlehnung an [Bastings1988] .....	53
Abbildung 27: Alternative bauteilbezogene Positionen der maßgebenden thermischen Einwirkung in Abhängigkeit des Brandszenarios .....	54
Abbildung 28: Synopse über statische Systeme und die Lage der maßgebenden mechanischen sowie thermischen Beanspruchungen infolge eines lokalen Brands .....	55
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Stützensystems von ein- und mehrgeschossigen Foyers .....	56
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Stützensystems eines eingeschossigen Atriums	57
Abbildung 31: Größenverteilung der Grundflächen von Foyers .....	71
Abbildung 32: Höhenverteilung in Atrien und Foyers .....	72
Abbildung 33: Baustoffverteilung des oberen Abschlusses von Foyers .....	74
Abbildung 34: Baustoffverteilung der inneren Umfassungsbauteile von Foyers .....	74
Abbildung 35: Baustoffverteilung der äußeren Umfassungsbauteile von Foyers .....	75
Abbildung 36: Verteilung der Öffnungsflächen im oberen Abschluss von Foyers .....	76
Abbildung 37: Verteilung der Fassadenöffnungsflächen von Foyers .....	77
Abbildung 38: Verteilung der zur Anwendung kommenden Baustoffe von Foyerstützen .....	78
Abbildung 39: Verteilung der Nachweismethoden des Feuerwiderstandes von Foyerstützen	79
Abbildung 40: Verteilung der Nachweisstufen rechnerischer Brandschutznachweise .....	79
Abbildung 41: Verteilung der Rechenansätze zur Ermittlung der thermischen Einwirkungen.	80
Abbildung 42: Häufigkeit von Abweichungen und Kompensationen beim Feuerwiderstand ..	81
Abbildung 43: Verteilung der auftretenden Brandlastdichten [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] .....	82
Abbildung 44: Verteilung der Brandlasten in Foyers: Flächig oder lokal konzentriert .....	83
Abbildung 45: Vorhandene brandschutztechnische Infrastruktur in Atrien und Foyers .....	84
Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Antworten und Stichprobengröße .....	86
Abbildung 47: Zusammenhang zwischen der Brandentstehungswahrscheinlichkeit und den Bemessungswerten von Brandlastdichte ( $q$ ) und Wärmefreisetzungsrate (RHR) gemäß Sicherheitskonzept von [DIN EN 1991-1-2/ NA] .....	90
Abbildung 48: Bauliche Situation als Grundlage für das Zonenmodell .....	96
Abbildung 49: Temperatur-Zeitverläufe einzelner Höhenknoten entlang der Centerline infolge des lokalen Brandes nach Heskestad gemäß [DIN EN 1991-1-2:2010] .....	98
Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate infolge des lokalen Brandes .....	99
Abbildung 51: Identische Temperaturverläufe entlang der Plume-Centerline auf Höhe $z = 0,5$ m gemäß Heskestad und dem H-D-Modell .....	100
Abbildung 52: Temperaturverläufe aus der Centerline ( $r = 0$ ) und im radialen Abstand von $r = 0,5$ m, hier jeweils in $0,5$ m Höhe .....	101

Abbildung 53: Temperaturverläufe nach dem H-D-Modell in radialen 0,5 m-Abständen gestaffelt zur Brandquelle, jeweils in 0,5 m Höhe zum Vergleich.....	102
Abbildung 54: Wärmefreisetzungsrate des lokalen Brandes in <i>FDS</i> [kW] .....	103
Abbildung 55: Netzdiskretisierung des Brandraumes, hier Grundriss mit einzelnen Messstellen .....	104
Abbildung 56: Brandraum mit Öffnungen und Netzdiskretisierung, hier 3-D-Ansicht der AST-Messstellen an den Stützelementen .....	105
Abbildung 57: Darstellung des Brandes zum Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzung beim horizontalen Plateau zur 15. Minute (900 Sekunden) .....	105
Abbildung 58: Centerline-Temperaturen auf $z = 1,5$ m gemäß <i>FDS</i> .....	106
Abbildung 59: Vergleich einzelner Centerline-Temperaturverläufe unterhalb 1,50 m gemäß dem H-D-Modell und <i>FDS</i> .....	106
Abbildung 60: Vergleich einzelner Temperaturverläufe auf Höhe $z = 0,5$ m in verschiedenen radialen Abständen zur Centerline ( $r = 0 - 1,5$ m), gemäß H-D-Modell und <i>FDS</i> .....	107
Abbildung 61: Vergleich einzelner Temperaturverläufe auf Höhe $z = 0,5$ m in verschiedenen radialen Abständen zur Centerline ( $r = 1,5 - 4,5$ m) gemäß H-D-Modell und <i>FDS</i> .....	108
Abbildung 62: Thermische Dehnung von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur gemäß [DIN EN1993-1-2].....	110
Abbildung 63: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhter Temperatur nach [DIN EN1993-1-2].....	110
Abbildung 64: Thermische Zwangsnormalkraft bei unendlicher Dehnungsbehinderung in Abhängigkeit von der Temperatur nach Formel (4-20).....	111
Abbildung 65: Grenzfälle vertikaler Verschieblichkeit und korrespondierende thermische Zwangskräfte .....	112
Abbildung 66: Geschoss bei einem Vollbrand.....	112
Abbildung 67: Geschoss bei einem lokalen Brand .....	113
Abbildung 68: Geschoss eines aufgehenden Gebäudes bei einem lokalen Brand .....	113
Abbildung 69: Einfluss von direkt anschließenden Bauteilen auf die Ausbildung thermischer Zwangskräfte, Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235).....	114
Abbildung 70: Einfluss einer nachgiebigen Lagerung auf die Ausbildung der thermischen Zwangskraft, Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235), Riegel: $h = 25$ cm (C25/30) .....	114
Abbildung 71: Einfluss einer erhöhten Steifigkeit auf die Ausbildung der thermischen Zwangskraft in der Stütze: RO 323,9 x 4,0 (S235), Riegel: $h = 25$ cm (C25/30).....	115
Abbildung 72: <i>SAFIR</i> -Ersatzsystem (5 m), Riegel $b/h = 100/50$ [cm] (C30/37, kalt), Stiel RO 406,4 x 45 (S235).....	116
Abbildung 73: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 406,4 x 45 gemäß <i>SAFIR</i> infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K.....	117



Abbildung 74: SAFIR-Ersatzsystem (8,4 m): Riegel b/h = 100/46,9 [cm] (C30/37, kalt), Stiel RO406,4 x 45 (S235) .....	118
Abbildung 75: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 406,4 x 45 gemäß SAFIR infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K.....	118
Abbildung 76: SAFIR-Ersatzsystem (12 m): Riegel IPE 450 (S235, kalt), Stiel RO 323,9 x 5,0 (S235).....	119
Abbildung 77: Thermische Zwangskraft in der Stütze RO 323,9 x 5,0 gemäß SAFIR infolge der Dehnungsbehinderung über den lokalen Brandverlauf gemäß Anhang K.....	119
Abbildung 78: Knotenpunkt Stütze-Decke (Stb.-Skelettbau) .....	123
Abbildung 79: Knotenpunkt Stütze-Decke (Stahlskelettbau).....	123
Abbildung 80: Knotenpunkt Stahl-stütze-Betondecke.....	123
Abbildung 81: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 1).....	125
Abbildung 82: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	126
Abbildung 83: Kat. 1, HD 400 x 463: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	127
Abbildung 84: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	127
Abbildung 85: Kat. 1, HD 400 x 463: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	128
Abbildung 86: Kat. 1, RO 406,4 x 45: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	128
Abbildung 87: HD 400 x 463: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	129
Abbildung 88: Umgebungstemperatur-profil der einzelnen Stützenabschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes .....	129
Abbildung 89: Gegenüberstellung der Knotenverschiebungen am Ersatzsystem der 5 m-Stütze unter lokalem Brand und unter der ETK.....	130
Abbildung 90: Temperaturverteilung über den Stahlquerschnitt RO 406,4 x 45 des untersten Stützenabschnittes ( $z = 0,5$ m) zum Zeitpunkt $t = 1560$ s des lokalen Brandes .....	131
Abbildung 91: Knotentemperaturen eines Innen- und Außenknoten des untersten Stützen- abschnittes (RO 406,4 x 45) im Brandverlauf des lokalen Brandes mit SAFIR	131
Abbildung 92: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 2).....	132
Abbildung 93: Kat. 2, RO 406,4 x 45 mm: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	133
Abbildung 94: Kat. 2, HD 400 x 551: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	133

Abbildung 95: Kat. 2, RO 406,4 x 45 mm: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	134
Abbildung 96: Kat. 2, HD 400 x 551: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	134
Abbildung 97: Kat. 2, RO 406,4 x 45: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	135
Abbildung 98: Kat. 2, HD 400 x 551: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	135
Abbildung 99: Umgebungstemperatur-profil der einzelnen Stützenabschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes .....	136
Abbildung 100: Gegenüberstellung der Knotenverschiebungen am Ersatzsystem der 8,40 m-Stütze unter lokalem Brand (Centerline) und unter der ETK .....	137
Abbildung 101: Untersuchte Stützenlänge (Kat. 3).....	137
Abbildung 102: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	138
Abbildung 103: Kat. 3, HE 300-A: Bauteil- und Flammentemperatur in 0,5 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	139
Abbildung 104: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	139
Abbildung 105: Kat. 3, HE 300-A: Bauteil- und Flammentemperatur in 1,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	140
Abbildung 106: Nachweis des ungeschützten Rohrprofils (RO 323,9 x 5,0) mit der Plumetemperatur in 3,0 m Höhe gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	141
Abbildung 107: RO 323,9 x 5,0 und HE 300-A: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	141
Abbildung 108: Kat. 3, RO 323,9 x 5: Alternatives Brandszenario H-D-Modell mit $r = 1,0$ m/ $z = 0,5$ m eingelesen in <i>Elefir-EN</i> .....	142
Abbildung 109: Kat. 3, Brandschutzbedingt vergrößerte Querschnitte, H-D-Modell mit $r = 0,5$ m/ $z = 0,5$ m gemäß <i>Elefir-EN</i> .....	142
Abbildung 110: Umgebungstemperaturprofil der einzelnen Stützen-abschnitte zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur infolge des lokalen Brandes .....	143
Abbildung 111: Verformungsfigur am Ersatzsystem der Atriumstütze (RO 323,9 x 5,0) infolge des lokalen Brandes zum Versagenszeitpunkt mit <i>SAFIR</i> .....	144
Abbildung 112: Temperaturverteilung über den Querschnitt RO 323,9 x 5,0 im untersten Stützenabschnitt zum Versagenszeitpunkt infolge des lokalen Brands mit <i>SAFIR</i> .....	145
Abbildung 113: Bauteilerwärmung des unteren Stützenabschnittes infolge des lokalen Brands gemäß <i>SAFIR</i> .....	145
Abbildung 114: Bauteilerwärmung des Stützenabschnittes infolge der ETK gemäß <i>SAFIR</i> .....	146

Abbildung 115: Unterschiedliche Längen der Vollbrandphasen bei gleicher Brandfläche (9 m <sup>2</sup> ) und gleicher RHR (250 kW/m <sup>2</sup> ) in Abhängigkeit von der Brandlastdichte.....	150
Abbildung 116: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zellgröße bei h = 0 m nach [Stock2010] mit Eintragungen aus eigenen Vergleichsrechnungen.....	154
Abbildung 117: Temperatur-Zeitverhalten einzelner Messwerte an den jeweiligen Messstellen im Bereich der Brandlast „Empfangstresen“ nach [Wilk2013c].....	156
Abbildung 118: 20. Prüfminute (links) und 32. Prüfminute (rechts) des Brandversuchs aus [Wilk2013c].....	156
Abbildung 119: Bauteiltemperaturen (RO 323,9 x 5,0) im untersten Stützenabschnitt (mittig der unteren 50 cm) in Abhängigkeit von der Lage der Stütze zur Flammenachse .....	158
Abbildung 120: Gegenüberstellung von Brandraumtemperaturen im direkten Vergleich zur ETK sowie korrespondierende Bauteiltemperaturen ermittelt mit SAFIR .....	160
Abbildung 121: Gegenüberstellung der rechnerisch möglichen thermischen Zwangskraft infolge des lokalen Brandes und der sich unter Auflast einstellenden Zwangskraft in Abhängigkeit des Bauteilabstandes zur Plume-Centerline gemäß Tabelle 15	163
Abbildung 122: Brandphasen eines ungelöschten Naturbrandes gemäß [Kordina1981] .....	213
Abbildung 123: Wärmefreisetzung des lokalen Brandes nach Heskestad aus [DIN EN 1991-1-2] .....	244
Abbildung 124: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit <b>r = 0,5 m</b> .....	246
Abbildung 125: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit <b>r = 1,0 m</b> .....	247
Abbildung 126: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit <b>r = 1,5 m</b> .....	247
Abbildung 127: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit <b>r = 2,0 m</b> .....	248
Abbildung 128: Temperaturverläufe, gestaffelt in horizontalen 0,5 m-Abständen zur Brandquelle jeweils in 1 m Höhe, gegenübergestellt.....	248
Abbildung 129: Übersicht der Brandraumgeometrie mit Koordinatenursprung u. Zellenraster .....	249
Abbildung 130: 3-D Screenshot zur maximalen Wärmefreisetzung, 15. Minute (900 Sekunden) .....	250
Abbildung 131: Positionen der Messstellen der einzelnen Rechengänge .....	250
Abbildung 132: AST x = 6,5 m; y = 6,5 m (Centerline).....	251
Abbildung 133: AST x = 7,0 m; y = 6,5 m (0,5 m horizontaler Abstand).....	251
Abbildung 134: AST x = 5,5 m; y = 6,5 m (1,0 m horizontaler Abstand).....	252
Abbildung 135: AST x = 5,0 m; y = 6,5 m (1,5 m horizontaler Abstand).....	252
Abbildung 136: AST x = 6,5 m; y = 4,5 m (2,0 m horizontaler Abstand).....	253
Abbildung 137: AST x = 4,0 m; y = 6,5 m (2,5 m horizontaler Abstand).....	253
Abbildung 138: AST x = 6,5 m; y = 3,0 m (3,5 m horizontaler Abstand).....	254
Abbildung 139: AST x = 2,0 m; y = 6,5 m (4,5 m horizontaler Abstand).....	254

---

Abbildung 140: Die äußeren Temperaturgradienten infolge des lokalen Brandes für die Stützen der Foyer-Kategorien 1, 2 und 3.....	266
Abbildung 141: Querschnitt der Kategorie 1 und 2 zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur (kein Versagen im Brandfall) .....	267
Abbildung 142: Temperaturprofil des untersuchten Querschnitts der Kategorie 3 zum Versagenszeitpunkt .....	267
Abbildung 143: Temperatur-Zeitverläufe von einwirkenden und Bauteiltemperaturen im unteren Stützenabschnitt (RO 323,9 x 5,0; Kat. 3) im Vergleich zur ETK .....	268
Abbildung 144: Temperatur-Zeitverläufe von einwirkenden und Bauteiltemperaturen im unteren Stützenabschnitt (RO 406,4 x 45; Kat. 1 + 2) im Vergleich zur ETK ...	268
Abbildung 145: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 5,0 m, RO 406,4 x 45) infolge lok. Brand (Centerline) .....	269
Abbildung 146: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 5,0 m, RO 406,4 x 45) infolge der ETK .....	269
Abbildung 147: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 8,4 m, RO 406,4 x 45) infolge lok. Brand (Centerline) .....	269
Abbildung 148: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 8,4 m, RO 406,4 x 45) infolge der ETK .....	270
Abbildung 149: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 12 m, RO 323,9 x 5,0) infolge lok. Brand (Centerline) .....	270
Abbildung 150: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 12 m, RO 323,9 x 5,0) infolge der ETK .....	270

## 7.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nutzungsbedingte Brandlastdichten in MJ/m <sup>2</sup> gemäß [DIN EN 1991-1-2/NA] .....	59
Tabelle 2: Veröffentlichungen zu Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies und Eingangshallen (1967-1976).....	60
Tabelle 3: Fortsetzung der Veröffentlichungen zu Brandlasten in Atrien, Foyers, Lobbies und Eingangshallen (1997-2013).....	61
Tabelle 4: Auftretenswahrscheinlichkeit p <sub>1</sub> von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr, abhängig von der Nutzung [DIN EN1991-1-2/NA:2010]	63
Tabelle 5: Auszug der beispielhaften Zuordnung von Betriebsbereichen zur Brandgefährdung gemäß [VDS2001:1998].....	64
Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Stützenprofile in Abhängigkeit von der Foyerkategorie und der gewählten Rechenebene im Brandfall.....	94
Tabelle 7: Ergebnisse zum Zeitpunkt der maximalen Brandraumtemperaturen infolge unterschiedlicher Brandlasten und Raumhöhen, ermittelt mit OZone .....	97
Tabelle 8: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung).....	126
Tabelle 9: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 1) .....	130
Tabelle 10: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung) .....	132
Tabelle 11: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 2) .....	136
Tabelle 12: Ergebnisse der Stützenbemessung bei Raumtemperatur (Vorbemessung) .....	138
Tabelle 13: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des jeweiligen Brandszenarios (Kategorie 3) .....	144
Tabelle 14: Versagenszeiten im Brandfall nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren in Abhängigkeit des Brandszenarios (Kategorie 3) .....	147
Tabelle 15: Positions- und lastabhängige thermische Zwangskräfte am Ersatzsystem der Kategorie 3 infolge des lokalen Brandes .....	148
Tabelle 16: Brandtemperaturen nach 10 Minuten eines lokalen Brandversuches nach [Sjöström2013].....	152
Tabelle 17: Bauteilerwärmung in Abhängigkeit des Profilkfaktors.....	159
Tabelle 18: Thermische Zwangskräfte F <sub>therm</sub> [kN] von verschiedenen Foyerstützen in Abhängigkeit des Brandszenarios, berechnet am unbeanspruchten System mit SAFIR.....	162
Tabelle 19: Materialgewicht der einzelnen Querschnitte bezogen auf die Gesamtlänge .....	164
Tabelle 20: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit $\phi = 1$ , hier für die Oberflächentemperatur $\Theta_m = 100 \text{ °C}$ .....	217

---

Tabelle 21: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit $\phi = 1$ , hier für die Oberflächentemperaturen $\Theta_m = 200 \text{ °C}$ bis $400 \text{ °C}$ .....	218
Tabelle 22: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit $\phi = 1$ , hier für die Oberflächentemperaturen $\Theta_m = 500 \text{ °C}$ bis $800 \text{ °C}$ .....	219
Tabelle 23: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit $\phi = 1$ , hier für die Oberflächentemperaturen $\Theta_m = 900 \text{ °C}$ bis $1000 \text{ °C}$ .....	220
Tabelle 24: Umrechnung der verschiedenen Einheiten von Brandlasten.....	233
Tabelle 25: Maximale Brandraumtemperaturen je Höhenabschnitt einer Stütze .....	245

## 7.5 Bezeichnungen

### Abkürzungen

AST	Adiabatic Surface Temperature – adiabatische Oberflächentemperatur
BTU	British Thermal Unit (Einheit)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
CFD	Computational Fluid Dynamics (CFD) – numerische Strömungsmechanik
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm, DIN EN: Deutsche Übernahme einer europäischen Norm
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
Gk	Gebäudeklasse
MBO	Musterbauordnung
NA	Nationaler Anhang
NIST	National Institute of Standards and Technology
NFSC	Natural Fire Safety Concept
psf	pounds per square foot (Einheit)
SIF	Structures in Fire



Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Flammensymbol entspricht dem Gefahrensymbol „Flamme“ zur Gefahrenkennzeichnung von Stoffen in Abhängigkeit der Entzündbarkeit je nach ihrem Flammpunkt und stammt aus dem Anhang II der EG-Richtlinie 67/548/EWG.

### Lateinische Bezeichnungen

A	Fläche des Brandabschnittes
$A_f$	Bodenfläche
$A_h$	Fläche der horizontalen Öffnungen im Dach eines Brandabschnittes
$A_m$	Bauteiloberfläche bezogen auf die Einheitslänge
$A_m / V$	Profilmfaktor des ungeschützten Stahlbauteils
$A_v$	gesamte Fläche der vertikalen Öffnungen in allen Wänden
D	Tiefe des Brandabschnittes, Durchmesser des Brandes
$E_a$	Elastizitätsmodul bei Normaltemperatur
$E_{a,\theta}$	Steigung im linear-elastischen Bereich von Stahl unter erhöhter Temperatur $\theta_a$
$E_d$	Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung aus der Grundkombination nach EN 1990

---

$E_{d,fi}$	zeitlich unabhängiger Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall
$G_k$	charakteristische Wert einer ständigen Einwirkung
$H$	Abstand zwischen Brandherd und Decke
$H_u$	Netto-Heizwert unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit
$H_{u0}$	Netto-Heizwert des trockenen Materials
$L$	Systemhöhe des betrachteten Stockwerkes
$L_f$	mittlere Flammenhöhe
$M_{k,i}$	Menge des brennbare Materials $i$
$N_{Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts $N_{pl,Rd}$ bei Berechnung für Normaltemperatur nach EN 1993-1-1
$N_{Rd,fi,t}$	Knickfestigkeit druckbeanspruchter Bauteile zum Zeitpunkt $t$
$O$	Öffnungsfaktor des Brandabschnitts
$Q$	Wärmefreisetzungsrate des Brandes
$Q_c$	konvektiver Anteil der Wärmefreisetzungsrate $Q$
$Q_{fi,k}$	charakteristische Brandlast
$Q_k$	veränderliche Einwirkung
$Q_{k,1}$	größte veränderliche Einwirkung
$Q_{max}$	maximale Wärmefreisetzungsrate
$R_d$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Bauteils unter normalen Temperaturen
$R_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Stahlbauteils im Brandfall zum Zeitpunkt $t$
$R_{fi,d,0}$	Wert von $R_{fi,d,t}$ zum Zeitpunkt $t = 0$
$RHR_f$	maximale Wärmefreisetzungsrate bezogen auf $1 \text{ m}^2$
$T$	die Temperatur
$T_g$	Gastemperatur
$T_z$	Temperatur der Flamme entlang der Flammenachse
$V$	Volumen des Bauteils bezogen auf die Einheitslänge
$c$	spezifische Wärmekapazität
$c_a$	spezifische Wärmekapazität von Stahl
$f_{p,\theta}$	Proportionalitätsgrenze von Stahl bei erhöhter Temperatur $\theta_a$
$f_{u,\theta}$	Bruchfestigkeit unter erhöhter Temperatur und bei Berücksichtigung der Verfestigung
$f_y$	Fließgrenze bei $20 \text{ °C}$
$f_{y,\theta}$	effektive Fließgrenze von Stahl bei erhöhter Temperatur $\theta_a$
$g$	Erdbeschleunigung



