

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

**Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei
Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicher-
stellung des abwehrenden