$\dot{h}_{\text{net}}$	Netto-Wärmestrom
$\dot{h}_{\text{net,c}}$	konvektiver Wärmestrom
$\dot{h}_{\text{net,d}}$	Bemessungswert des Netto-Wärmestroms bezogen auf die Fläche
$\dot{h}_{\text{net,r}}$	strahlungsabhängiger Wärmestrom
$k_{E,\theta}$	Abminderungsfaktor für die Steigung im linear elastischen Bereich bei der Stahltemperatur $\theta_a$ zum Zeitpunkt $t$
$k_{\text{sh}}$	Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
$k_{y,\theta}$	Abminderungsfaktor der Fließspannung von Stahl bei der Temperatur $\theta_a$ zum Zeitpunkt $t$
$k_{y,\theta,\text{max}}$	Abminderungsfaktor für die Fließgrenze von Stahl unter der maximal auftretenden Stahltemperatur $\theta_{a,\text{max}}$ zum Zeitpunkt $t$
$l$	Länge bei 20 °C oder Abstand einer Flamme von einer Öffnung, entlang der Flammenachse gemessen
$l_{\text{fi}}$	Knicklänge einer Stütze bei einer Bemessung im Brandfall
$m$	Massen, Abbrandfaktor
$q_{\text{f,d}}$	Bemessungsbrandlastdichte bezogen auf die Bodenfläche $A_{\text{f}}$
$q_{\text{f,k}}$	charakteristische Brandlastdichte bezogen auf die Bodenfläche $A_{\text{f}}$
$r$	horizontaler Abstand zwischen der vertikalen Feuerachse und dem Ort, an dem der Wärmestrom berechnet wird
$t$	Zeit, Dauer der Brandbeanspruchung
$y$	Koeffizientenparameter
$z$	Höhe
$z_0$	gedachter Ursprung der Höhe $z$

### Griechische Bezeichnungen

$\Delta t$	Zeitintervall
$\Delta l$	Ausdehnung infolge Temperatur
$\Delta\theta_{\text{g,t}}$	Anstieg der Umgebungstemperatur während des Zeitintervalls $\Delta t$
$\phi$	Konfigurationsfaktor
$\phi_z$	Gesamtkonfigurationsfaktor für die Berechnung der Wärmestrahlung einer Flamme
$\alpha_c$	konvektive Wärmeübergangskoeffizient
$\gamma_{\text{G}}$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
$\gamma_{\text{M2}}$	Teilsicherheitsbeiwert bei Normaltemperatur (Verbindungen)
$\gamma_{\text{M,fi}}$	Teilsicherheitsbeiwert unter Brandbedingungen für die entsprechende Materialeigenschaft

---

$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert für die veränderliche Einwirkung 1
$\delta_{ni}$	Faktor zur Berücksichtigung einer bestimmten Brandbekämpfungsmaßnahme
$\delta_{q1}$	Faktor zur Berücksichtigung der Brandentstehungsgefahr durch die Größe des Brandabschnittes
$\delta_{q2}$	Faktor zur Berücksichtigung der Brandentstehungsgefahr durch die Art der Nutzung
$\epsilon_f$	Emissionswert einer Öffnung
$\epsilon_z$	Emissionswert der Flamme
$\epsilon_m$	Emissivität der Oberfläche eines Bauteils
$\epsilon_{z,m}$	Gesamtemissionswert der Flammen auf der Seite m eines Bauteils
$\epsilon_{z,n}$	Gesamtemissionswert der Flammen auf der Seite n eines Bauteils
$\eta_{fi}$	Abminderungsfaktor
$\theta$	Temperatur
$\theta_a$	Stahltemperatur
$\theta_{a,cr}$	kritische Stahltemperatur
$\theta_g$	Gastemperatur im Brandabschnitt oder in der Nähe des Bauteils
$\theta_{g,t}$	Temperatur der umgebenden Brandgase zum Zeitpunkt t
$\theta_m$	Temperatur der Bauteiloberfläche
$\theta_{max}$	maximale Temperatur
$\theta_r$	effektive Strahlungstemperatur des Brandes
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_p$	Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzsystems
$\mu_0$	Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt t
$\sigma$	Stephan-Boltzmann-Konstante [ $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ]
$\chi_{fi}$	Abminderungsfaktor für Biegeknicken im Brandfall
$\rho_a$	Rohdichte von Stahl
$\psi_i$	geschützter Brandlastfaktor
$\psi_0$	Kombinationsfaktor für den charakteristischen Wert einer veränderlichen Einwirkung
$\psi_1$	Kombinationsfaktor für den häufigen Wert einer veränderlichen Einwirkung
$\psi_2$	Kombinationsfaktor für den quasi-ständigen Wert einer veränderlichen Einwirkung
$\psi_{fi}$	Kombinationsbeiwert für häufige Einwirkungen
$\chi$	Verbrennungseffektivität

## Persönliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Titel „*Tragverhalten stählerner Atriumstützen unter lokaler Brandbeanspruchung*“ selbstständig verfasst und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel benutzt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen. Weiterhin versichere ich, dass ich diesen Promotionsantrag erstmalig einreiche und keine früheren Versuche einer Promotion unternommen habe.

Hannover, 18. Oktober 2015

Philip C. Cohrs

## Lebenslauf

Name: Philip Christopher Cohrs  
Geburtsdatum: 28.12.1976  
Geburtsort: Hannover  
Nationalität: Deutsch  
Familienstand: Verheiratet, 2 Kinder



### Ausbildung

1983-1987 Stadtschule Rotenburg  
1987-1989 Orientierungsstufe Rotenburg  
1989-1996 Ratsgymnasium Rotenburg  
1996 Abitur  
1997-2004 Universität Hannover  
2004 Diplom Bauingenieurwesen  
2006-2009 EIPOS an der TU Dresden e.V.  
2009 Master of Engineering – Vorbeugender Brandschutz  
2009 geprüfter Sachverständiger für vorbeugenden Brandschutz

### Tätigkeiten

1996-1997 Grundwehrdienst in Schwanewede  
1997 Praktikum bei Fa. Höhns Bau GmbH & Co. KG  
2004 Mitarbeiter der KTC Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG  
2004-2012 Mitarbeiter bei Weber Poll – Ingenieurbüro für Bauwesen  
seit 2012 Mitarbeiter der KTC Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG

## Anhang

Anhang A	Brandkenngrößen	210
Anhang B	Phasen eines Schadenfeuers (Naturbrand)	213
Anhang C	Zünd- und Brandtemperaturen von Brennstoffen und Zündquellen	215
Anhang D	Wärmestromanteile aus Strahlung und Konvektion	217
Anhang E	Sicherheitskonzepte in der Literatur (Überblick)	221
Anhang F	Atrien, Foyers und Eingangshallen im Bauordnungsrecht	222
Anhang G	Brandlasten im Bauwesen – Erhebungen, Quellen und Veröffentlichungen	227
Anhang H	Fragebogen der Expertenbefragung	234
Anhang I	Lastzusammenstellung	238
Anhang J	Brandlastermittlung	241
Anhang K	Lokaler Brand nach Heskestad gemäß	244
Anhang L	Lokaler Brand mit dem H-D-Modell	246
Anhang M	Lokaler Brand mit FDS	249
Anhang N	Steifigkeitsverhältnisse von Riegel-Stiel-Anschlüssen im Atrium und Foyer	255
Anhang O	Stützenbemessung bei Raumtemperatur	256
Anhang P	Stützenbemessung im Brandfall nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren (Level 2)	258
Anhang Q	Stützenbemessung im Brandfall nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren (Level 3)	266

## Anhang A

## Brandkenngrößen

gemäß [Pasch1994], [Knetsch2006] und [Hosser2013]

- Verbrennung: Exotherme, schnell ablaufende, vollständige oder unvollständige Oxidation von Pyrolyseprodukten, die von einer Wärmefreisetzung und Lichtstrahlung begleitet wird.
- Enthalpie: Die Enthalpie  $H$  [J] ist ein Maß für die Energie eines thermodynamischen Systems (Wärmeinhalt), wobei das  $H$  vom englischen *heat content* abgeleitet ist.
- Brandlast: Wärmemenge  $Q$  [kJ], die bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Stoffe und Oberflächen in einem Raum freigesetzt werden kann.
- Brandlastdichte: Brandlast  $q$  [kJ/m<sup>2</sup>], bezogen auf die jeweils anzusetzende Bezugsfläche als Rechenwert für die im Brandfall freigesetzte Wärmemenge.
- Brennwert: Der Brennwert  $H_s$  bzw.  $H_o$  (frühere Bezeichnung: Oberer Heizwert) ist ein Maß für die spezifische thermische Energie je Bemessungseinheit [kJ/kg] bzw. [kWh/kg], inkl. des Wassergehaltes. Der Brennwert unterscheidet sich zum Heizwert nur um den Anteil der Kondensationsenthalpie.
- Heizwert: Der Heizwert  $H_i$  bzw.  $H_u$  (frühere Bezeichnung: Unterer Heizwert) ist ein Maß für die spezifische thermische Energie je Bemessungseinheit [kJ/kg] bzw. [kWh/kg], ohne Wassergehalt. Er entspricht der Verbrennungswärme bei vollständiger Verbrennung und beschreibt über die flächenspezifische Abbrandrate vorrangig die Wärmefreisetzungsrate [Hosser2013]. Da bei Verbrennungen die Verdampfungstemperatur von Wasser überschritten wird, was im Brandfall immer der Fall ist, sinkt der Heizwert um den Betrag der

---

	Verdampfungswärme jener Wassermenge, die in einem Kilo des Brennstoffes enthalten ist [Geilinger1950]. Der Heizwert unterscheidet sich zum Brennwert folglich nur um den Anteil der Kondensationsenthalpie.
Effektiver Heizwert:	Der effektive Heizwert $H_{eff}$ [kJ/kg] ist das Produkt aus Heizwert $H_i$ und Verbrennungseffektivität $\chi$ .
Flammentemperatur:	Die jeweilige Temperatur [°C] der heißen Reaktionszone, die sich unter realen Bedingungen der Verbrennung von Gasen und Dämpfen einstellt.
Plume:	Oberhalb eines Brandherds aufsteigender Rauchgas- und Wärmestrom
Wärmestrom:	Der Wärmestrom $\dot{Q}$ [kW] ist eine freigesetzte Wärmemenge je Zeiteinheit.
Wärmestromdichte:	Die Wärmestromdichte $\dot{q}$ [kW/m <sup>2</sup> ] ist eine Wärmemenge, die pro Flächeneinheit in der Zeiteinheit freigesetzt wird.
Wärmefreisetzung:	Wärmemenge $\dot{Q}$ [kW], die bei der Verbrennung eines Materials pro Zeiteinheit frei wird. Wichtig ist die Unterscheidung zwischen konvektivem Strömungsanteil und Strahlungsanteil.
Wärmefreisetzungsrate: (flächenspezifisch)	Die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate $\dot{q}$ [kW/m <sup>2</sup> ] ist die auf die Brandfläche bezogene Brandleistung gemäß [DIN18230-3:2002].
Brandleistung:	Die Brandleistung $\dot{Q}$ [kW] ist ein Synonym für Wärmefreisetzungsrate.
Verbrennungseffektivität:	Die Verbrennungseffektivität $\chi$ [-] ist das Verhältnis von im Brand freigesetzter Wärme zur maximal möglichen Wärme resultierend aus dem Heizwert $H_i$ und der Pyrolyserate. Sie berücksichtigt die in der Regel unvollständige Verbrennung. Beispielsweise darf für feste Brandlasten pauschal $\chi = 0,8$ angenommen werden.

Abbrandfaktor	Der Abbrandfaktor $m$ ist ein dimensionsloser Beiwert aus der Normenreihe [DIN 18230], mit dem die Brandlast $Q$ zur Berücksichtigung des Brandverhaltens der brennbaren Stoffe in der jeweiligen Art, Form, Feuchte und Verteilung bzw. Lagerungsdichte bewertet wird.
Kombinationsbeiwert:	Der Kombinationsbeiwert $\psi_i$ ist ein dimensionsloser Beiwert, der das Brandverhalten geschützter Stoffe berücksichtigt, wie beispielsweise nichtbrennbare Einhausungen in Industriebetrieben.
Pyrolyserate:	Die Pyrolyserate [kg/s] beschreibt je Zeiteinheit die vom Brandgut freigesetzten Pyrolyseprodukte (thermische Zersetzungsprodukte). Sie entspricht bei brandlastgesteuerten Bränden der Abbrandrate.
Abbrandrate	Die Abbrandrate $\dot{m}$ [kg/s] entspricht der verbrannten Masse der Brandlast je Zeiteinheit. Die Abbrandrate steht über den effektiven Heizwert mit der Wärmefreisetzungsrate im Kontext: $\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_{eff}$ . Bei brandlastgesteuerten Bränden entspricht sie der Pyrolyserate.
brandlastgesteuert:	Es steht ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung. Der limitierende Faktor ist die Brandlast. Die Brandleistung wird nur durch die Abbrandrate und die Verbrennungseffektivität bestimmt.
ventilationsgesteuert:	Brandentwicklung bei einem Sauerstoffangebot, das für eine vollständige Verbrennung innerhalb des Brandraumes nicht ausreicht. Synonym für einen unterventilierter Brand.



## Anhang B Phasen eines Schadenfeuers (Naturbrand)

gemäß [Knetsch2006]

Ein ungelöschter Naturbrand unterscheidet sich im Ablauf signifikant von Bränden entsprechend der Normbrandkurven, denen eine unbegrenzte Brandlast zugrunde liegt. Zur qualitativen Darstellung dieses Phänomens bzw. der einzelnen Brandphasen eines Raumbrandes sind in der Literatur viele ähnliche Grafiken zu entnehmen, die im Wesentlichen auf den beiden Diagrammen gemäß [Kordina1981] oder [Schneider1995] basieren, siehe Abbildung 122 und auch Abbildung 14 in Kapitel 2.3.4.

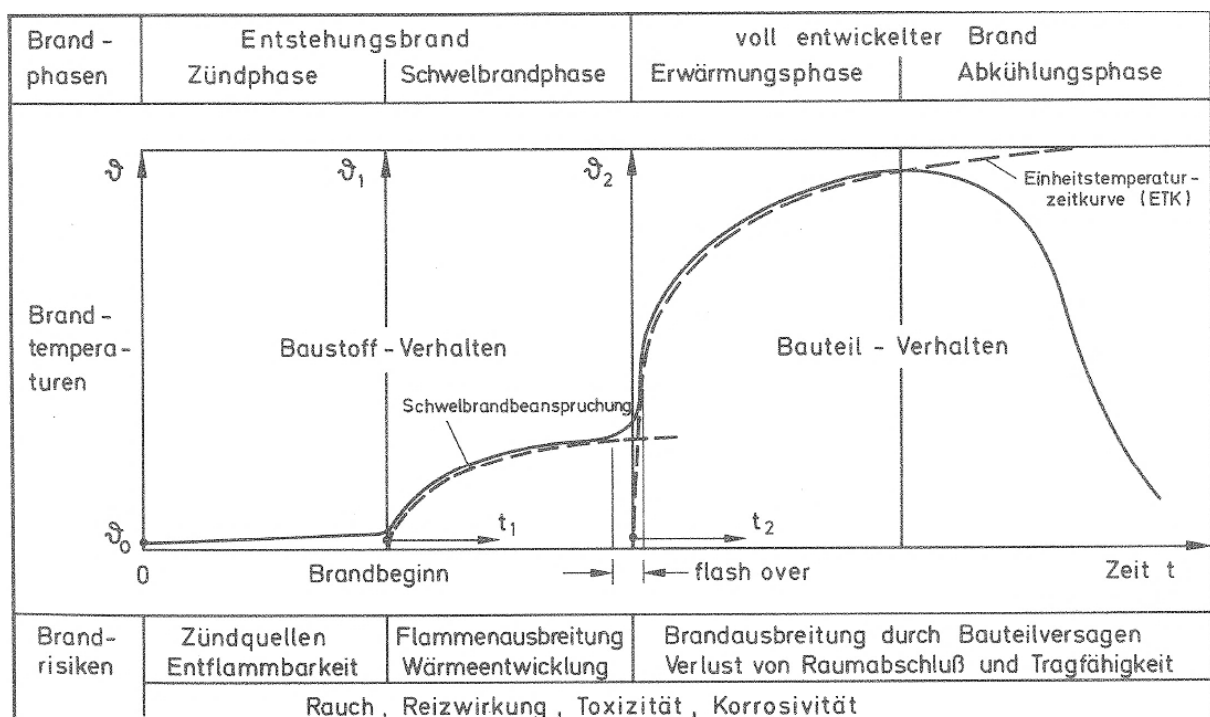


Abbildung 122: Brandphasen eines ungelöschten Naturbrandes gemäß [Kordina1981]

Grundsätzlich durchlaufen Brände nach einem Zündinitial zunächst eine Brandentwicklungsphase mit einer Zünd- und einer Schwelbrandphase (Pre-Flashover). Diese zunächst auf eine lokale Fläche im Brandraum konzentrierten Brände (daher auch *lokaler Brand* bezeichnet) sind insbesondere von einer starken Rauchentwicklung geprägt und zeichnen sich zunächst durch eine geringe Wärmefreisetzung aus, die (noch) nicht dazu führt, dass es im Brandraum zum Flashover kommt. Je nach Brandlast, Raumvolumen und Ventilation entwickeln sich Brände dieser Art zu einem Vollbrand oder bleiben auf dem Niveau eines lokalen Brandes. Steigt die mittlere Temperatur im Brandraum auf über 500-600 °C an und die Wärmestromdichte (der

Flammen und des Rauches) erreicht 15-20 kW/m<sup>2</sup>, kommt es gemäß [Knetsch2006] zum Feuerübersprung. Das Übergreifen des Feuers auf den gesamten Raum (Gase und Gegenstände) wird auch Flashover bezeichnet (vergleiche Rollover<sup>16</sup>, bei dem nur die Rauchgase brennen). Findet dieser Vollbrand nur auf einer Teilfläche statt, wird er gemäß [Wilk2013a] auch als *lokaler Flashover* bezeichnet. Nach dem Flashover setzt die Vollbrandphase ein (Post-Flashover), mit einer geringeren Rauchentwicklung und einer großen Wärmefreisetzung mit Temperaturen von teilweise über 1000 °C. Der Flashover beschreibt also den Übergang vom Entstehungsbrand zum Vollbrand. Wenn ca. 70% der Brandlast verbraucht sind, setzt die Abklingphase eines Brandes ein.

---

<sup>16</sup> Rollover (Rauchgasdurchzündung): Die plötzliche Durchzündung der Rauchschiicht wird Rollover bezeichnet. Unverbrannte (aber brennbare) Rauchgase steigen nach oben und sammeln sich unter der Decke. Vermischen sich Rauchgase und Sauerstoff nur wenig, können die Rauchgase nicht brennen. Lediglich im Grenzbereich bilden sich sog. Flammenzungen (*dancing-angels*). Führt eine Verwirbelung zu einer plötzlichen Sauerstoffzufuhr, zünden die Rauchgase schlagartig. Bei einer Rauchgasdurchzündung ist gemäß [Knetsch2006] genug Sauerstoff für die Zündung vorhanden, was die Rauchgasdurchzündung von der Rauchgasexplosion (Backdraft) unterscheidet, für dessen Entzündung zunächst weiterer Sauerstoff zugeführt werden muss.

## Anhang C Zünd- und Brandtemperaturen von Brennstoffen und Zündquellen

gemäß [Rodewald2007]

In der nachfolgenden Übersicht sind auszugsweise die Zündtemperaturen einiger Brennstoffe sowie die Brandtemperaturen einiger Zündquellen dargestellt.

<b>Brennstoff</b>	<b>Flammpunkt [°C]</b>	<b>Zündtemperatur [°C]</b>
Benzin	< -20	470-530
Diesel	> 55	220-250
Holz		220-320
Holzkohle		350
Papier		360
Zeitungsapier		180
Zucker		410
Streichholzkopf		80

<b>Zündquelle</b>	<b>Brandtemperatur [°C]</b>
Gasflamme	1500
Holz/ Kohle	1100 - 1300
Kerze (je nach Zone)	700 – 1400
Kerze im Abstand von 15 cm	200
Papier	800
Streichholz	800
Zigarette (normal)	400 – 500
Zigarette (beim Zug)	600 – 900

Dabei sind die Zusammenhänge der nachfolgenden brennstoffbezogenen Größen wie Flammpunkt, Brennpunkt und Zündpunkt von Bedeutung:

Der Flammpunkt brennbarer Flüssigkeiten kennzeichnet nach [Knetsch2006] die niedrigste Temperatur, bei der sich erstmalig über der Oberfläche ein zündfähiges Dampf-Luft-Gemisch bilden kann. Nach Annäherung einer Zündquelle erfolgt ein kurzes Aufflammen der Dämpfe, die nach Entfernen der Zündquelle wieder erlöschen.

Der Brennpunkt einer Flüssigkeit entspricht der Temperatur, bei der nach Entfernen der Zündquelle ein dauerndes Fortbrennen der Dämpfe stattfindet [Knetsch2006]. Das bedeutet, der Brennpunkt liegt oberhalb des Flammpunktes.

Der Zündpunkt (Zündtemperatur) ist nach [Kurzweil2012] die niedrigste Temperatur, bei der sich ein zündfähiges Brennstoff-Luft-Gemisch gerade noch selbst entzündet und verbrennt (ohne Fremdzündung). Erreicht also ein brennbarer Stoff die Zündtemperatur, genügt die Reaktion mit dem Luftsauerstoff und er beginnt zu brennen.

## Anhang D Wärmestromanteile aus Strahlung und Konvektion

In nachfolgender Tabelle sind die Wärmestromanteile aus Strahlung und Konvektion in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz für bestimmte, fiktive Bauteiloberflächentemperaturen dargestellt, ermittelt gemäß [DIN EN 1991-1-2:2010], siehe Kapitel 2.3.3.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

mit

Einstrahlzahl	$\Phi$	1,0	[-]
Emissivität des Feuers	$\epsilon_f$	1,0	[-]
Emissivität der Bauteiloberfläche	$\epsilon_m$	0,7	[-]
Stephan Boltzmann Konstante	$\sigma$	5,67,E-08	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
Wärmeübergangskoeffizient $_{\text{ETK}}$	$\alpha_c$	25	[W/m <sup>2</sup> K]

Tabelle 20: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit  $\phi = 1$ , hier für die Oberflächentemperatur  $\Theta_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$\dot{h}_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\dot{h}_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>100</b>	101	25	8	<b>75</b>	<b>25</b>	1
	200	2500	1218	<b>67</b>	<b>33</b>	100
	300	5000	3510	<b>59</b>	<b>41</b>	200
	400	7500	7374	<b>50</b>	<b>50</b>	300
	500	10000	13403	<b>43</b>	<b>57</b>	400
	600	12500	22285	<b>36</b>	<b>64</b>	500
	700	15000	34806	<b>30</b>	<b>70</b>	600
	800	17500	51843	<b>25</b>	<b>75</b>	700
	900	20000	74372	<b>21</b>	<b>79</b>	800
	1000	22500	103462	<b>18</b>	<b>82</b>	900

Tabelle 21: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit  $\phi = 1$ ,  
hier für die Oberflächentemperaturen  $\Theta_m = 200 \text{ °C}$  bis  $400 \text{ °C}$

$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{(net,c)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{(net,r)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>200</b>						
	201	25	17	<b>60</b>	<b>40</b>	1
	300	2500	2292	<b>52</b>	<b>48</b>	100
	400	5000	6156	<b>45</b>	<b>55</b>	200
	500	7500	12184	<b>38</b>	<b>62</b>	300
	600	10000	21067	<b>32</b>	<b>68</b>	400
	700	12500	33587	<b>27</b>	<b>73</b>	500
	800	15000	50625	<b>23</b>	<b>77</b>	600
	900	17500	73154	<b>19</b>	<b>81</b>	700
	1000	20000	102244	<b>16</b>	<b>84</b>	800
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{(net,c)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{(net,r)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>300</b>						
	301	25	30	<b>45</b>	<b>55</b>	1
	400	2500	3864	<b>39</b>	<b>61</b>	100
	500	5000	9892	<b>34</b>	<b>66</b>	200
	600	7500	18775	<b>29</b>	<b>71</b>	300
	700	10000	31295	<b>24</b>	<b>76</b>	400
	800	12500	48333	<b>21</b>	<b>79</b>	500
	900	15000	70862	<b>17</b>	<b>83</b>	600
	1000	17500	99952	<b>15</b>	<b>85</b>	700
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{(net,c)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{(net,r)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>400</b>						
	401	25	49	<b>34</b>	<b>66</b>	1
	500	2500	6029	<b>29</b>	<b>71</b>	100
	600	5000	14911	<b>25</b>	<b>75</b>	200
	700	7500	27432	<b>21</b>	<b>79</b>	300
	800	10000	44469	<b>18</b>	<b>82</b>	400
	900	12500	66998	<b>16</b>	<b>84</b>	500
	1000	15000	96088	<b>14</b>	<b>86</b>	600

Tabelle 22: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit  $\phi = 1$ ,  
hier für die Oberflächentemperaturen  $\Theta_m = 500 \text{ °C}$  bis  $800 \text{ °C}$

$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>500</b>						
	501	25	73	<b>25</b>	<b>75</b>	1
	600	2500	8883	<b>22</b>	<b>78</b>	100
	700	5000	21403	<b>19</b>	<b>81</b>	200
	800	7500	38440	<b>16</b>	<b>84</b>	300
	900	10000	60969	<b>14</b>	<b>86</b>	400
	1000	12500	90060	<b>12</b>	<b>88</b>	500
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>600</b>						
	601	25	106	<b>19</b>	<b>81</b>	1
	700	2500	12520	<b>17</b>	<b>83</b>	100
	800	5000	29558	<b>14</b>	<b>86</b>	200
	900	7500	52087	<b>13</b>	<b>87</b>	300
	1000	10000	81177	<b>11</b>	<b>89</b>	400
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>700</b>						
	701	25	146	<b>15</b>	<b>85</b>	1
	800	2500	17037	<b>13</b>	<b>87</b>	100
	900	5000	39566	<b>11</b>	<b>89</b>	200
	1000	7500	68656	<b>10</b>	<b>90</b>	300
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>800</b>						
	801	25	196	<b>11</b>	<b>89</b>	1
	900	2500	22529	<b>10</b>	<b>90</b>	100
	1000	5000	51619	<b>9</b>	<b>91</b>	200

Tabelle 23: Temperaturabhängige Strahlungs- und Konvektionsanteile nach der ETK mit  $\phi = 1$ ,  
 hier für die Oberflächentemperaturen  $\Theta_m = 900 \text{ °C}$  bis  $1000 \text{ °C}$

$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>900</b>						
	901	25	257	<b>9</b>	<b>91</b>	1
	1000	2500	29090	<b>8</b>	<b>92</b>	100
$\Theta_m$ [°C]	$\Theta_g$ [°C]	$h_{\text{(net,c)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$h_{\text{(net,r)}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	c [%]	r [%]	Temp.-Diff. [K]
<b>1000</b>						
	1001	25	328	<b>7</b>	<b>93</b>	1



## Anhang E                      Sicherheitskonzepte in der Literatur (Überblick)

- [Briggs**1942**]                      Fire Resistance classifications of building constructions, (*USA*)
- [Woods**1946**]                      Fire Grading of Buildings, (*GB*), (*USA*)
- [Geilinger**1950**]                      Feuersicherheit der Stahlkonstruktionen (*Schweiz*)
- [Boué**1958**]                      Punktesystem im Rahmen einer Dissertation als Vorschlag für  
Deutschland, (*Deutschland*)
- [Gretener**1973**]                      Bewertung der Brandgefährdung und Ableitung von Schutz-  
maßnahmen (Gretener Methode als Grundlage für SIA 81),  
(*Schweiz*)
- [SIA**1984**]                      SIA Dokumentation 81 – Brandrisikobewertung Berechnungs-  
verfahren, (*Schweiz*)
- [ANPI**1988**]                      ANPI, Evaluation des risques, (*Frankreich*)
- [DIN V 18230-1:**1987**]                      Baulicher Brandschutz im Industriebau, (*Deutschland*)
- [ENV1991-1-2:**1995**]                      Eurocode 1-1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke, (*Europa*)
- [DAST-RL019:**2001**]                      DAST-Richtlinie 019 - Brandsicherheit von Stahl- und Verbund-  
bauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden, (*Deutschland*)
- [Schleich**2001**]                      Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von  
Naturbrand, (*Europa*)
- [Dehne**2003**]                      Probabilistisches Sicherheitskonzept für die  
brandschutztechnische Bemessung, (*Deutschland*)
- [Hosser**2008b**]                      Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutz-  
technische Bemessung unter Anwendung von Ingenieur-  
methoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (*Deutschland*)

## Anhang F                      Atrien, Foyers und Eingangshallen im Bauordnungsrecht

In nachfolgend genannten Paragraphen von bauordnungsrechtlichen Regelwerken respektive offiziellen Begründungen dieser Vorschriften taucht der Begriff *Atrium*, *Foyer* oder *Eingangshalle* explizit auf oder steht damit im Kontext. Die Regelwerke können dem Informationssystem der Bauministerkonferenz [IS-ARGEBAU] entnommen werden.

### ***Versammlungsstätten***

§1 (3) 3. [MVStättV]: Die Vorschriften dieser Verordnung gelten nicht für Ausstellungsräume in Museen.

Zu §1 (3) 3. [MVStättV]: Nach Nummer 3 sind in Museen lediglich die Ausstellungsräume aus dem Anwendungsbereich der [MVStättV] ausgenommen. Im Übrigen ist die [MVStättV] auf Museen anzuwenden, wenn das Museum über weitere Versammlungsräume im Sinne des §2 (3) (z.B. **Foyer**, Vortragssäle, Cafeteria) verfügt, die zusammen in den Anwendungsbereich des §1 (1); Nr. 1 fallen.

§2 (3) [MVStättV]: Versammlungsräume sind Räume für Veranstaltungen oder für den Verzehr von Speisen und Getränken. Hierzu gehören auch Aulen und **Foyers**, Vortrags- und Hörsäle sowie Studios.

Zu §2 (3) [MVStättV]: **Foyers** in Versammlungsstätten sind immer Versammlungsräume, **Foyers** in anders genutzten Gebäuden sind dann Versammlungsräume, wenn sie für Veranstaltungen genutzt werden.

§2 (8) [MVStättV]: **Foyers** sind Empfangs- und Pausenräume für Besucher

Zu §2 (8) [MVStättV]: Zu den neuen Begriffsbestimmungen gehört in Absatz 8 auch das "**Foyer**" als wichtiger Gebäudeteil eines Theaters oder einer Mehrzweckhalle. Foyers werden in der Regel als Empfangs- und Pausenräume genutzt und dienen zugleich der Erschließung der übrigen Versammlungsräume. Da **Foyers** mit den notwendigen Fluren ein Erschließungs- und Rettungswegsystem bilden, gelten ähnlich hohe Anforderungen

wie an notwendige Flure. Da **Foyers** auch multifunktional genutzt werden können, sind sie zugleich auch Versammlungsräume im Sinne des Absatzes 3.

§3 (1) MVStättV: **Tragende** und aussteifende Bauteile, wie Wände, Pfeiler, **Stützen** und Decken, müssen **feuerbeständig**, in **erdgeschossigen** Versammlungsstätten **feuerhemmend** sein. Satz 1 gilt nicht für erdgeschossige Versammlungsstätten mit automatischen Feuerlöschanlagen.

§4 (1) MVStättV: **Tragwerke von Dächern**, die den oberen Abschluss von Räumen der Versammlungsstätte bilden oder die von diesen Räumen nicht durch feuerbeständige Bauteile getrennt sind, müssen **feuerhemmend** sein. [...] Satz 1 gilt nicht für Versammlungsstätten mit automatischen Feuerlöschanlagen.

§5 (4) MVStättV: In **Foyers**, durch die Rettungswege aus anderen Versammlungsräumen führen, in notwendigen Treppenräumen, Räumen zwischen notwendigen Treppenräumen und Ausgängen ins Freie sowie notwendigen Fluren müssen Unterdecken und Bekleidungen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

§5 (7) [MVStättV]: In notwendigen Fluren sowie in **Foyers**, durch die Rettungswege aus anderen Versammlungsräumen führen, müssen Bodenbeläge mindestens schwerentflammbar sein.

Zu §5 [MVStättV]: Die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an die, Dämmstoffe und Bekleidungen von **Foyers** werden hier mit der Tatsache verknüpft, dass es sich bei Foyers gemäß [MVStättV] immer auch um Versammlungsräume (Aufenthaltsräume) handelt.

§6 (3) [MVStättV]: Rettungswege dürfen über Gänge und Treppen durch **Foyers** oder Hallen zu Ausgängen ins Freie geführt werden, soweit mindestens ein weiterer von dem **Foyer** oder der Halle unabhängiger baulicher Rettungsweg vorhanden ist.

Zu §6 (3) [MVStättV]: §6 (3) lässt die Führung von Rettungswegen über Gänge und Treppen durch eine Halle oder ein **Foyer** zu Ausgängen ins Freie zu, wenn das betreffende Geschoss jeweils mindestens einen weiteren davon unabhängigen baulichen Rettungsweg hat, der nicht durch die Halle bzw. das **Foyer** führt. §6 (3) ermöglicht abweichend von §35 (3) [MBO2002] die offene Führung von

Rettungswegen durch eine Halle oder ein **Foyer**. Dies schließt auch den Fall ein, dass der Ausgang aus einem Treppenraum in ein Foyer mündet und über dieses ins Freie führt. Da nach §6 (1) die Gänge und Stufengänge im Versammlungsraum sowie dessen Ausgänge Bestandteil des Rettungsweges sind, ist immer eine Gesamtbetrachtung des Verlaufs des Rettungsweges vom jeweiligen Versammlungsraum bis ins Freie erforderlich. Sind beispielsweise für einen im ersten Obergeschoss liegenden Versammlungsraum zwei bauliche Rettungswege erforderlich, dann müssen grundsätzlich beide Rettungswege unmittelbar ins Freie oder über notwendige Flure oder notwendige Treppenhäuser ins Freie geführt werden.

Absatz 3 eröffnet die Alternative, einen der beiden Rettungswege aus dem Versammlungsraum unmittelbar ins Freie oder über notwendige Flure oder notwendige Treppenhäuser ins Freie zu führen und den anderen Rettungsweg durch ein **Foyer** oder eine Halle in Freie zu führen.

**Foyers** und Hallen sind selbst Versammlungsräume und können größere Brandlasten haben. Die Führung baulich ungeschützter Gänge und notwendiger Treppen durch eine Halle oder ein **Foyer** ist daher nur vertretbar, wenn das Brandrisiko in dieser Halle und dem **Foyer** durch eine automatische Feuerlöschanlage minimiert wird (§19 (4)).

Die Anzahl der weiteren Rettungswege hängt von der Zahl der Besucherplätze der jeweiligen Geschosse ab; für die Kapazität der durch das **Foyer** führenden Rettungswege ist ein Nachweis nach §7 (4) zu führen. Im Zusammenhang von Absatz 2 und 3 bedeutet dies, dass die Führung von Rettungswegen aus einem oder mehreren Geschossen - z.B. über offene Treppen - durch ein **Foyer** oder eine Halle nur dann zulässig ist, wenn jedes dieser Geschosse über mindestens einen vom **Foyer** oder der Halle unabhängigen weiteren baulichen Rettungsweg verfügt. Bei diesem partiellen Verzicht auf einen notwendigen Treppenraum handelt es sich insoweit um eine Erleichterung gegenüber §35 (1) Satz 1 [MBO 2002]. Eine solche durch ein **Foyer** geführte Treppe muss im Übrigen dann die Anforderungen an eine notwendige Treppe erfüllen. Die Erleichterung des Absatzes 3 wird ferner durch die zwingende Vorschrift des Absatzes 4 eingeschränkt.

§7 (3) [MVStättV]: Die Entfernung von jeder Stelle eines notwendigen Flures oder eines **Foyers** bis zum Ausgang ins Freie oder zu einem notwendigen Treppenraum darf nicht länger als 30m sein.

§15 (2) [MVStättV]: Eine Sicherheitsbeleuchtung muss vorhanden sein in Versammlungsräumen sowie in allen übrigen Räumen für Besucher (z.B. **Foyers**, Garderoben, Toiletten)

§19 (1) [MVStättV]: Versammlungsräume, Bühnen, **Foyers**, Werkstätten, Magazine, Lagerräume und notwendige Flure sind mit geeigneten Feuerlöschern in ausreichender Zahl auszustatten.

§19 (4) [MVStättV]: **Foyers** oder Hallen, durch die Rettungswege aus anderen Versammlungsräumen führen, müssen eine automatische Feuerlöschanlage haben.

Zu §19 (4): **Foyers** und Hallen sind selbst Versammlungsräume und können größere Brandlasten haben. Die Führung baulich ungeschützter Gänge und notwendiger Treppen durch eine Halle oder ein **Foyer** ist daher nur vertretbar, wenn das Brandrisiko in dieser Halle und dem **Foyer** durch eine automatische Feuerlöschanlage minimiert wird.

### ***Hochhäuser***

3.1.1. [MHHR]: **Tragende und aussteifende** Bauteile müssen **feuerbeständig** sein und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

3.1.2. [MHHR]: Die Feuerwiderstandsfähigkeit **tragender** und aussteifender Bauteile von Gebäuden mit **mehr als 60m** Höhe muss **120 Minuten** betragen.

4.2.5 [MHHR]: Sofern der Ausgang eines notwendigen Treppenraumes nicht unmittelbar ins Freie führt, muss der Raum zwischen dem notwendigen Treppenraum und dem Ausgang ins Freie

1. ohne Öffnungen zu anderen Räumen sein,
2. Wände haben, die die Anforderungen an die Wände des Treppenraumes erfüllen.

4.2.5 MHHR-Erläuterungen: Die Regelung entspricht der Systematik des §35 (3) Satz 3 [MBO2002] mit dem Unterschied, dass keine anderen Räume, insbesondere notwendige Flure, Nutzungseinheiten oder **Foyers** an den Raum zwischen notwendigen Treppenraum und dem Ausgang ins Freie angeschlossen werden dürfen (Treppenraumerweiterung). Der Ausschluss von Öffnungen in den Wänden nach

Nummer 4.2.5 minimiert die Möglichkeit des Raucheintritts und stellt damit sicher, dass die Funktionsfähigkeit der notwendigen Treppenträume erhalten bleibt.

### ***Krankenhäuser***

§11 (2) [KhBauVO]: Innerhalb eines Brandabschnittes dürfen in **Eingangshallen** oder ähnlichen Räumen höchstens drei Geschosse durch nicht notwendige Treppen in Verbindung stehen, wenn sie durch feuerbeständige Wände von anderen Räumen abgetrennt sind.

§15 (1); 2. [KhBauVO]: Der Rettungsweg darf über eine Halle, wie **Eingangshalle**, ins Freie führen, wenn die Entfernung von der untersten Treppenstufe bis zum Freien nicht mehr als 20m beträgt. Die Halle muss durch feuerbeständige Wände von anderen Räumen abgetrennt sein. Türen zu diesen Räumen müssen mindestens feuerhemmend und selbstschließend sein. Verkaufsstände und Kleiderablagen können in der Halle oder in Räumen, die mit der Halle in offener Verbindung stehen, gestattet werden, wenn in die Halle oder die Räume eine selbsttätige Feuerlöschanlage eingebaut wird.

### ***Standardgebäude***

§27 (1) [MBO2002]: Tragende und aussteifende Wände und Stützen müssen im Brandfall ausreichend lang standsicher sein. Sie müssen

1. in Gebäuden der Gebäudeklasse 5 feuerbeständig,
2. in Gebäuden der Gebäudeklasse 4 hochfeuerhemmend,
3. in Gebäuden der Gebäudeklassen 2 und 3 feuerhemmend, sein.

Satz 2 gilt für Geschosse im Dachraum nur, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind

## Anhang G Brandlasten im Bauwesen – Erhebungen, Quellen und Veröffentlichungen

Nachfolgend sind alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten, historischen und aktuellen, internationalen Quellen bzw. Veröffentlichungen und Erhebungen zu Brandlasten im Bauwesen aufgeführt. Sie sind nach dem Erscheinungsjahr sortiert. Nach jeder genannten Veröffentlichung folgt eine kurze zusammenfassende Beschreibung mit einem Hinweis zum Herkunftsland:

**[Kollbr1965]** Für Brandbelastungen bis zu 20 kg/m<sup>2</sup> muss der Stahl das Feuer nicht fürchten.

*Keine nutzungsbezogenen Aussagen, jedoch bereits Überlegungen hinsichtlich einer ungeschützten Stahlbauweise in Abhängigkeit von Brandlasten (Schweiz).*

**[Bryson1967]** Techniques for the survey and evaluation of live floor loads and fire loads in modern office buildings

*Erster Ansatz einer systematischen Brandlasterhebung, raumweise differenziert, sogar Lobbies sind konkret mit aufgeführt. Vorbereitendes Projekt für die „Culver-Erhebung“ (USA).*

**[Baldwin1970]** Survey of fire-loads in modern office buildings – some preliminary results

*Beschreibung der Vorgehensweise für systematische Brandlasterhebungen (GB).*

**[Robertson1970]** Fire Load, Fire Severity and Fire Endurance

*Zusammenfassung internationaler Erhebungen der 1920er-40er Jahre sowie der 1960-er Jahre über die Zusammenhänge von Brandlast und Geometrie auf den Brandverlauf, mit dem Fokus auf den Vergleich realer Brände mit der Normbrandkurve (USA).*

**[Bryl1975]** Brandbelastungen im Hochbau

*Systematische, nutzungsbezogene Brandlasterhebung, mit gewissen Hinweisen zu Eingangshallen über „Verkehrsräume“ (Schweiz).*

**[Culver1976]** Survey Results for Fire Loads and Life Loads in Office Buildings

*Systematische, groß angelegte Brandlasterhebung, welche zwischen verschiedenen Raumnutzungen innerhalb von Bürogebäuden differenziert und „Lobbies“ explizit mit aufführt (USA).*

**[Culver1978]** Characteristics of Fire Loads in Office Buildings

*Zusammenfassende Veröffentlichung der o.g. Brandlasterhebung von 1976, „Lobbies“ sind auch hier ausdrücklich mit aufgeführt (USA).*

**[Rasbash1983]** Fire Load and Fire Exposure

*Nutzungsspezifische Brandlasterhebung, auch Raumtypisierungen innerhalb von Bürogebäuden sind enthalten, jedoch ohne Eingangsbereiche, Lobbies etc. (GB).*

**[NIST1983]** Fire Performance of Furnishings

*Umfangreiche Versuchsreihe an Möbeln, zur Ermittlung von Brandkenngrößen, wie die Wärmefreisetzung etc. (USA).*

**[Thomas1986]** Design Guide - Structural Fire Safety

*Häufig zitierte- und zugrunde gelegte Veröffentlichung im Rahmen des CIB W14-Workshops über umfangreiche Brandlasterhebungen, mit Raumtypisierungen unterschiedlicher Nutzungen, auch für Bürogebäude, jedoch ohne Berücksichtigung von*



Eingangsbereichen o.ä. (USA). Die hier sehr differenziert dargelegten Daten von Brandlasten basieren u.a. auf den bereits erwähnten Veröffentlichungen von Robertson (1970), Bryl (1975) und Culver (1976).

**[Bastings1988]** Fires Safety in Atrium Buildings

Veröffentlichung über Atrien und deren Bemessungsbrände, jedoch mit dem Fokus auf die Entrauchung (Neuseeland).

**[Beilicke1990]** Bautechnischer Brandschutz - Brandlastberechnung

Publikation über Grundlagen der Brandlastberechnung mit umfangreichen Daten zu Heizwerten einzelner Gegenstände, Stoffe und Materialien (Deutschland).

**[Schneid1992]** Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen

Keine statistische Erhebung, sondern ein Forschungsreicht zur Ermittlung des m-Faktors (DIN 18230) in kleinen Öfen und die Übertragbarkeit auf größere Räume (Deutschland).

**[Särdqvist1993]** Initial Fires

Umfangreiche Versuchsreihe an Alltagsgegenständen und Möbeln zur Ermittlung von Brandkenngrößen, wie die Wärmefreisetzung etc. (Schweden).

**[Melinek1993]** The Distribution of Fire Load

Nutzungsspezifische Brandlasterhebung, jedoch ohne Eingangsbereiche (GB).

**[Narayanan1995]** Fire Severities for Structural Fire Engineering Design

*Mit dem Fokus auf alternative Temperatureinwirkungen werden Erhebungen aus Europa und den USA auf Bürogebäude in Neuseeland übertragen (Neuseeland).*

**[Kumar1997]** Fire Loads in Office Buildings

*Brandlasterhebung in 8 indischen Bürogebäuden differenziert nach Raumarten im Vergleich mit Ergebnissen der 1970er Jahre von Baldwin aus GB und Culver aus den USA. Es sind Flure aufgeführt, aber keine expliziten Lobbies/ Foyers (Indien).*

**[Schleich1999]** Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in large compartments

*Internationale Veröffentlichung über typische Naturbrandszenarien für große Räume und deren Auswirkung mit dem Fokus auf die Stahlbauweise (Europa).*

**[Yii2000]** Effect of Surface Area and Thickness on Fire Loads

*Systematische Untersuchung zur Wirkung der Oberfläche und Materialdicke von Brandlasten auf die Wärmefreisetzung und die Brennzeit sowie das nutzungsbezogene Auftreten von bestimmten Brandlasten (Neuseeland).*

**[Schleich2001]** Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand (Abschlussbericht - Entwurf)

*Europäisches Forschungsvorhaben mit dem Fokus auf Naturbrand (NFSC). U.a. sind nutzungsbezogene Brandlastendichten aufgeführt, die in die Eurocodes übernommen wurden. In Interpretation der Kategorie „transport/ public space“, welche aus Erhebungen in GB, der Schweiz und den USA entnommen wurden, können diese Werte teilweise auf Eingangsbereiche/ Foyers übertragen werden (Europa).*

**[DASSt-019\_2001]** Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden

*Stahlbau-Richtlinie, zur Anwendung des Naturbrandes auf Büro- und Verwaltungsbauten in Stahlbauweise. Hier ist explizit eine Brandlast für die Kategorie „Atrien für Empfangsnutzung“ mit aufgeführt (Deutschland).*

**[Schaumann2002]** Erläuterungen zur DASSt-Richtlinie 019 Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden

*Kommentar zur o.g. Stahlbau-Richtlinie, indem u.a. die Herkunft der Brandlastkategorie „Atrien für Empfangsnutzung“ erläutert wird. Diese Werte wurden in Interpretation von internationalen Quellen (NFSC) aus diesen übernommen (Deutschland).*

**[Schleich2002]** Competitive steel buildings through natural fire safety concepts

*Zusammenfassende Veröffentlichung im Zuge des NFSC sowie praktische Beispiele von umgesetzten Bauvorhaben. (Europa).*

**[Schleich2002a]** Valorisation project — Natural fire safety concept (final report)

*Projekt zur Verbreitung der Forschungsergebnisse im Zuge des NFSC, Abschlussbericht. In Bezug auf Brandlasten keine neuen Erkenntnisse, s.a. [Schleich2001].*

**[Fontana2006]** Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie und Gewerbebauten

*Systematische Beschreibung einer groß angelegten Brandlasterhebung in Industrie und Gewerbebauten, jedoch ohne Eingangsbereiche etc. (Schweiz).*

**[VKF2007]** Bewertung Brandabschnittsgrößen

*Risikobewertung für die Objekte aus Industrie, Handel und Gewerbe, mit nutzungsbezogenen Brandlastdichten für Büros, Lager und Produktion (Schweiz).*

**[Zalok2009]** Fire loads in commercial premises

*Kanadische Brandlasterhebung von Geschäftshäusern mit dem Fokus auf Verkaufsstätten, jedoch ohne Eingangsbereiche (Kanada).*

**[Hosser2009]** Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes

*Umfassende nationale Zusammenfassung über die Grundlagen der verschiedenen Ingenieurmethoden im Brandschutz u.a. mit Brandlasttabellen aus internationalen Quellen, auch mit Hinweisen zu Eingangshallen (Deutschland).*

**[Hadjisophocleous2010]** A Survey of Fire Loads in Elementary Schools and High Schools

*Brandlasterhebung in Schulen, unterteilt nach Raumarten, jedoch ohne separate Berücksichtigung von Pausenhallen oder Eingangsbereichen (Kanada).*

**[Zalok2011]** Validation of Methodologies to Determine Fire Load for Use in Structural Fire Protection

*Grundlagen, Methoden und Vorgehensweisen für Brandlasterhebungen im Baulichen Brandschutz an Beispielen von Bürogebäuden, jedoch ohne Berücksichtigung von Eingangsbereichen/ Foyers (USA/ Kanada).*

**[Radolsky2012]** Structural Fire Loads

*Zusammenfassung theoretischer Grundlagen zur Brandsimulation und zur Anwendung von Brandlasten bei der Festlegung von Bemessungsbränden (USA).*

**[Hosser2013]** Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes

*Überarbeitung der Ausgabe von 2009, die lokale Brandlast bei Eingangshallen wurde angepasst (Deutschland).*

**[Khorasani2014]** Fire load: Survey data, recent standards, and probabilistic models

*Vergleichende Auswertung bestehender Brandlasterhebungen von Bryl (1975), Culver (1976 und 1978), Thomas (1986), Kumar (1997), VKF (2007) und Zalok (2011), s.o.. Der Bezug zu Lobbies etc. ergibt keine neuen Erkenntnisse, da sich diesbezüglich nur auf die bereits aufgeführten Culverdaten der 1970-er Jahre bezogen wird (USA).*

**Anmerkung:**

In verschiedenen Veröffentlichungen zu Brandlasten tauchen jeweils unterschiedliche Einheiten auf, welche anhand nachstehender Tabelle umgerechnet werden können:

Tabelle 24: Umrechnung der verschiedenen Einheiten von Brandlasten

<b>1,0</b>	kg Holz/m <sup>2</sup>	15,50	MJ/m <sup>2</sup>	4,30	kWh/m <sup>2</sup>	1,36	BTU/ft <sup>2</sup>	0,17	psf
<b>1,0</b>	MJ/m <sup>2</sup>	0,28	kWh/m <sup>2</sup>	0,09	BTU/ft <sup>2</sup>	0,01	psf	0,06	kg Holz/m <sup>2</sup>
<b>1,0</b>	kWh/m <sup>2</sup>	0,32	BTU/ft <sup>2</sup>	0,04	psf	0,23	kg Holz/m <sup>2</sup>	3,60	MJ/m <sup>2</sup>
<b>1,0</b>	BTU/ft <sup>2</sup>	0,13	psf	0,73	kg Holz/m <sup>2</sup>	11,36	MJ/m <sup>2</sup>	3,15	kWh/m <sup>2</sup>
<b>1,0</b>	psf	5,86	kg Holz/m <sup>2</sup>	90,86	MJ/m <sup>2</sup>	25,24	kWh/m <sup>2</sup>	8,00	BTU/ft <sup>2</sup>

kg Holz/m<sup>2</sup>

Holzäquivalent je Fläche

MJ/m<sup>2</sup>

Megajoule je Quadratmeter

kWh/m<sup>2</sup>

Kilowattstunden je Quadratmeter

BTU/ft<sup>2</sup>

british thermal unit per squarefoot

psf

pounds per squarefoot

## **Anhang H                      Fragebogen der Expertenbefragung**

Nachfolgend ist ein Blanko-Exemplar des verwendeten Fragebogens dargestellt. Dieser wurde via Email an die Probanden versendet. In dem pdf-Formular war es möglich, in den dafür vorgesehenen Feldern direkt Eintragungen vorzunehmen, diese zu speichern oder auszudrucken. Die Ergebnisse wurden anonymisiert ausgewertet.

Fragebogen für Expertenbefragung im Rahmen der Delphi-Methode:Atrien/ Foyer-Situationen in Bauvorhaben / bzw. in Brandschutzkonzepten**Erläuterungen:**

*Im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit am Institut für Stahlbau von Herrn Prof. Schaumann an der Leibniz Universität Hannover sollen Daten erhoben werden. Dabei sollen typische Konstellationen für Atrien/ Foyers in Eingangssituationen von Büro- und Verwaltungsgebäuden in Deutschland herausgearbeitet werden. Im Folgenden werden Sie dafür gebeten, aus Ihrer Projekterfahrung bestimmte Charakteristika anzugeben.*

- Der Fragebogen umfasst 10 Fragen und die Beantwortung des Fragebogens dauert ca. 5 Minuten.
- Es geht dabei um Foyer-Situationen in Büro und Verwaltungsgebäuden. Hier stehen insbesondere die Geometrie, die Brandlasten und die Bemessung der Stützen im Brandfall im Fokus.
- Bitte schätzen Sie die Beantwortung der Fragen aus Ihrer Erfahrung jeweils prozentual ab und tragen Sie die Antworten entsprechend ein. Die Summe jeder Frage muss 100% ergeben.
- Bitte füllen Sie nur die Felder aus, dessen Fragen Sie beurteilen/ abschätzen können. Anderenfalls lassen Sie die Frage bitte einfach aus.
- Am Ende besteht die Möglichkeit, in einem Feld ggfs. Anmerkungen einzutragen.

*Die Auswertung erfolgt anonymisiert über Mittelwerte und NICHT personen- oder objektbezogen.*

*Vielen Dank für Ihre Unterstützung!*

## 1) Geometrie der Foyers: Welche Abmessungen haben Foyers gemäß Ihrer Projekterfahrung?

1.1) Höhe ca. **in %**

- 3,5 – 5m  
 5 – 10m  
 10 – 15m  
 > 15m

1.2) Grundfläche ca. **in %**

- < 50m<sup>2</sup>  
 50 – 100m<sup>2</sup>  
 100 – 200m<sup>2</sup>  
 200 – 400m<sup>2</sup>  
 > 400m<sup>2</sup>

## 2) Bitte geben Sie die Materialien der Umfassungsbauteile der jeweiligen Atrien, getrennt nach Dach, Innen- und Außenwänden/ Fassade an.

2.1) Dächer der Foyers sind überwiegend aus... ca. **in %**

- Stahl  
 - Glas  
 - Stahlbeton  
 - Sonstige

2.2) Umfassungsbauteile, wie Innenwände (Innen-Abschottung) sind überwiegend aus... ca. **in %**

- Stahlbeton  
 - Mauerwerk  
 - Stahl  
 - Glas

2.3) Umfassungsbauteile, wie Fassade/ Außenwände (Außen-Abschottung) sind überwiegend aus... ca. **in %**

- Stahl
- Glas
- Stahlbeton
- Mauerwerk

3) Wie groß sind dabei die Öffnungsflächen im Dach (RWA-Flächen), ... ca. **in %**

- < 10 m<sup>2</sup>
- 10 – 15 m<sup>2</sup>
- 15 – 25 m<sup>2</sup>
- 25 – 50 m<sup>2</sup>
- > 50 m<sup>2</sup>

4) Wie groß sind jeweils die Öffnungsflächen in der Fassade der Foyers (Fensterflächen inkl. Türen), ca. **in %**

- < 25 m<sup>2</sup>
- 25–50 m<sup>2</sup>
- 50–100 m<sup>2</sup>
- > 100 m<sup>2</sup>

5) Foyer-Stützen sind dabei überwiegend aus... **in %**

- Stahl
- Stahlbeton
- Stahlverbund
- Holz

6) Wie wurde der jeweilige Feuerwiderstand der Stützen erzielt? Bitte geben Sie an, welche Maßnahmen zur Erlangung des Feuerwiderstandes der Stützen jeweils eingesetzt wurden? ca. **in %**

- F30/90 über die klassifizierte Konstruktion als Stahlbeton- oder Stahlverbundstütze
- F30/90 über Bekleidungen / Dämmschichtbildner der Stützen
- F30/90 über rechnerischen Nachweis (Ingenieurmethoden)

6.a) Falls die Nachweise des Feuerwiderstandes über Ingenieurmethoden geführt wurden, mit welchen Berechnungsmethoden wurden die Stützen nachgewiesen? ca. **in %**

- Level 2 (Vereinfachte Berechnungsverfahren)
- Level 3 (Allgemeine Berechnungsverfahren)

6.b) In wie viel Prozent der von Ihnen bearbeiteten Fälle wurde die Temperatureinwirkung auf die Bauteile durch Simulationsrechnungen wie bspw. Zonen- oder Feldmodellen ermittelt?



- 7) In ca. wie viel % der Fälle gab es im Brandschutzkonzept Kompensationen für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer auf F30/ F0?

- 8) Schätzen Sie bitte **in %** die Foyer-Brandlasten in der Einheit, die für Sie gewohnter/ vertrauter ist.

<input type="checkbox"/> 0 – 25 MJ/m <sup>2</sup>	bzw.	<input type="checkbox"/> 0 – 7 kWh/m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> 25 – 100 MJ/m <sup>2</sup>		<input type="checkbox"/> 7 – 28 kWh/m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> 100 – 250 MJ/m <sup>2</sup>		<input type="checkbox"/> 28 – 70 kWh/m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> 250 – 500 MJ/m <sup>2</sup>		<input type="checkbox"/> 70 – 139 kWh/m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> > 500 MJ/m <sup>2</sup>		<input type="checkbox"/> > 139 kWh/m <sup>2</sup>

- 8.1) Handelte es sich hierbei eher um lokal konzentrierte oder um flächig verteilte Brandlasten?

- 9) War Anlagentechnik vorhanden? ca. **in %**

<input type="checkbox"/>	- keine
<input type="checkbox"/>	- BMA
<input type="checkbox"/>	- Rauch- und Wärmeabzug
<input type="checkbox"/>	- Sprinklerung

- 10) Auf ca. wie viele Projekte treffen Ihre gemachten Angaben zu?

Anmerkungen:

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

## Anhang I Lastzusammenstellung

### Lastzusammenstellung im aufgehenden Gebäude:

Zur Ermittlung von plausiblen Stützenlasten im Eingangsbereich wird ein Verwaltungsgebäude mit Stahlbetondecken und -dächern unterstellt, deren Bauteildicke  $h$  nach Verformungs- und Durchstanzkriterien überschlägig vordimensioniert wurde. Dabei wird ein Achsabstand der Stützen untereinander von 7 m unterstellt. Für eine Innenstütze mit entsprechender Durchlaufwirkung ergibt sich eine Lasteinflussfläche von ca. 77 m<sup>2</sup>. Für die oberste Decke wird  $h=25$  cm gewählt und für die Regelgeschossdecken  $h=28$  cm. Für die Ausbaulast werden 2 kN/m<sup>2</sup> angesetzt. Die Verkehrslast wird mit 3,0 kN/m<sup>2</sup> festgelegt zuzüglich eines Zuschlags für leichte Trennwände von 0,8 kN/m<sup>2</sup>. Die Verkehrslast der obersten Decke ergibt sich im Wesentlichen aus Schnee. Darin enthalten ist zudem eine Mannlast für Wartungszwecke sowie 10 cm Aufstauhöhe für die Dachentwässerung. Die Verkehrslastanteile können gemäß [DIN EN 1991-1-1] in Abhängigkeit von der Geschossigkeit über den Faktor  $\alpha_n$  reduziert werden. Daraus ergeben sich geschossweise die entsprechenden Flächenlasten:

#### Oberste Decke:

$$g = 0,25 \cdot 25 = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{\Delta g = 2,0 \text{ kN/m}^2}$$

$$\Sigma g = 8,25 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\text{Schnee}} = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

#### Regelgeschossdecke:

$$g = 0,28 \cdot 25 = 7,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{\Delta g = 2,0 \text{ kN/m}^2}$$

$$\Sigma g = 9,0 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\text{Büro}} = 3,8 \text{ kN/m}^2$$

### Lastzusammenstellung im eingeschossigen Atrium:

Für die Betrachtung eines eingeschossigen Atriums wird eine Stahl-Glaskonstruktion unterstellt. Die Lastanteile aus Stahl und Glas werden überschlägig mit jeweils  $1 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt, zuzüglich einer Ausbaulast in gleicher Größe. Wie auch für die Dachdecke des aufgehenden Bürogebäudes werden die Anteile für Schnee, Wartung und Aufstauhöhe der Dachentwässerung pauschal mit  $1 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt:

#### Atriumdach:

$$g = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{\Delta g = 1,0 \text{ kN/m}^2}$$

$$\Sigma g = 3,0 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\text{Schnee}} = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

### Ermittlung der Stützenlasten

Die Ermittlung der Bemessungslasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Raumtemperatur erfolgt anhand der ständigen Einwirkungskombination. Für den Nachweis im Brandfall wird die außergewöhnliche Einwirkungskombination berücksichtigt [DIN EN 1991-1-1]:

#### Stützenlast für Foyerstütze (5m)

mit 6 Geschossen oberhalb des EG ( $\alpha_n = 0,8$ )

Decke über	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]			
6OG	632	77			
5OG	689	291			
4OG	689	291			
3OG	689	291			
2OG	689	291			
1OG	689	291			
EG	689	291	mit $\alpha_n = 0,8$	$(G+Q)_d$	$(G+Q)_{d,fi}$
$\Sigma$	<b>4766</b>	<b>1822</b>	<b>1458</b>	<b>8621 kN</b>	<b>5495 kN</b>

**Stützenlast für Foyerstütze (8,40m)**mit 5 Geschossen oberhalb des EG ( $\alpha_n = 0,82$ )

Decke über	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]			
6OG	632	77			
5OG	689	291			
4OG	689	291			
3OG	689	291			
2OG	689	291			
1OG	689	291			
EG	0	0	mit $\alpha_n = 0,82$	$(G+Q)_d$	$(G+Q)_{d,fi}$
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>4077</b>	<b>1531</b>	<b>1256</b>	<b>7388 kN</b>	<b>4705</b>

**Stützenlast für Atriumstütze (12,0m)**

hoher, eingeschossiger Gebäudeteil

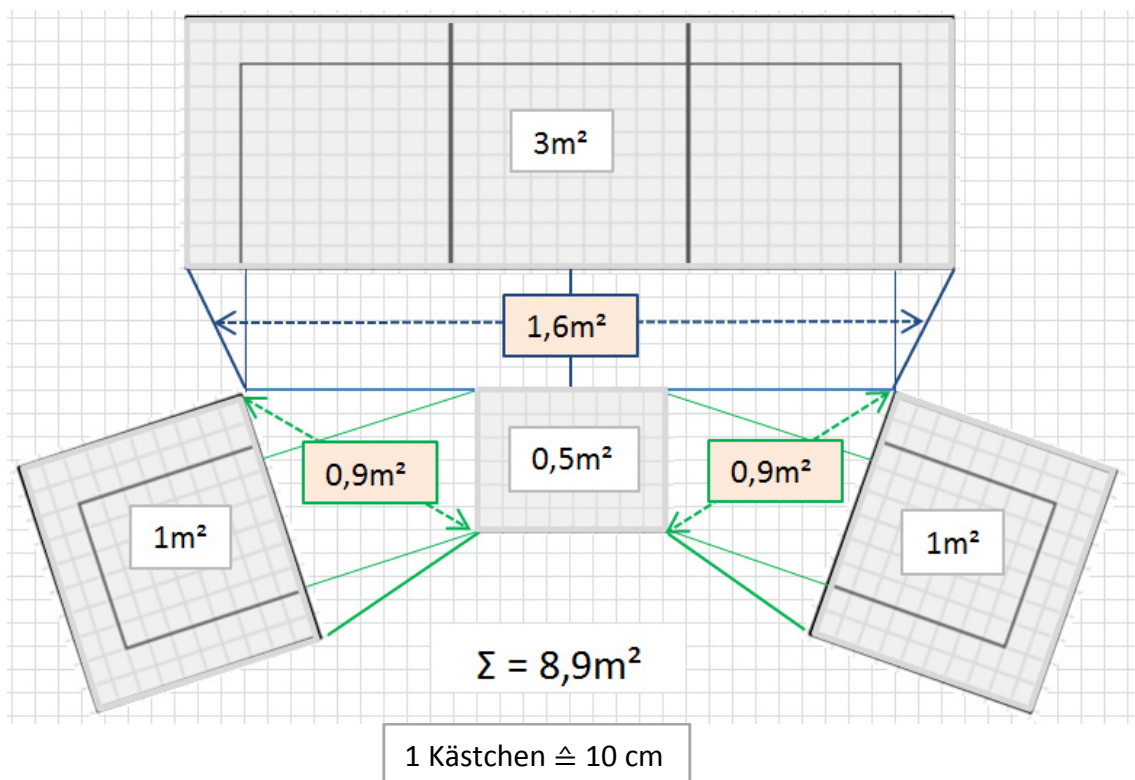
Decke über	$G_k$ [kN]	$Q_k$ [kN]			
EG	230	77		$(G+Q)_d$	$(G+Q)_{d,fi}$
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>230</b>	<b>77</b>		<b>426 kN</b>	<b>245 kN</b>

## Anhang J Brandlastermittlung

Für die rechnerischen Nachweise im Brandfall wird eine lokale Brandlast eines repräsentativen Foyers/ Atriums nachfolgend deterministisch ermittelt. Für den betrachteten Anwendungsfall werden beispielhaft zwei Varianten untersucht:

- 1.) **Sitzgruppe** aus Designersofa, Beistelltisch und Zeitschriften
- 2.) **Empfangstresen** aus Schreibtisch, PC und Papierkorb.

zu 1) Auf einer Grundfläche von ca. 9 m<sup>2</sup> befindet sich eine Sitzgruppe, bestehend aus einem Dreisitzer und zwei Einzitzern (gemäß nachfolgenden Beispielfotos) sowie einem Beistelltisch mit Zeitschriften.

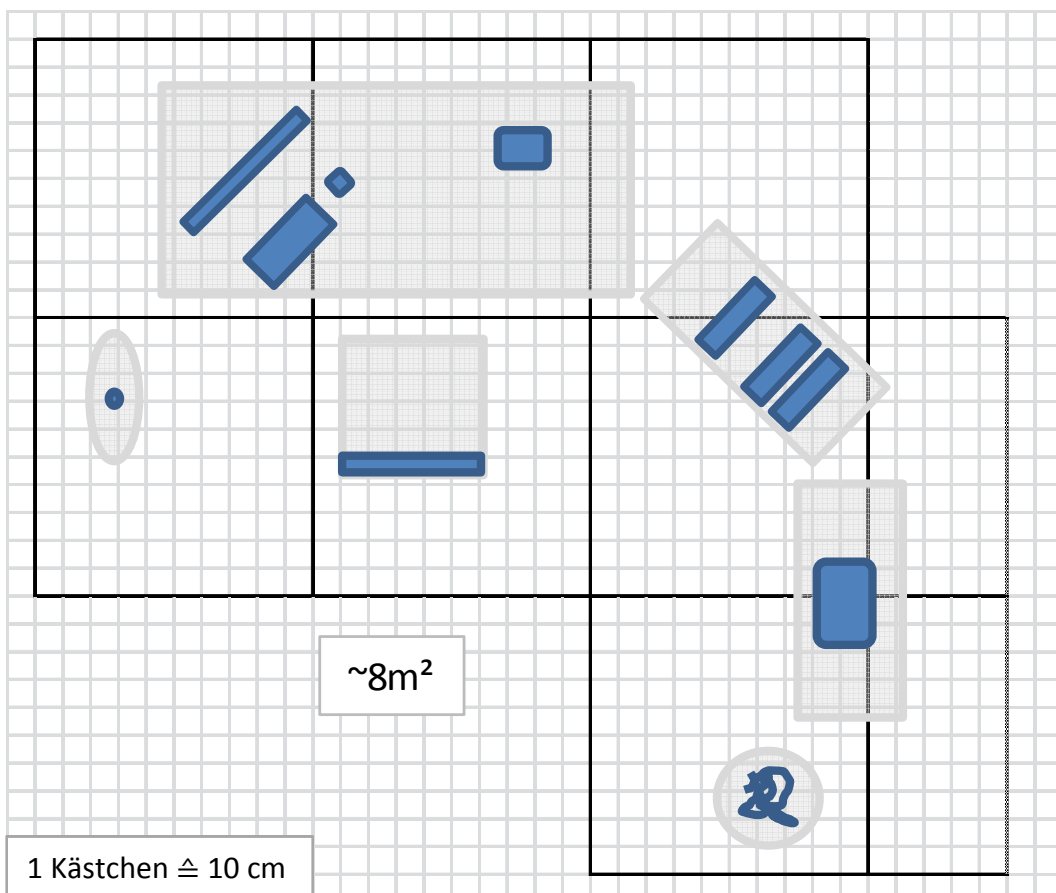


Brandlastwerte gemäß [Beilicke1990]

2 Polstersessel mit Stahluntergestell	je 230 MJ
1 Designersofa mit Stahlanteil	1570 MJ
(Mittelwert aus 2er und 3er Polstersofa)	
1 Tisch mit Stahlgestell	139 MJ
Zeitschriften	20 MJ
	<u><math>\Sigma =</math> <b>2189 MJ</b></u>

Bezogen auf die Grundfläche von  $8,9 \text{ m}^2$  ( $2189 \text{ MJ} / 8,9 \text{ m}^2$ ) ergibt sich eine Brandlastdichte von  $246 \text{ MJ/m}^2$ . Zuzüglich eines Zuschlags für Unvorhergesehenes gemäß [DIN EN 1991-1-2] von pauschal  $50 \text{ MJ/m}^2$  ergibt sich für die Variante repräsentative Sitzgruppe eine Brandlastdichte von  $296 \sim \mathbf{300 \text{ MJ/m}^2}$ .

zu 2) Auf einer Grundfläche von ca.  $8 \text{ m}^2$  befindet sich ein Empfangstresen/ Schreibtisch mit PC, Drucker, Telefon, drei Ordnern (je 500 Blatt), Papierkorb und Schreibtischstuhl.



Brandlastwerte gemäß [Beilicke1990]

1 Schreibtisch	1331	MJ	
2 Beistelltische	je 233	MJ	
1 Drehstuhl	42	MJ	
1 PC	100	MJ	
1 Bildschirm	50	MJ	(10 MJ/ kg)
1 Drucker	100	MJ	
1 Stehlampe	20	MJ	
1 Telefon	42	MJ	
3 Ordner	125	MJ	
mit insgesamt 500 Blatt Papier			
<u>1 Papierkorb</u>	<u>17</u>	<u>MJ</u>	
	<u><math>\Sigma =</math></u>	<u><b>2293 MJ</b></u>	

Bezogen auf die Grundfläche von  $8 \text{ m}^2$  ( $2293 \text{ MJ} / 8 \text{ m}^2$ ) ergibt sich eine Brandlastdichte von  $255 \text{ MJ/m}^2$ . Zuzüglich eines Zuschlags für Unvorhergesehenes gemäß [DIN EN 1991-1-2] von pauschal  $50 \text{ MJ/m}^2$  ergibt sich für die Variante repräsentative Sitzgruppe eine Brandlastdichte von  **$\sim 300 \text{ MJ/m}^2$** .

## Anhang K Lokaler Brand nach Heskestad gemäß Eurocode 1

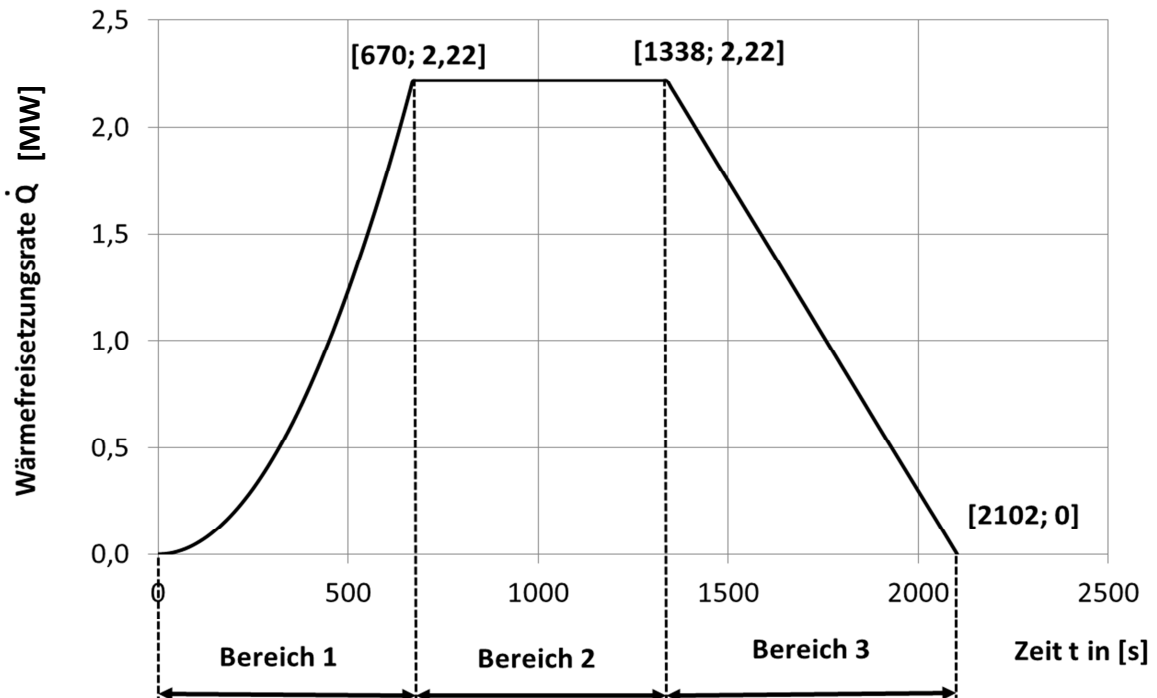


Abbildung 123: Wärmefreisetzung des lokalen Brandes nach Heskestad aus [DIN EN 1991-1-2]

Die Parameter stammen, sofern nicht explizit abweichende Quellen genannt werden, alle aus [DIN EN1991-1-2:2010] sowie [DIN EN1991-1-2/NA:2010]:

vorhandene Brandlastdichte	$q_{f,k} =$	400	[MJ/m <sup>2</sup> ]
<i>aus [Wilk2013c] und [Hosser2013]</i>			
Brandfläche	$A =$	9,00	[m <sup>2</sup> ]
<i>aus [Schleich1999] und Anhang J</i>			
Durchmesser des Brandes	$D =$	3,39	[m]
Brandlastentwicklung	$t_{\alpha} =$	450	[s]
<i>aus [Wilk2013c] und [Hosser2013]</i>			
Teilsicherheitsbeiwert für q	$\gamma_{fi,q} =$	0,981	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für RHR	$\gamma_{fi,RHR} =$	0,986	[-]
Verbrennungseffektivität	$\chi =$	0,8	[-]
Bemessungsbrandlastdichte	$q_{f,d} =$	313,9	[MJ/m <sup>2</sup> ]
Brandlast	$Q_d =$	2825,3	[MJ]
flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate	$RHR_f =$	0,25	[MW/m <sup>2</sup> ]
charakteristische Wärmefreisetzungsrate	$\dot{Q}_k =$	2,25	[MW]
Bemessungswärmefreisetzungsrate	$\dot{Q}_d =$	2,22	[MW]



Tabelle 25: Maximale Brandraumtemperaturen je Höhenabschnitt einer Stütze

<b>Abschnitt von - bis [m]</b>	<b>Höhe des Temp.- Messpunktes [m]</b>	<b>Abschnitts- länge [mm]</b>	<b>Temperatur je Abschnitt [°C]</b>
0,0 0,5	0,25	500	900,0
0,5 1,0	0,75	500	875,5
1,0 1,5	1,25	500	643,6
1,5 2,0	1,75	500	498,1
2,0 2,5	2,25	500	400,2
2,5 3,0	2,75	500	330,8
3,0 4,0	3,5	1000	259,0
4,0 5,0	4,5	1000	197,8
5,0 6,0	5,5	1000	158,3
6,0 7,0	6,5	1000	131,1
7,0 8,0	7,5	1000	111,6
8,0 9,0	8,5	1000	97,1
9,0 10,0	9,5	1000	85,9
10,0 11,0	10,5	1000	77,1
11,0 12,0	11,5	1000	70,0

## Anhang L Lokaler Brand mit dem H-D-Modell

Für die Berechnungen mit dem Heskestad-Delichatsios-Modell gelten dieselben Eingangswerte des lokalen Brandes wie beim klassischen Heskestad-Modell. In horizontalen Abständen von 0,5 m zur Centerline sowie in 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m 2,5 m und 3 m Entfernung werden die nachfolgenden Temperaturverläufe berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Messstellen seitlich neben der Plumeachse befinden, werden auch Temperaturen an Höhenknoten ausgegeben, die sich entlang der Plumeachse noch innerhalb der mittleren Flammenlänge (hier: 1,66 m) befänden.

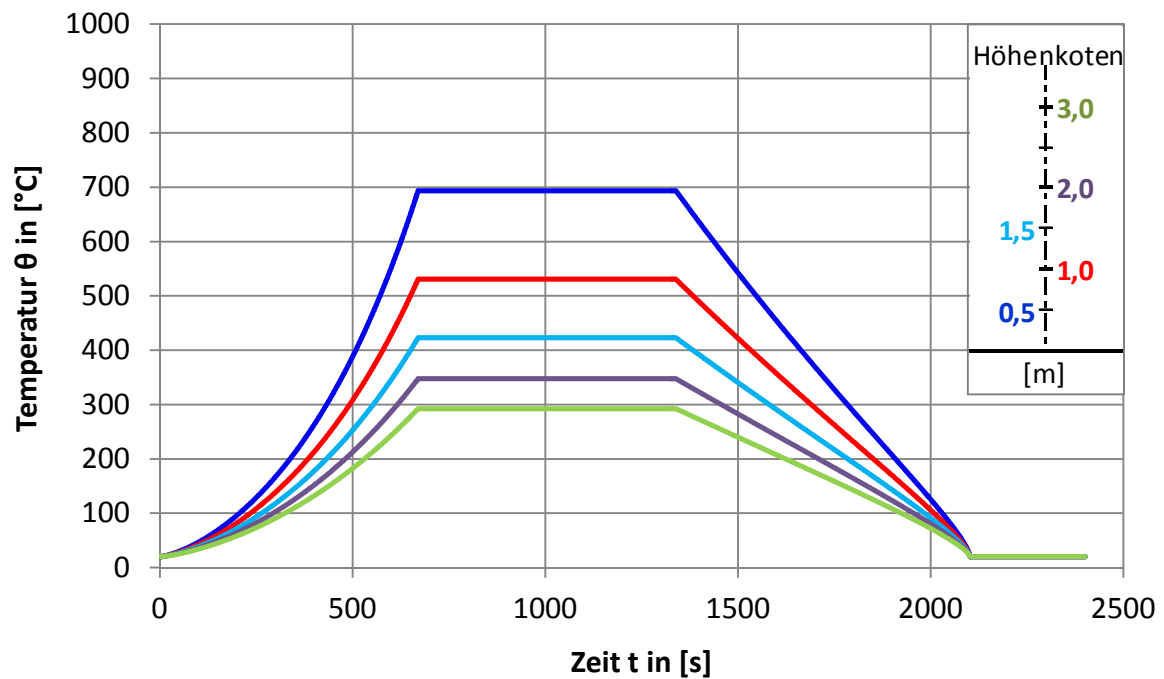
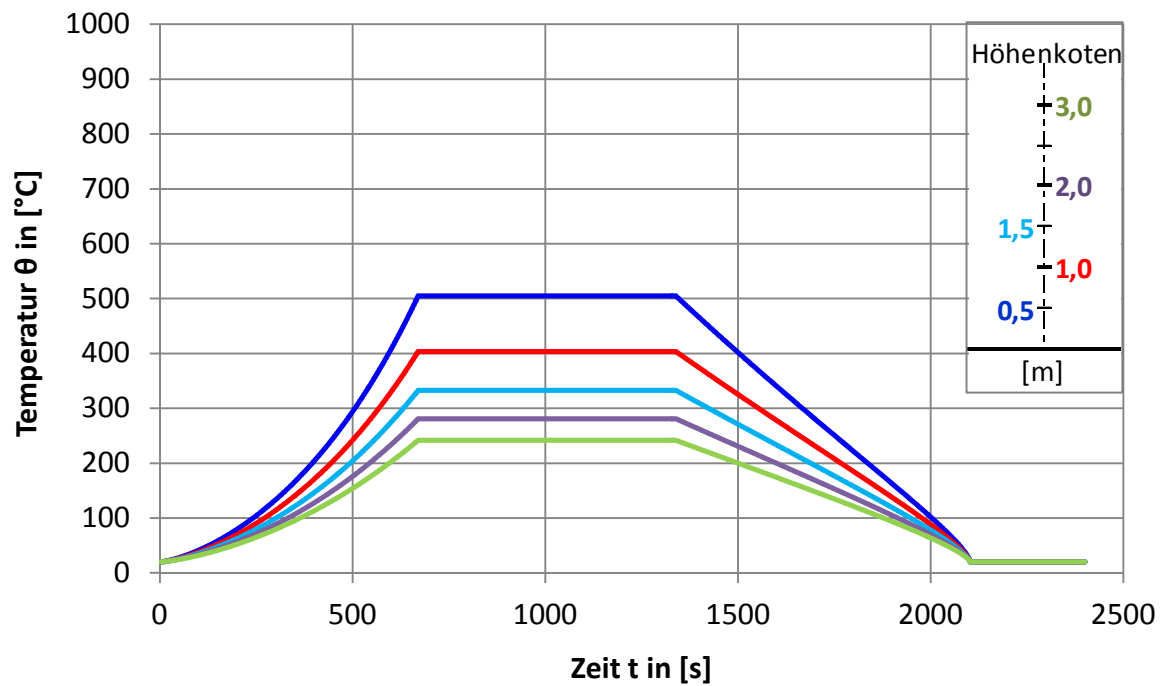
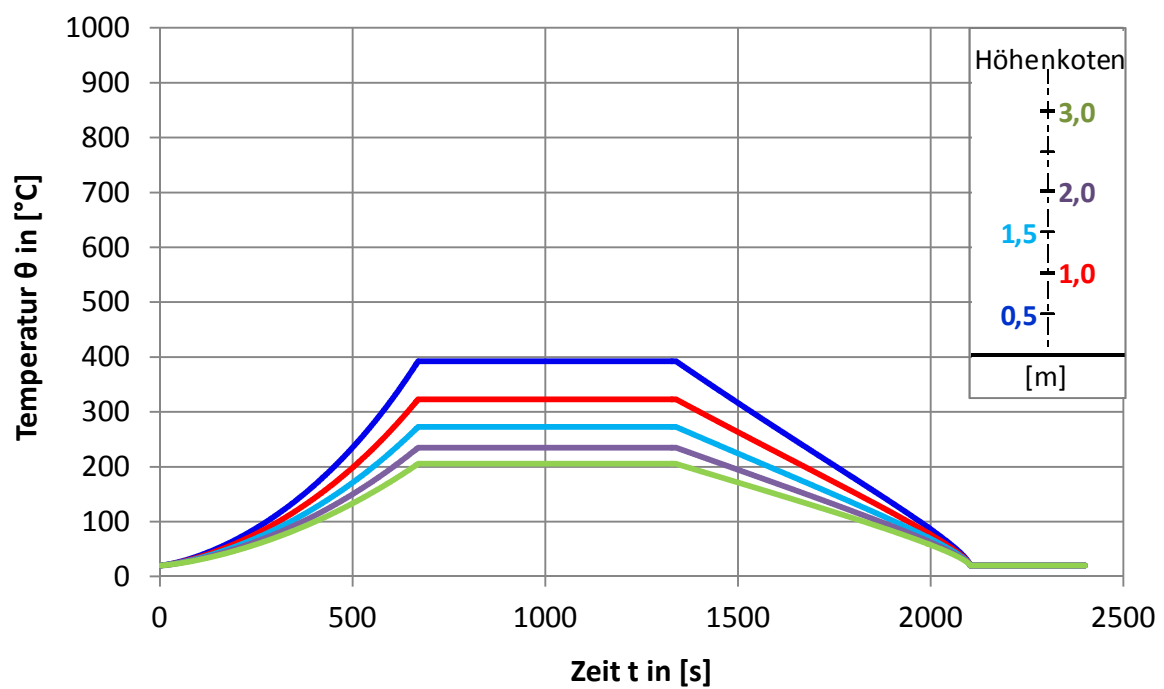


Abbildung 124: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit  $r = 0,5 \text{ m}$

Abbildung 125: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit  $r = 1,0 \text{ m}$ Abbildung 126: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit  $r = 1,5 \text{ m}$

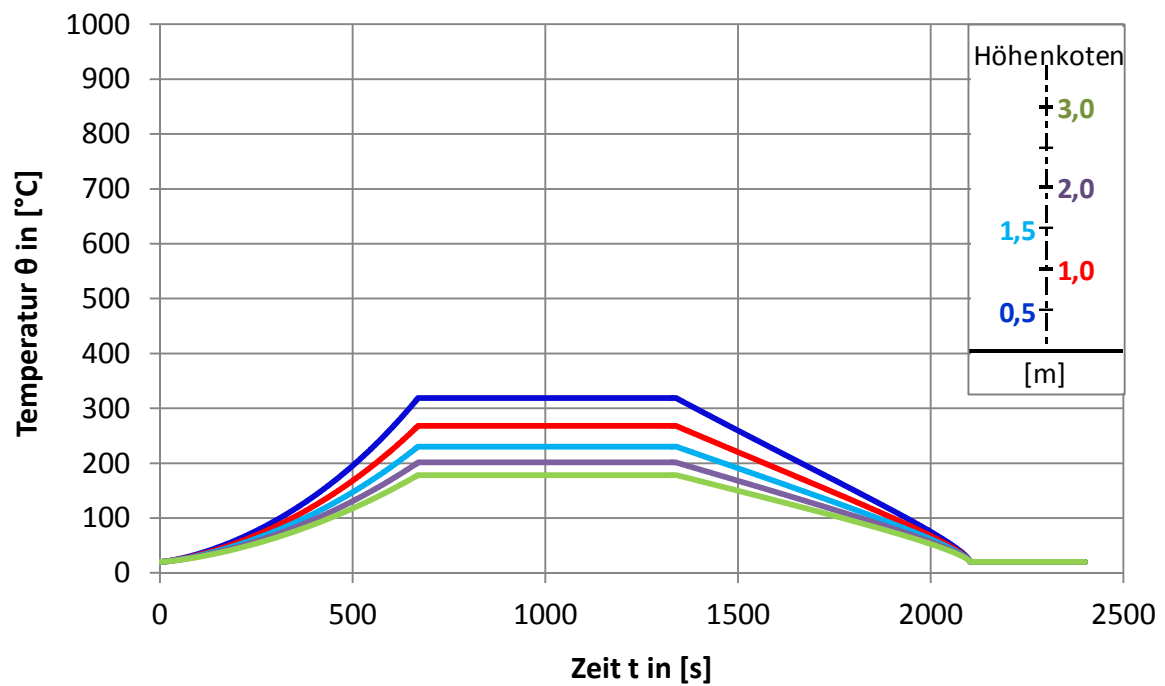
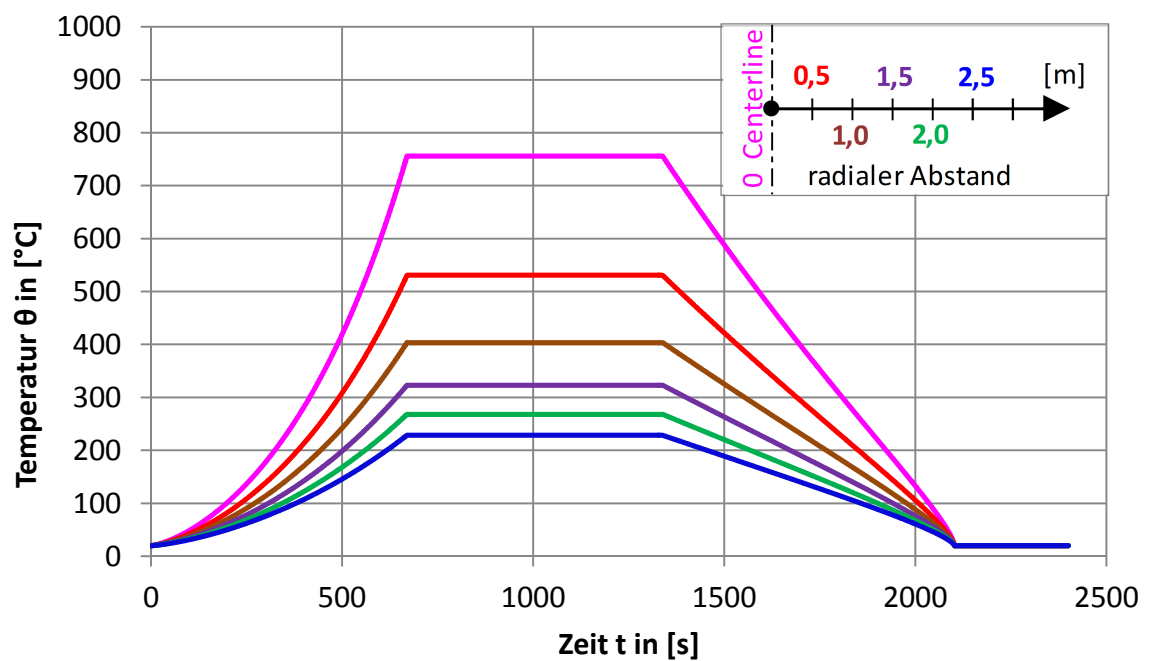
Abbildung 127: Höhenabhängige Temperaturverläufe gemäß H-D-Modell mit  $r = 2,0$  m

Abbildung 128: Temperaturverläufe, gestaffelt in horizontalen 0,5 m-Abständen zur Brandquelle jeweils in 1 m Höhe, gegenübergestellt

## Anhang M Lokaler Brand mit FDS

Nachfolgend sind die Ergebnisse der CFD-Simulation eines lokalen Brandes dargestellt. Die Randbedingungen und Eingangswerte sind in Kapitel 4.4.4 beschrieben. Die Temperatur-Messstellen befinden sich in Brandlastmitte sowie jeweils in Entfernungen von 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m (Rand der Brandlastfläche), 2,0 m, 2,5 m, 3,5 m und 4,5 m zur Centerline. Die Temperaturverläufe der einzelnen Messstellen sind mit zunehmendem Abstand zur Plume-Centerline sowie über die Höhe gestaffelt in Diagrammen dargestellt. Zur besseren Orientierung bei den Koordinaten siehe folgende Abbildung.

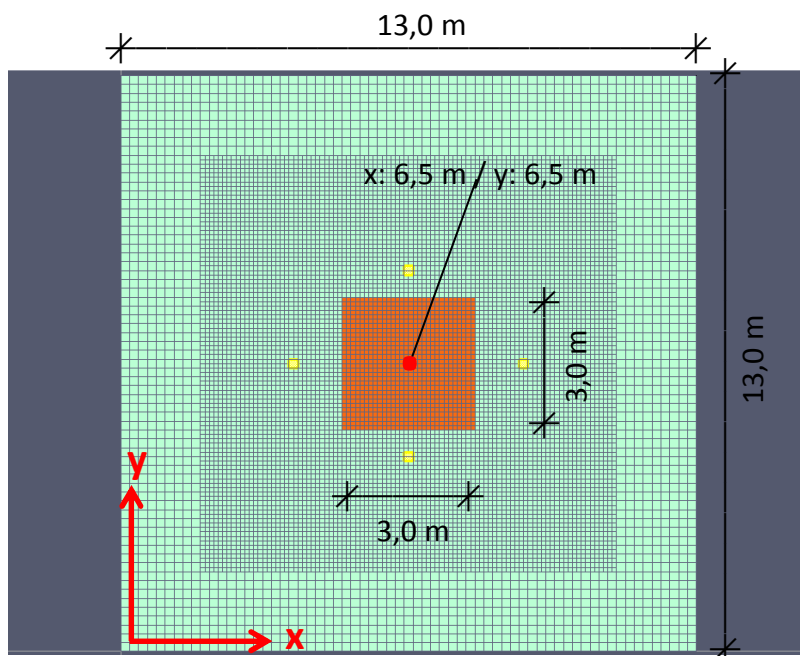


Abbildung 129: Übersicht der Brandraumgeometrie mit Koordinatenursprung u. Zellenraster

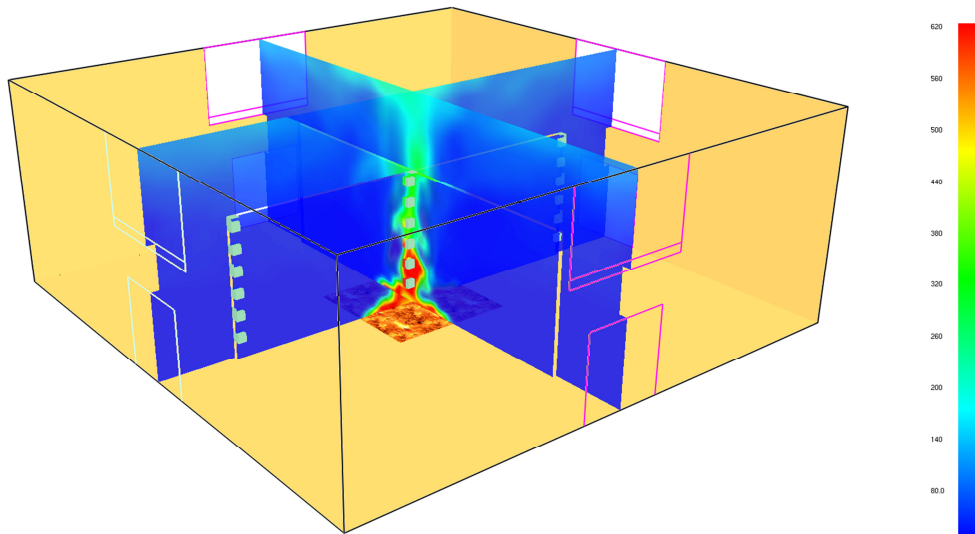


Abbildung 130: 3-D Screenshot zur maximalen Wärmefreisetzung, 15. Minute (900 Sekunden)

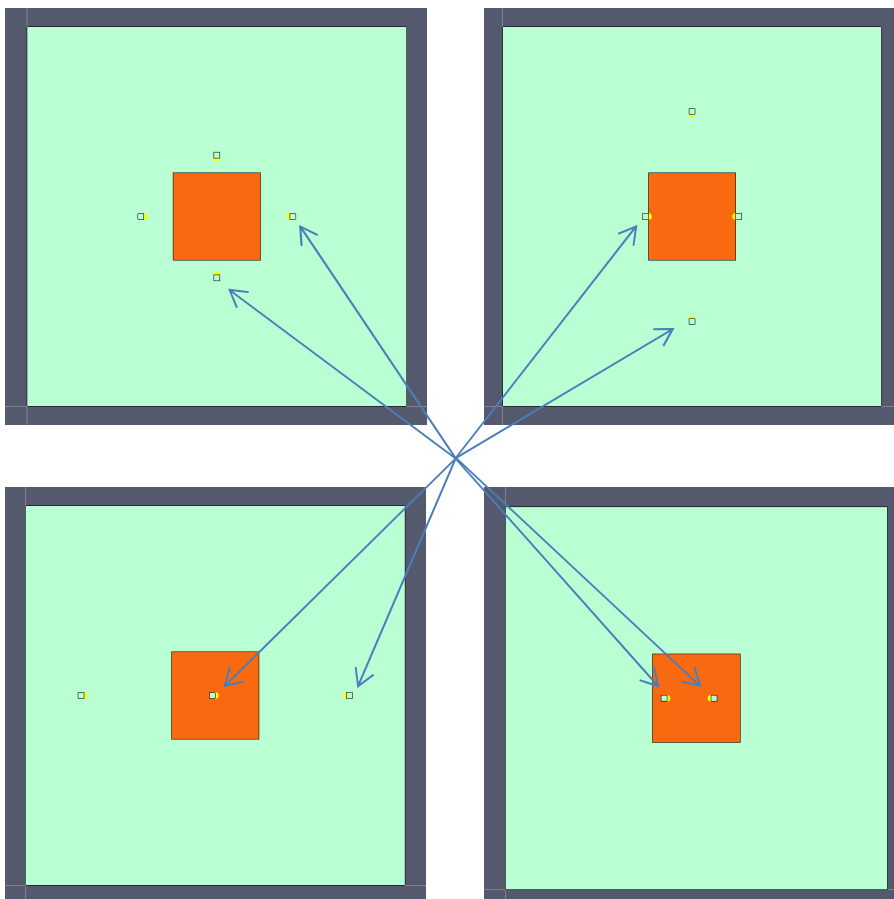


Abbildung 131: Positionen der Messstellen der einzelnen Rechengänge

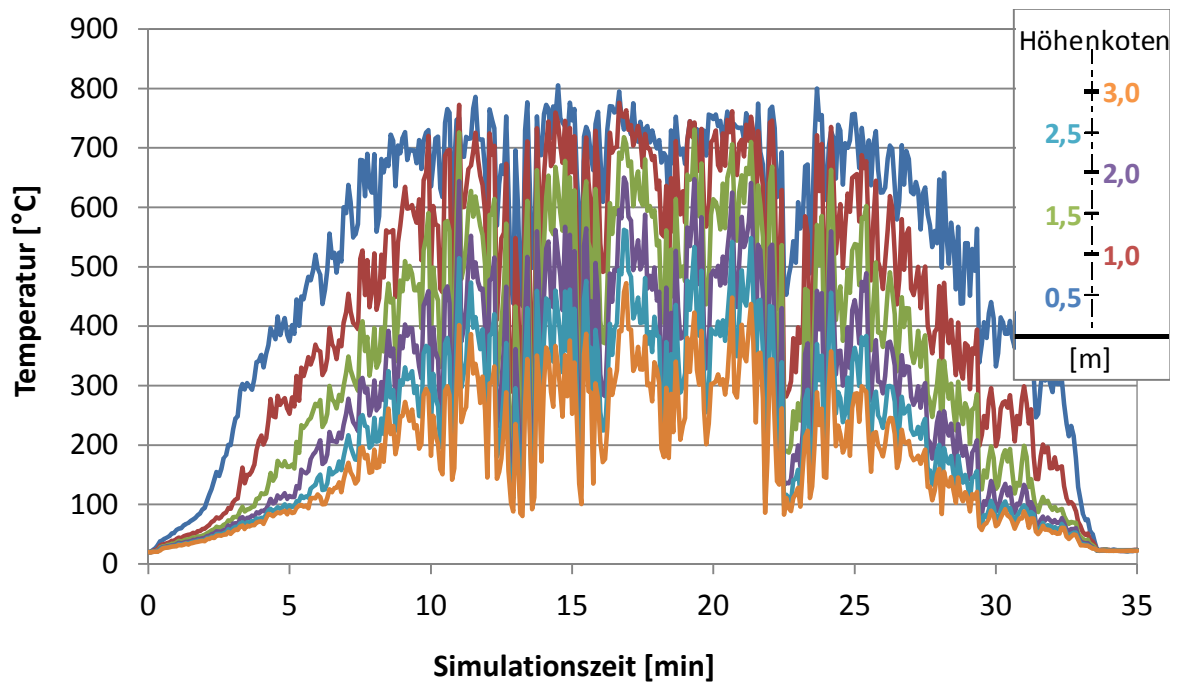


Abbildung 132: AST x = 6,5 m; y = 6,5 m (Centerline)

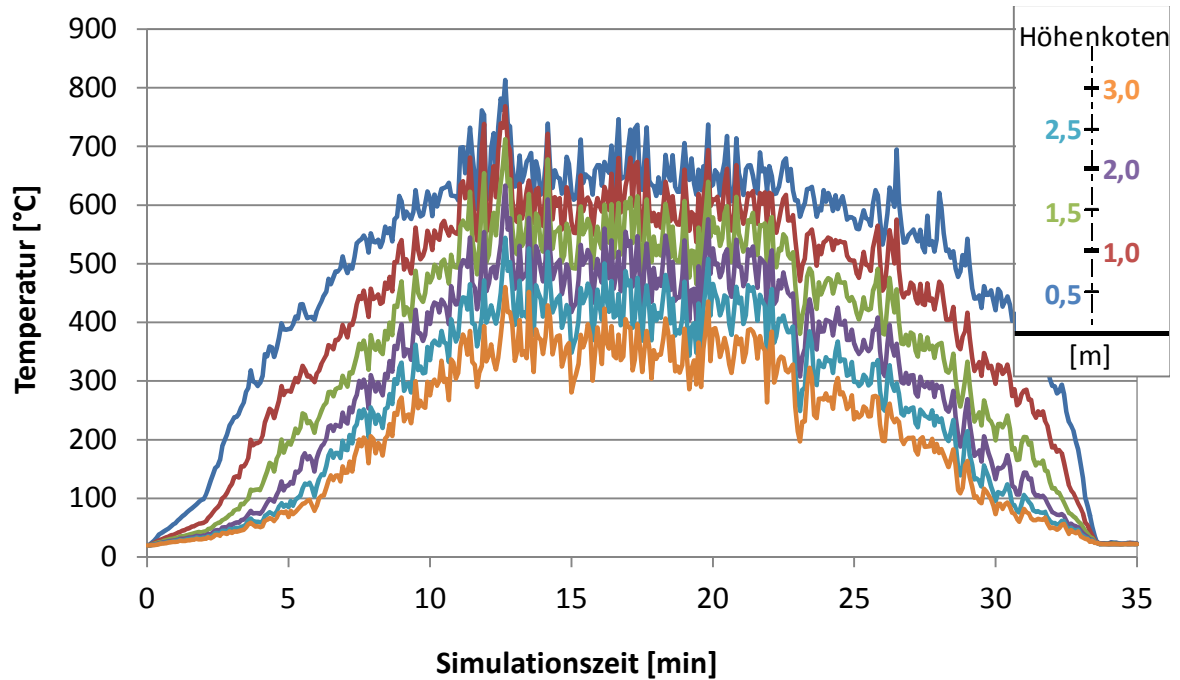


Abbildung 133: AST x = 7,0 m; y = 6,5 m (0,5 m horizontaler Abstand)

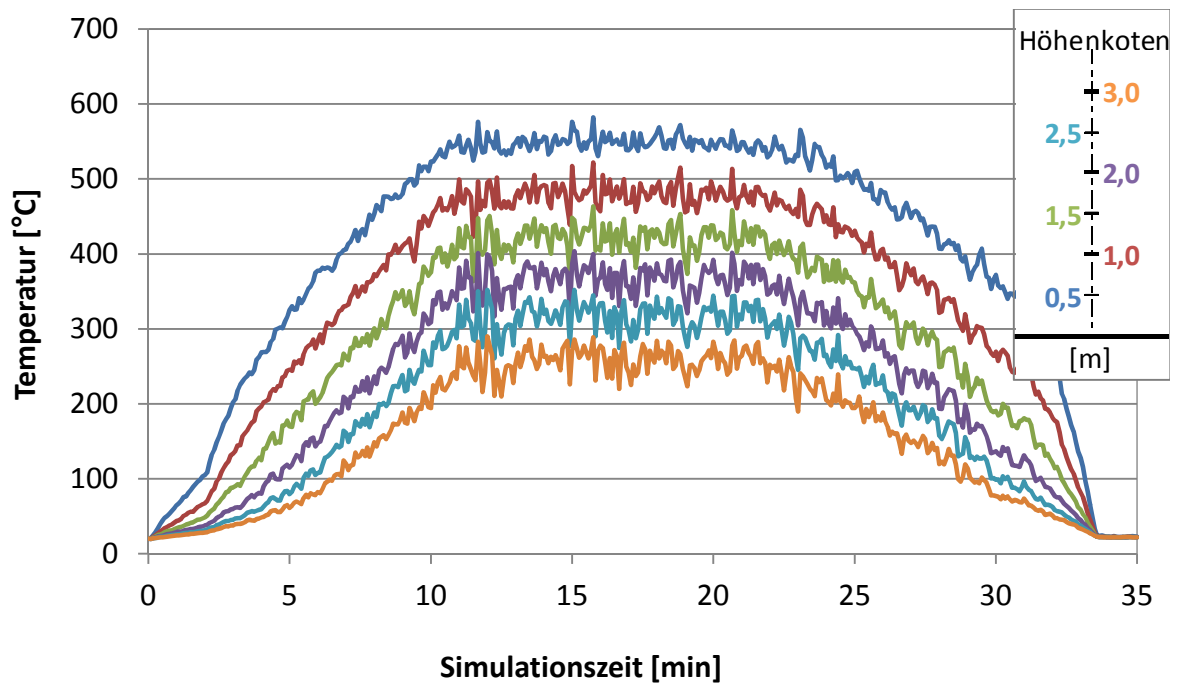


Abbildung 134: AST x = 5,5 m; y = 6,5 m (1,0 m horizontaler Abstand)

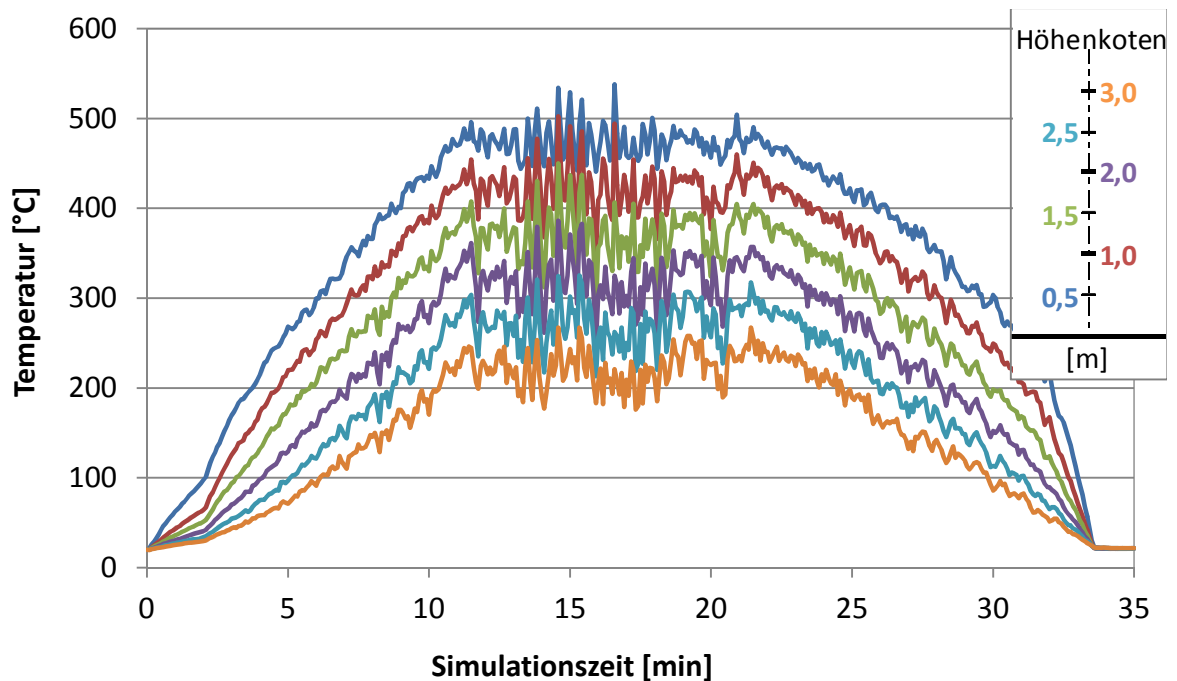


Abbildung 135: AST x = 5,0 m; y = 6,5 m (1,5 m horizontaler Abstand)



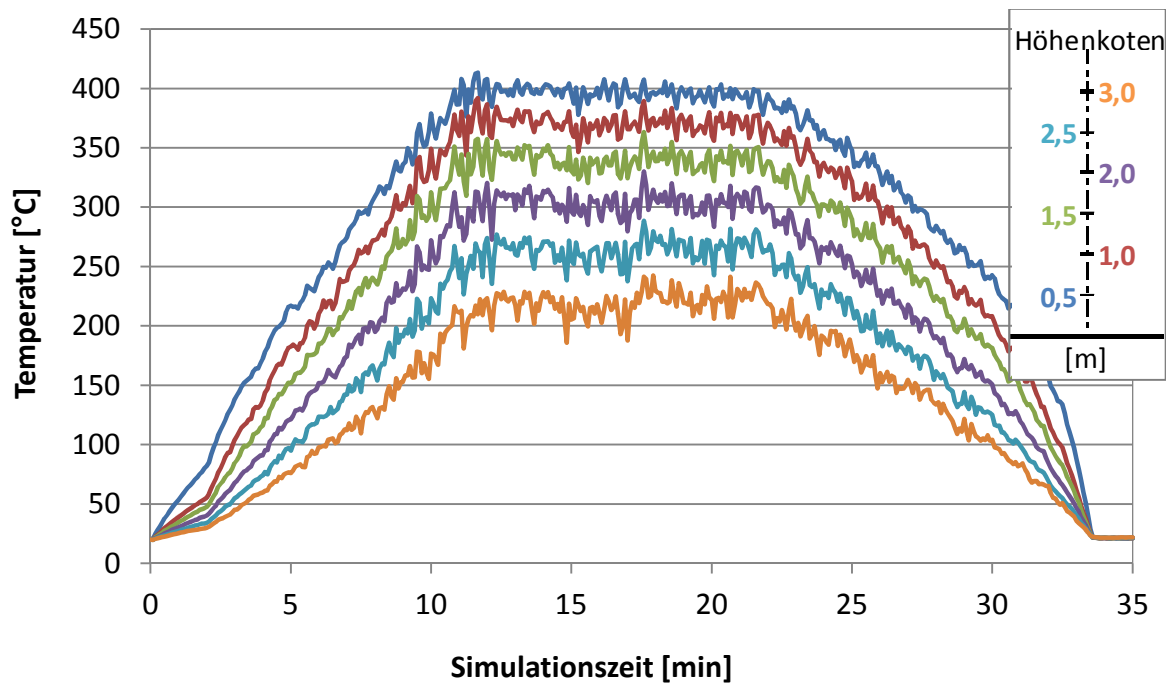


Abbildung 136: AST x = 6,5 m; y = 4,5 m (2,0 m horizontaler Abstand)

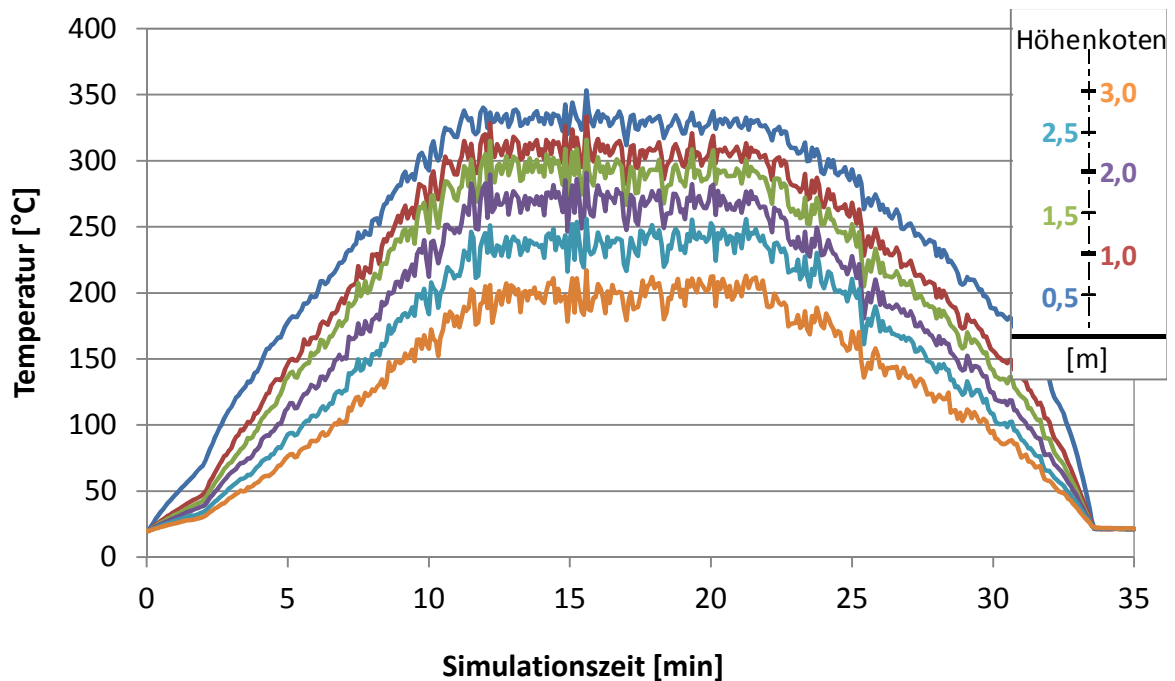


Abbildung 137: AST x = 4,0 m; y = 6,5 m (2,5 m horizontaler Abstand)

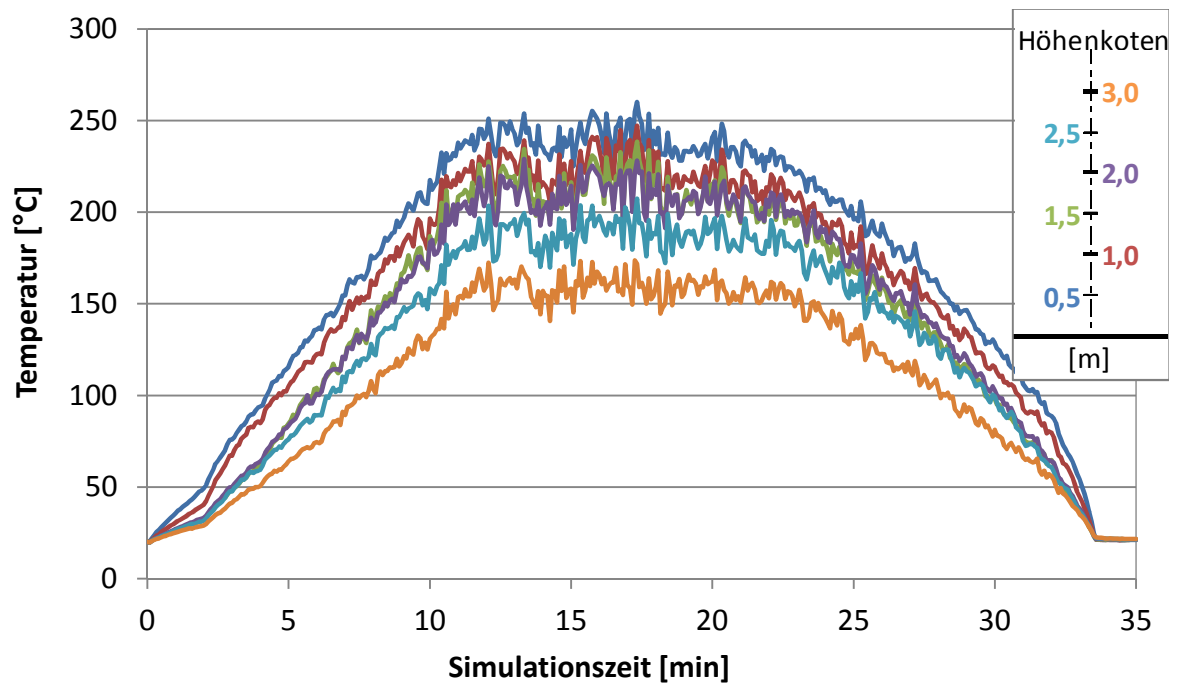


Abbildung 138: AST x = 6,5 m; y = 3,0 m (3,5 m horizontaler Abstand)

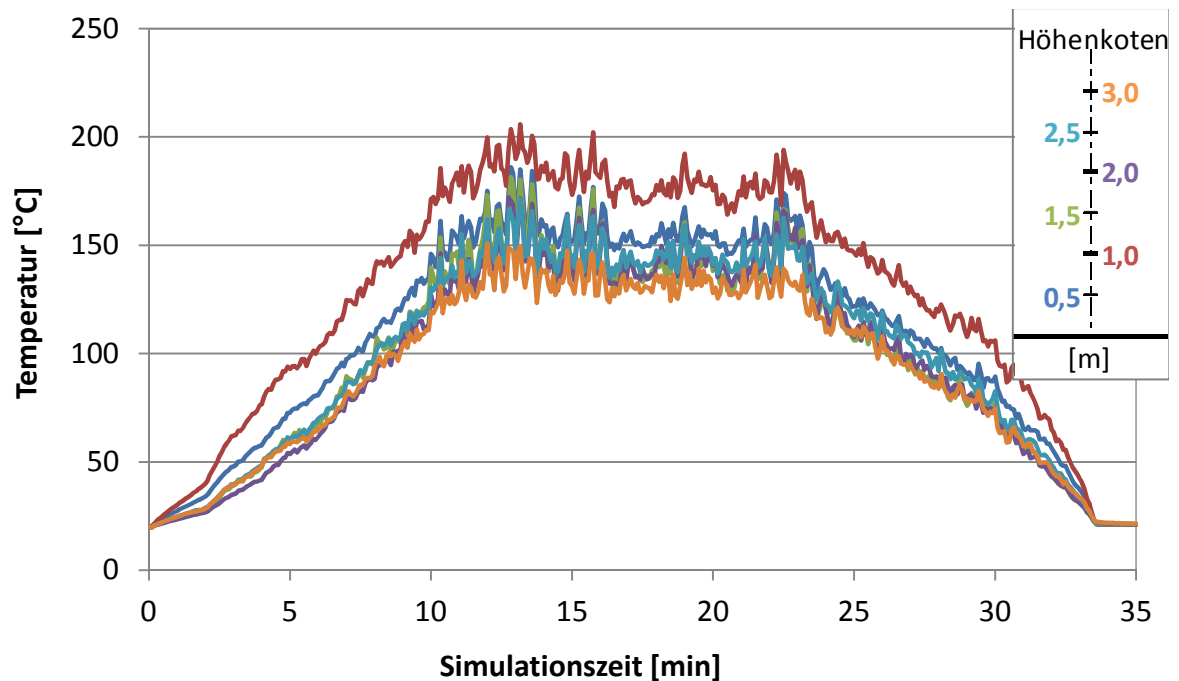


Abbildung 139: AST x = 2,0 m; y = 6,5 m (4,5 m horizontaler Abstand)

## Anhang N                      Steifigkeitsverhältnisse von Riegel-Stiel-Anschlüssen im Atrium und Foyer

### 5 m-Foyerstütze im aufgehenden Gebäude:

<u>Stütze:</u> RO 406,4 x 45	E = 21.000 kN/cm <sup>2</sup>
(S235)	A = 511 cm <sup>2</sup>
	EA = 10.731.000 kN

<u>Riegel:</u> h / b = 50 / 100 cm	E = 3.300 kN/cm <sup>2</sup>
(C30/37)	I <sub>y</sub> = 1.040.000 cm <sup>4</sup>
	EI = 3.432.120.000 kN cm <sup>2</sup>

Die Regelgeschossdecke misst h = 28 cm (Meterstreifen). Bei Unterstellung einer dehnstarrten Kopplung wird die gesamte Biegesteifigkeit (EI) aller aufgehenden Geschosse berücksichtigt. Das entspricht einer Deckendicke von h = 50 cm, siehe auch Seite 116.

Das Verhältnis von der Biegesteifigkeit zur Dehnsteifigkeit beträgt bei Raumtemperatur:

$EI_{\text{Riegel}} / EA_{\text{Stütze}} = 320 \text{ [kNcm}^2/\text{kN]}$
--

### 12 m-Atriumstütze im eingeschossigen Gebäudeteil:

<u>Stütze:</u> RO 323,9 x 5,0	E = 21.000 kN/cm <sup>2</sup>
(S235)	A = 50,1 cm <sup>2</sup>
	EA = 1.052.100 kN

<u>Riegel:</u> IPE 450	E = 21.000 kN/cm <sup>2</sup>
(S235)	I <sub>y</sub> = 33.740 cm <sup>4</sup>
	EI = 708.540.000 kN cm <sup>2</sup>

Das Verhältnis von der Biegesteifigkeit zur Dehnsteifigkeit beträgt bei Raumtemperatur:

$EI_{\text{Riegel}} / EA_{\text{Stütze}} = 673 \text{ [kNcm}^2/\text{kN]}$
--

## Anhang O Stützenbemessung bei Raumtemperatur

Im Sinne einer Vorbemessung werden nachfolgend die gewählten Stützenquerschnitte der einzelnen Kategorien jeweils bei Raumtemperatur nachgewiesen. Dabei wird das Programm *STS Stahlstütze* der Nemetschek FriLo GmbH auf Basis von [DIN EN1993-1-2:2010] verwendet. Die Lastannahmen entsprechen Anhang I. Beispielfhaft wird die erste Stütze ausführlich nachgewiesen. Für die nachfolgenden Querschnitte werden lediglich die Ergebnisse dargestellt.

### Kategorie 1: Kleines Foyer 5,00 m:

RO 406,4 x 45 (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,79</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,83</b>
HD 400 x 463 (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,68</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,81</b>

### Kategorie 2: Mittleres Foyer 8,40 m:

RO 406,4 x 45 (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,68</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,80</b>
HD 400 x 551 (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,49</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,77</b>

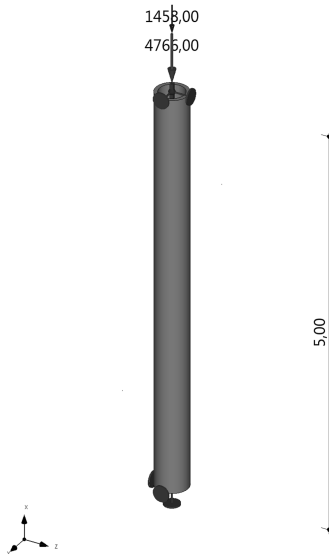
### Kategorie 3: Großes Atrium 12,0 m:

RO 323,9 x 5,0 (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,37</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,70</b>
HE 300-A (S235):	Ausnutzung Spannungsnachweis (E-E):	<b>0,26</b>
	Ausnutzung Biegeknicknachweis:	<b>0,77</b>

**PENDELSTÜTZE**

h = 5.00 m

Automatischer Ansatz des Eigengewichtes (Last 1)

g<sub>0</sub> = 4.01 kN/m**MATERIAL: S235**E<sub>k</sub> = 21000 kN/cm<sup>2</sup>G<sub>k</sub> = 8077 kN/cm<sup>2</sup>t ≤ b<sub>fy</sub> [cm]f<sub>y</sub> [kN/cm<sup>2</sup>]

4.00

23.50

8.00

21.50

**QUERSCHNITTSWERTE:**

RO 406.4 X 45 - S235 (warmgewalzt)

Nr.	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	W <sub>y</sub> [cm <sup>3</sup> ]	W <sub>z</sub> [cm <sup>3</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
1	84710	84710	4170	4170	511

**KNOTENLASTEN**

Nr.	Art	G <sub>k</sub> [kN,m]	Q <sub>k</sub> [kN,m]	Abst [m]	e <sub>y</sub> [cm]	e <sub>z</sub> [cm]	EG,ZG,AG	Pos.
1	1	20.06	0.0	5.0	0.0	0.0	99	Eigengewicht
2	1	4766	1458	5.0	0.0	0.0	2	Vg,k+Vq,k

**BEMESSUNG NACH DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12****Nachweis Querschnittstragfähigkeit nach Gl.(6.1):** γ<sub>M0</sub> = 1.00

x	Pkt.	QKL	σ <sub>x</sub>	τ <sub>xz</sub>	σ <sub>v</sub>	f <sub>yd</sub>	η
[m]	[-]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[-]
0.00	0	1	-16.92	0.00	16.92	21.50	0.79

**Nachweis bei zentrischer Normalkraft [Gl.(6.46), Anhang A]**N<sub>Ed</sub> / (χ<sub>y</sub> \* N<sub>Rk</sub> / γ<sub>M1</sub>) = 0.83N<sub>Ed</sub> / (χ<sub>z</sub> \* N<sub>Rk</sub> / γ<sub>M1</sub>) = 0.83

## Anhang P Stützenbemessung im Brandfall nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren (Level 2)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Berechnungen aus *Elefir-EN* dargestellt. Dabei wurde der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$  berücksichtigt. Die Emissivität der Bauteiloberfläche beträgt  $\varepsilon_m = 0,7$ , die des Feuers  $\varepsilon_f = 1,0$ . Den Ergebnissen der I-Profile liegt der modifizierte Profilmfaktor zugrunde, welcher über den Korrekturfaktor  $k_{sh}$  gemäß [DIN EN1993-1-2:2010] die Abschattungseffekte mit berücksichtigt. Auf konvexe Profile, wie die Hohlprofil-Rohrquerschnitte hat der Korrekturfaktor  $k_{sh}$  keinen Einfluss. Für die erste Stütze wird der ausführliche Programmausdruck gewählt, für die weiteren erfolgt lediglich die verkürzte Fassung:

**Kategorie 1, Kleines Foyer: L = 5,0 m,  $N_{fi,Ed} = 5495 \text{ kN}$ , RO 406,4 x 45; z = 0,5 m**



Project name: Atrium- und Foyerstützen im Brandfall

Date: 12/03/2015

$\gamma_{M0} = 1.00$

$\gamma_{M,fi} = 1.00$

Temperature evaluated using interpolation on the table 3.1 from EN 1993-1-2.

### PROFILE

#### **RO 406,4 x 45 (Class 1)**

d = 406.4 mm

t = 45 mm

A = 51092 mm<sup>2</sup>

P = 1.277 m<sup>2</sup>/m

$i_y = 128.8 \text{ mm}$

$i_z = 128.8 \text{ mm}$

### STEEL

Carbon steel, S235 H (EN 10210-1)

Young modulus: 210 GPa

### ELEMENT SUBMITTED TO COMPRESSION

System length: L = 5000 mm

Buckling coefficients:  $i_{y,fi}/L_y = 1$ ;  $i_{z,fi}/L_z = 1$

Critical temperature function of axial load:  $N_{fi,Ed} = 5495 \text{ kN}$

### EXPOSURE

Section protection: No protection

### LOCALISED FIRE

Fire load density:  $q_{f,d} = 313.9 \text{ MJ/m}^2$

Distance from fire source to ceiling: H = 11.5 m

Maximum area of fire:  $A_{fi} = 9 \text{ m}^2$

Height to calculate temperature: z = 0.5 m

**Flame doesn't impact the ceiling of the compartment**

**RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$

**Flame**

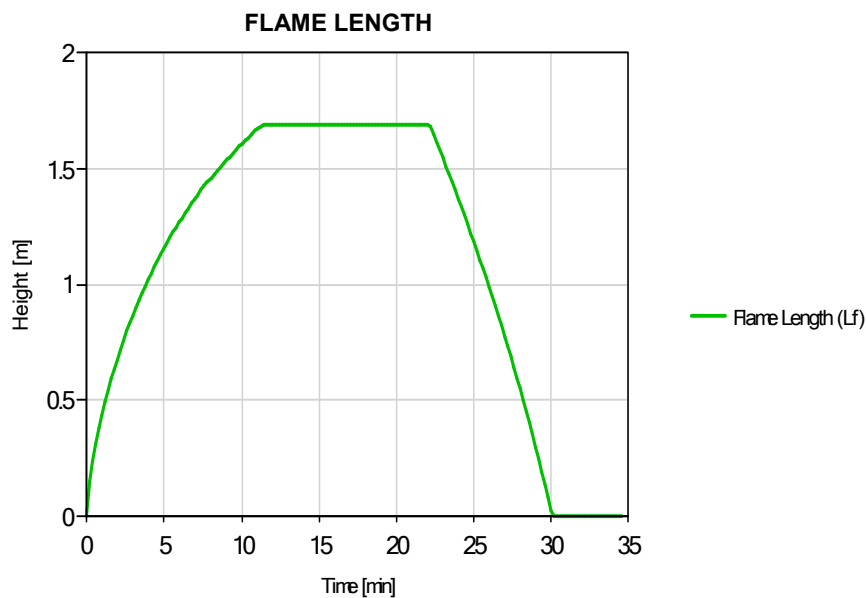
Maximum length,  $L_f$ : 1.69 m at 11.25 min  
 The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

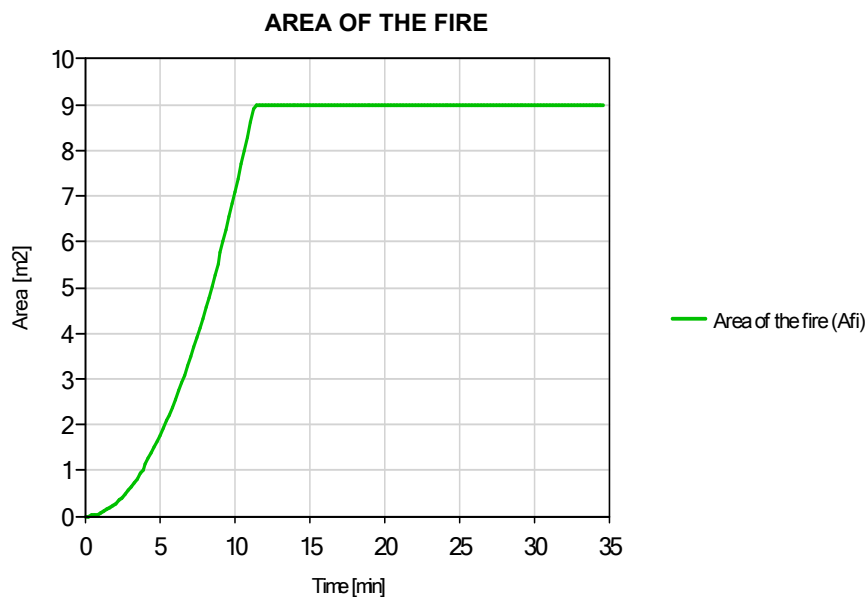
Maximum temperature: 900.0 °C  
 Time to reach maximum temperature: 2.62 min  
 Fuel controlled fire.

**Steel**

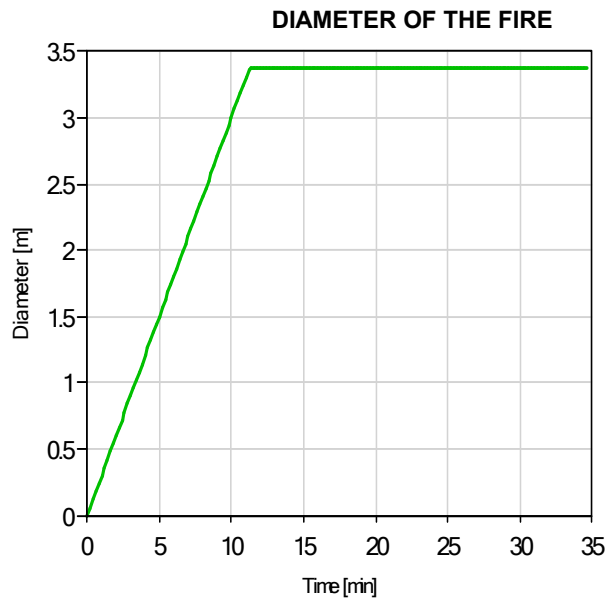
Maximum temperature: 642.8 °C / Critical temperature: 530.9 °C  
 Time to reach maximum temperature: 26.70 min  
 The **critical temperature** of 530.9 °C is reached after 18.3 minutes.

**GRAPHS**

Maximum flame length: 1.69 m  
 Flame length corresponding to RHR peak value: 1.69 m

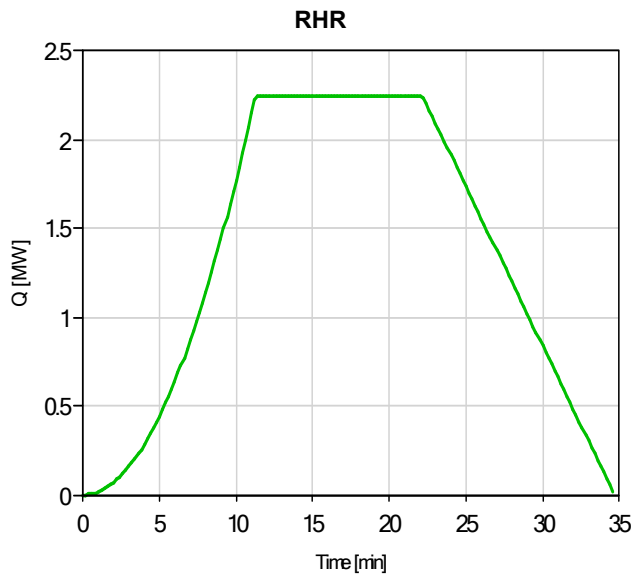


Maximum area of the fire: 9.00 m<sup>2</sup>



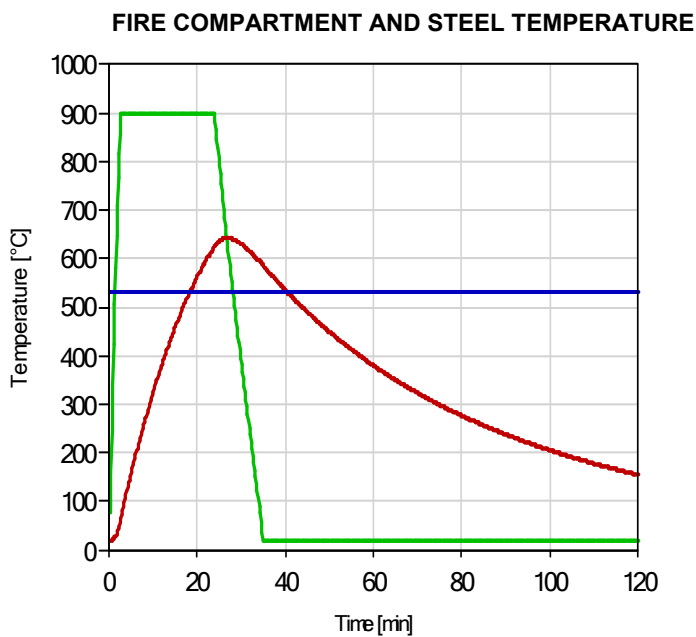
— Diameter of the fire (D)

Maximum diameter of the fire: 3.39 m



— RHR

Maximum rate of heat release: 2.25 MW



— Flame  
— Steel  
— Critical temperature

[Maximum temperature]  
Compartment: 900.0 °C  
at 2.62 min  
  
Steel: 642.8 °C  
at 26.70 min



**Kategorie 1, Kleines Foyer: L = 5,0 m,  $N_{fi,Ed} = 5495$  kN, RO 406,4 x 45; z = 1,0 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame temperature**

Maximum temperature: 757.2 °C

Time to reach maximum temperature: 11.25 min

Fuel controlled fire.

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment

**Steel**

Maximum temperature: 434.6 °C /

Critical temperature: 530.9 °C

Time to reach maximum temperature: 27.42 min

The critical temperature is **not reached** during the fire

**Kategorie 1, Kleines Foyer: L = 5,0 m,  $N_{fi,Ed} = 5495$  kN, RO 406,4 x 45;  
r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C

Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 327.1 °C /

Critical temperature: 530.9 °C

Time to reach maximum temperature: 29.00 min

The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 1, Kleines Foyer: L = 5,0 m,  $N_{fi,Ed} = 5495$  kN, HD 400 x 463; z = 0,5 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 463 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 41.1 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 28.7 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Steel**

Maximum temperature: 682.6 °C /

Critical temperature: 544.7 °C (weak axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 26.23 min

The critical temperature of 544.7 °C **is reached** after 16.7 minutes.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 900.0 °C

Time to reach maximum temperature: 2.62 min

Fuel controlled fire.

**Kategorie 1, Kleines Foyer: L = 5,0 m,  $N_{fi,Ed} = 5495$  kN, HD 400 x 463; z = 1,0 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 463 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 41.1 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 28.7 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Steel**

Maximum temperature: 470.9 °C /

Critical temperature: 544.7 °C (weak axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 26.78 min

The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 757.2 °C

Time to reach maximum temperature: 11.25 min

Fuel controlled fire.

**Kategorie 1, Kleines Foyer:**  $L = 5,0 \text{ m}$ ,  $N_{fi,Ed} = 5495 \text{ kN}$ , **HD 400 x 463;**  
 $r = 0,5 \text{ m} / z = 0,5 \text{ m}$  (H-D-Modell)

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 463 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 41.1 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 28.7 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Fire compartment**

Maximum temperature:  $693.0 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature:  $357.5 \text{ }^\circ\text{C}$  /  
 Critical temperature:  $544.7 \text{ }^\circ\text{C}$  (weak axis z-z)  
 Time to reach maximum temperature: 28.00 min  
 The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer:**  $L = 8,4 \text{ m}$ ,  $N_{fi,Ed} = 4843 \text{ kN}$ , **RO 406,4 x 45;**  $z = 0,5 \text{ m}$

**ELEFIR-EN RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length,  $L_f$ : 1.69 m at 11.25 min  
 The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature:  $900.0 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 2.62 min  
 Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature:  $642.8 \text{ }^\circ\text{C}$  /  
 Critical temperature:  $500.8 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 26.70 min  
 The critical temperature of  $500.8 \text{ }^\circ\text{C}$  is **reached** after 16.8 minutes.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer:**  $L = 8,4 \text{ m}$ ,  $N_{fi,Ed} = 4843 \text{ kN}$ , **RO 406,4 x 45;**  $z = 1,0 \text{ m}$

**ELEFIR-EN RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length,  $L_f$ : 1.69 m at 11.25 min  
 The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature:  $757.2 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 11.25 min  
 Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature:  $434.6 \text{ }^\circ\text{C}$  /  
 Critical temperature:  $500.8 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 27.42 min  
 The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer:**  $L = 8,4 \text{ m}$ ,  $N_{fi,Ed} = 4843 \text{ kN}$ , **RO 406,4 x 45;**  
 $r = 0,5 \text{ m} / z = 0,5 \text{ m}$  (H-D-Modell)

**ELEFIR-EN RESULTS**

RO 406,4 x 45 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 25.0 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Fire compartment**

Maximum temperature:  $693.0 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature:  $327.1 \text{ }^\circ\text{C}$  /  
 Critical temperature:  $500.8 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Time to reach maximum temperature: 29.00 min  
 The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer: L = 8,4 m,  $N_{fi,Ed} = 4843$  kN, HD 400 x 551; z = 0,5 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 551 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 35.2 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 24.9 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 900.0 °C

Time to reach maximum temperature: 2.62 min

Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature: 641.6 °C /

Critical temperature: 538.6 °C (weak axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 26.70 min

The critical temperature of 538.6 °C **is reached** after 18.7 minutes.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer: L = 8,4 m,  $N_{fi,Ed} = 4843$  kN, HD 400 x 551; z = 1,0 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 551 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 35.2 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 24.9 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 757.2 °C

Time to reach maximum temperature: 11.25 min

Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature: 433.7 °C /

Critical temperature: 538.6 °C (weak axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 27.43 min

The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 2, Mittleres Foyer: L = 8,4 m,  $N_{fi,Ed} = 4843$  kN, HD 400 x 551;  
r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HD 400 x 551 (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 35.2 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 24.9 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C

Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 326.3 °C /

Critical temperature: 538.6 °C (weak axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 29.00 min

The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m,  $N_{fi,Ed} = 245$  kN, RO 323,9 x 5; z = 0,5 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

CHS 323.9 x 5.0 (Class 3)

Section factor:  $[A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 900.0 °C

Time to reach maximum temperature: 2.62 min

Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature: 900.0 °C /

Critical temperature: 547.5 °C

Time to reach maximum temperature: 23.83 min

The critical temperature of 547.5 °C **is reached** after 3.7 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, RO 323,9 x 5; z = 1,0 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

CHS 323.9 x 5.0 (Class 3)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Flame temperature**

Maximum temperature: 757.2 °C  
 Time to reach maximum temperature: 11.25 min  
 Fuel controlled fire.

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min  
 The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Steel**

Maximum temperature: 743.5 °C /  
 Critical temperature: 547.5 °C  
 Time to reach maximum temperature: 22.35 min  
 The critical temperature of 547.5 °C **is reached** after 8.4 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, RO 323,9 x 5;  
 r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

CHS 323.9 x 5.0 (Class 3)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 203.6 \text{ m}^{-1}$

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C  
 Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 683.9 °C /  
 Critical temperature: 547.5 °C  
 Time to reach maximum temperature: 22.00 min  
 The critical temperature of 547.5 °C **is reached** after 13.3 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, RO 323,9 x 10;  
 r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

CHS 323.9 x 10.0 (Class 1)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 103.4 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 103.4 \text{ m}^{-1}$

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C  
 Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 625.1 °C /  
 Critical temperature: 645.1 °C  
 Time to reach maximum temperature: 23.00 min  
 The critical temperature is **not reached** during the fire.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, HE 300-A; z = 0,5 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HE 300 A (Class 2)  
 Section factor:  $[A_m/V] = 152.9 \text{ m}^{-1}$   
 Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 104.9 \text{ m}^{-1}$   
 Fire exposure: Fire on all sides  
 Fire protection: No protection

**Flame**

Maximum length, Lf: 1.69 m at 11.25 min  
 The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

**Flame temperature**

Maximum temperature: 900.0 °C  
 Time to reach maximum temperature: 2.62 min  
 Fuel controlled fire.

**Steel**

Maximum temperature: 897.2 °C /  
 Critical temperature: 578.1 °C (weak axis z-z)  
 Time to reach maximum temperature: 23.85 min  
 The critical temperature of 578.1 °C **is reached** after 6.2 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, HE 300-A; z = 1,0 m**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HE 300 A (Class 2)

Section factor:  $[A_m/V] = 152.9 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 104.9 \text{ m}^{-1}$

**Flame temperature**

Maximum temperature: 757.2 °C

Time to reach maximum temperature: 11.25 min

Fuel controlled fire.

**Flame**

Maximum length, L<sub>f</sub>: 1.69 m at 11.25 min

The flame doesn't impact the ceiling of the compartment.

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: No protection

**Steel**

Maximum temperature: 720.7 °C /

Critical temperature: 578.1 °C (week axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 22.70 min

The critical temperature of 578.1 °C **is reached** after 12.6 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, HE 300-A;  
r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HE 300 A (Class 2)

Section factor:  $[A_m/V] = 152.9 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 104.9 \text{ m}^{-1}$

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C

Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 627.1 °C /

Critical temperature: 578.1 °C (week axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 23.00 min

The critical temperature of 578.1 °C **is reached** after 19.1 minutes.

**Kategorie 3, Großes Atrium: L = 12,0 m, N<sub>fi,Ed</sub> = 245 kN, HE 300-B;  
r = 0,5 m / z = 0,5 m (H-D-Modell)**

**ELEFIR-EN RESULTS**

HE 300 B (Class 1)

Section factor:  $[A_m/V] = 116.0 \text{ m}^{-1}$

Modified section factor:  $k_{sh} [A_m/V] = 80.5 \text{ m}^{-1}$

**Fire compartment**

Maximum temperature: 693.0 °C

Time to reach maximum temperature: 11.02 min

**Steel**

Maximum temperature: 583.8 °C /

Critical temperature: 618.5 °C (week axis z-z)

Time to reach maximum temperature: 24.00 min

The critical temperature is not reached during the fire.

## Anhang Q Stützenbemessung im Brandfall nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren (Level 3)

In Ergänzung zu den Kapiteln 4.6.2 bis 4.6.4 werden nachfolgend die Ergebnisse der Berechnungen aus *SAFIR* für die Stützen der drei Foyer-Kategorien dargestellt. Dafür wurden die Stützen in Teilabschnitte aufgeteilt, um so einen Temperaturgradienten in Stützenlängsrichtung zu erzeugen. Die äußeren Temperaturprofile sind in Abbildung 140 zusammengefasst.

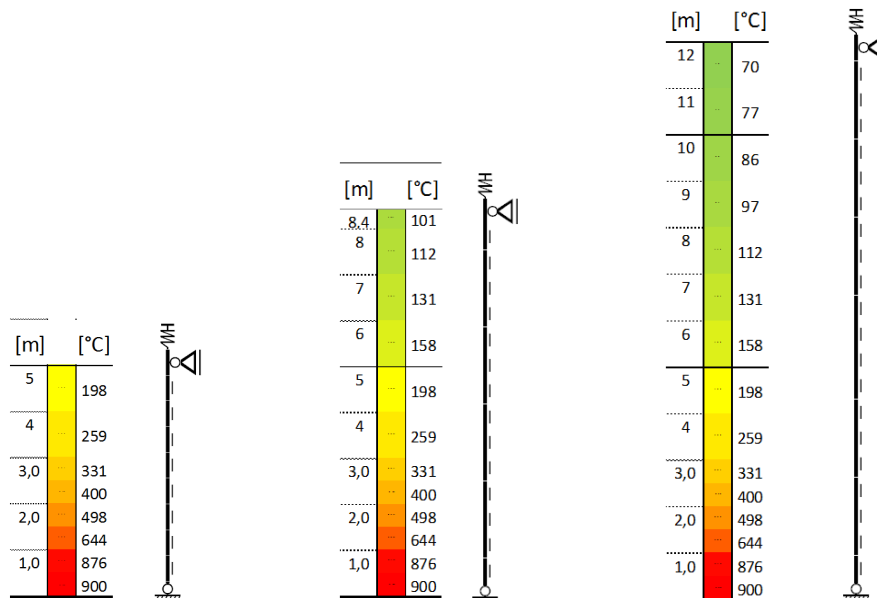


Abbildung 140: Die äußeren Temperaturgradienten infolge des lokalen Brandes für die Stützen der Foyer-Kategorien 1, 2 und 3

Für die jeweils unteren Stützenabschnitte kann nachfolgenden Abbildungen das jeweils auftretende Temperaturprofil im jeweiligen Hohlprofil entnommen werden. Es zeigt die Temperaturverteilung über den Querschnitt für den jeweils maßgebenden Zeitpunkt. Trat bei einer Stütze kein Versagen im Brandfall auf, wurde der Zeitpunkt der maximalen Temperatur gewählt (siehe Abbildung 141 und Abbildung 142).

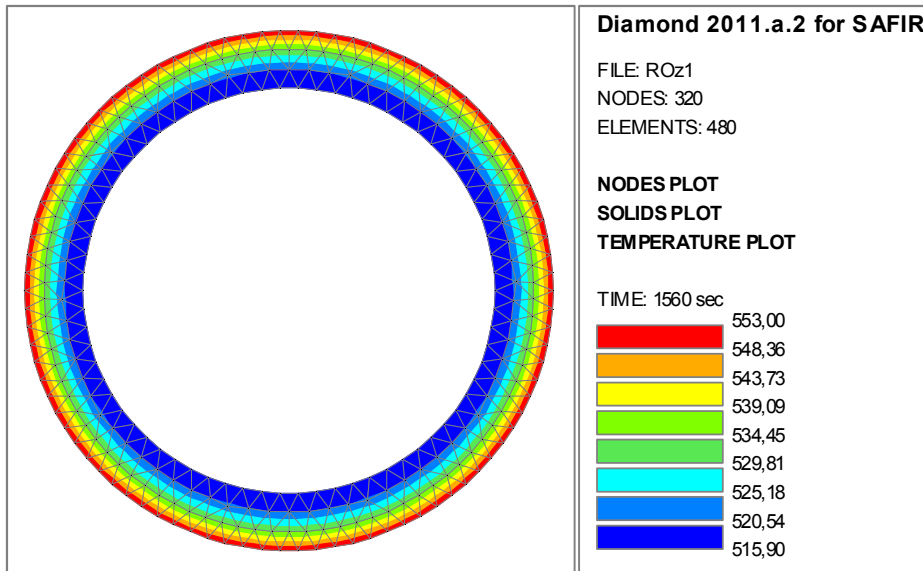


Abbildung 141: Querschnitt der Kategorie 1 und 2 zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur (kein Versagen im Brandfall)

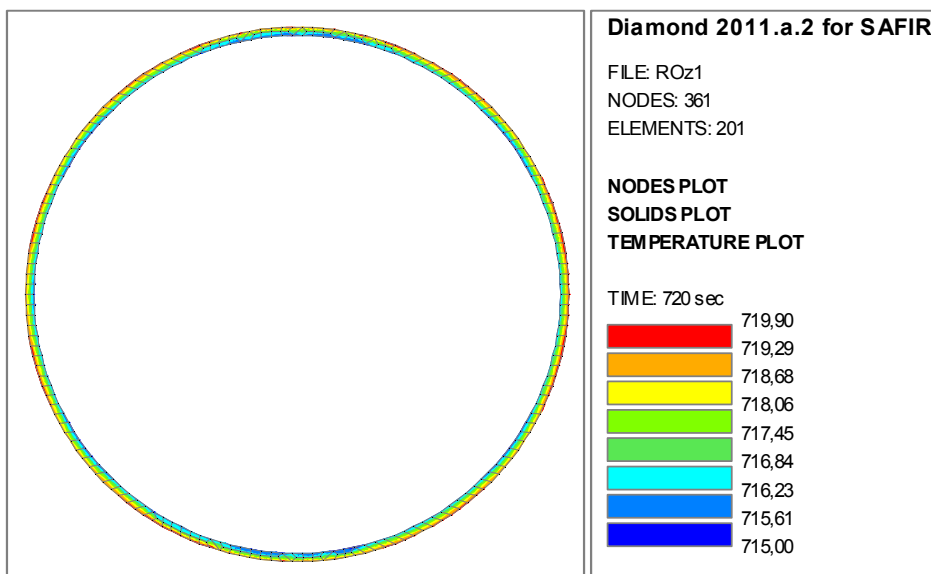


Abbildung 142: Temperaturprofil des untersuchten Querschnitts der Kategorie 3 zum Versagenszeitpunkt

Die zugehörigen Temperaturverläufe sind in den Abbildungen Abbildung 143 und Abbildung 144 dargestellt. Dahinter befinden sich die zugehörigen Verformungen und thermische Zwangskräfte.

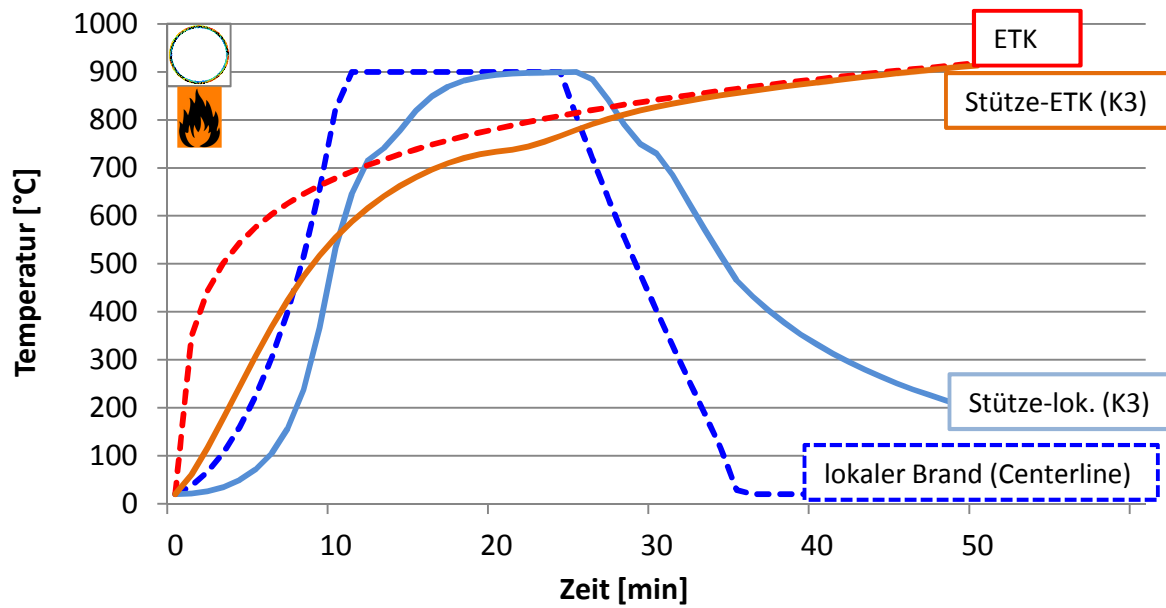


Abbildung 143: Temperatur-Zeitverläufe von einwirkenden und Bauteiltemperaturen im unteren Stützenabschnitt (RO 323,9 x 5,0; Kat. 3) im Vergleich zur ETK

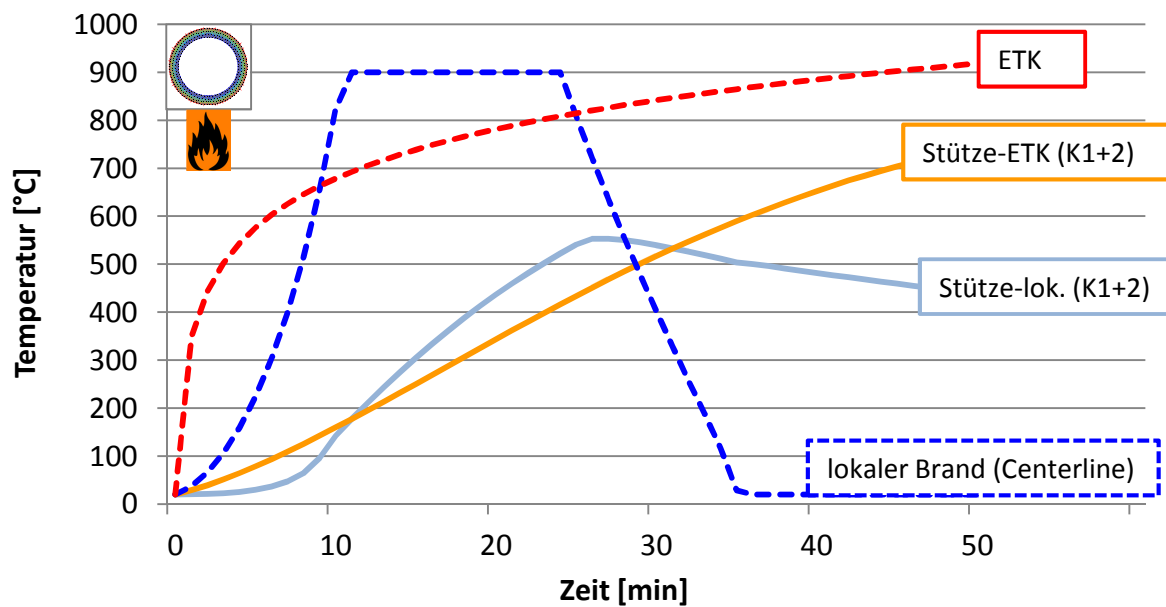


Abbildung 144: Temperatur-Zeitverläufe von einwirkenden und Bauteiltemperaturen im unteren Stützenabschnitt (RO 406,4 x 45; Kat. 1 + 2) im Vergleich zur ETK



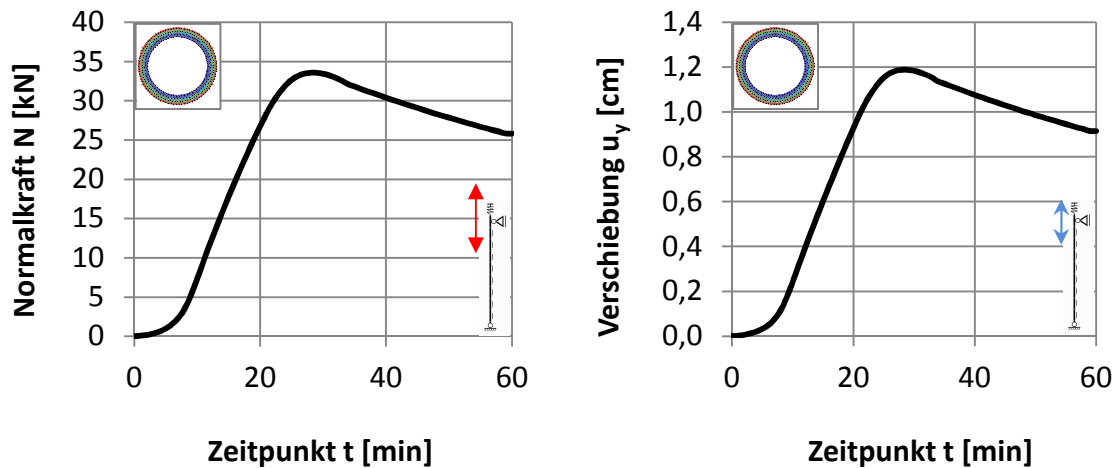


Abbildung 145: Thermische Zwangsnormkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 5,0 m, RO 406,4 x 45) infolge lok. Brand (Centerline)

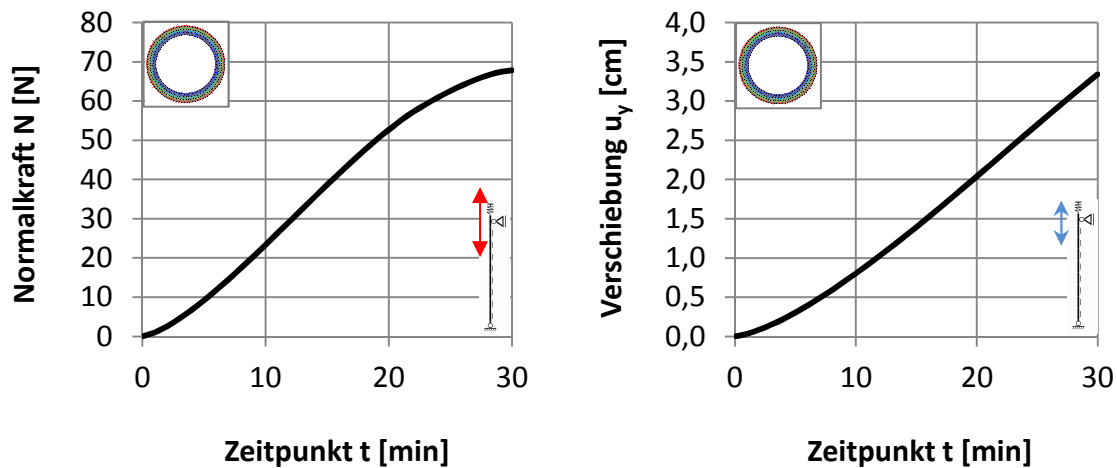


Abbildung 146: Thermische Zwangsnormkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 5,0 m, RO 406,4 x 45) infolge der ETK

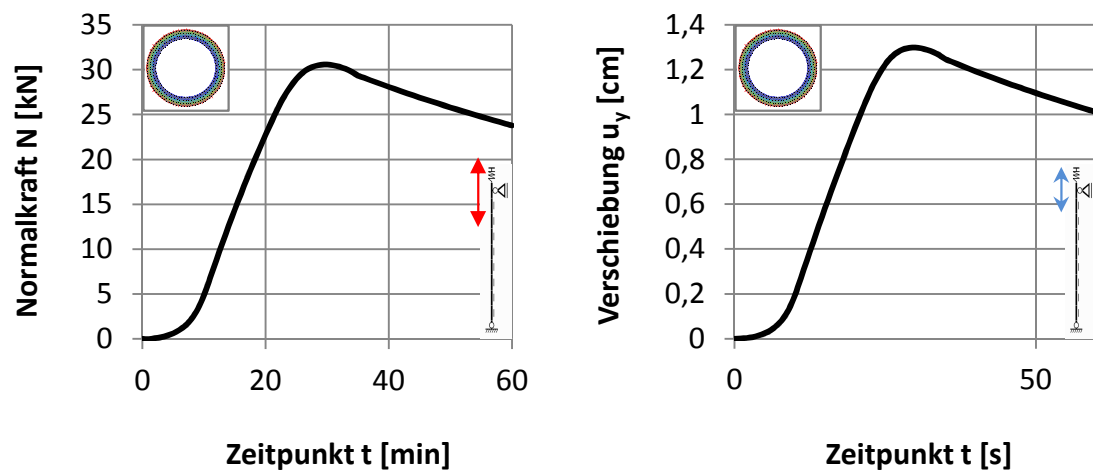


Abbildung 147: Thermische Zwangsnormkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 8,4 m, RO 406,4 x 45) infolge lok. Brand (Centerline)

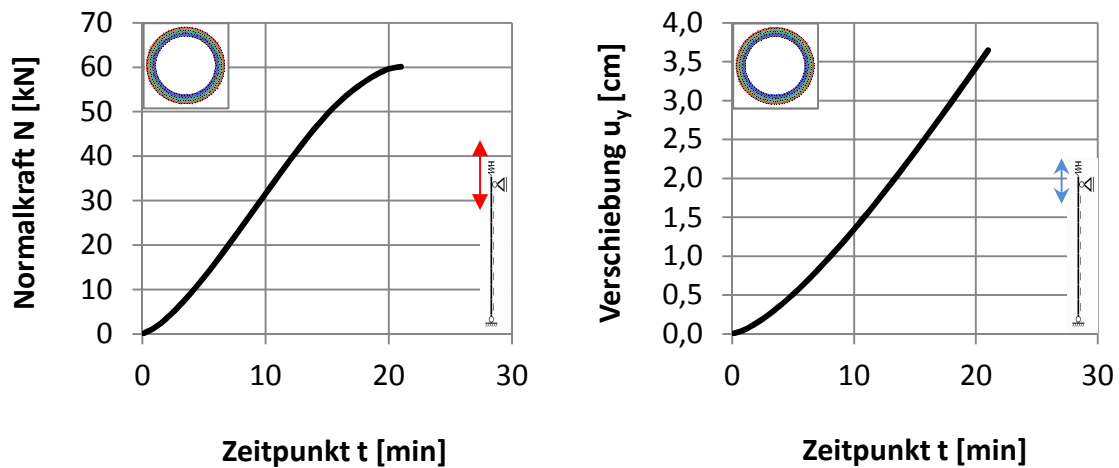


Abbildung 148: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 8,4 m, RO 406,4 x 45) infolge der ETK

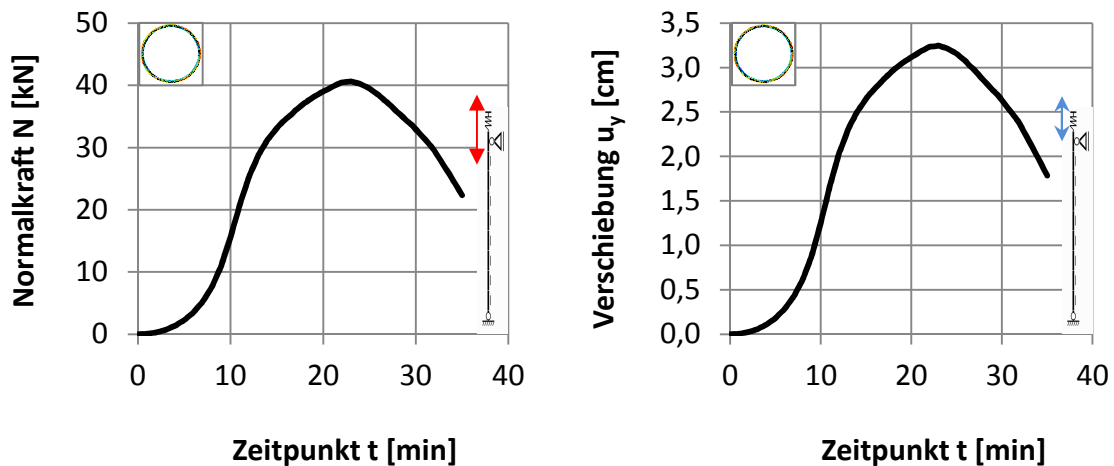


Abbildung 149: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 12 m, RO 323,9 x 5,0) infolge lok. Brand (Centerline)

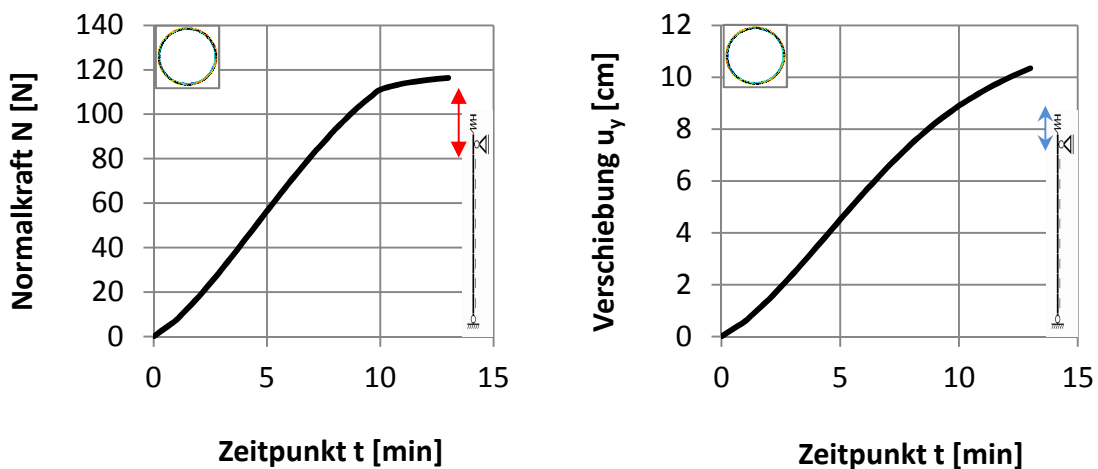


Abbildung 150: Thermische Zwangsnormalkraft und Knotenverschiebung am T-förmigen Ersatzsystem (Foyerstütze 12 m, RO 323,9 x 5,0) infolge der ETK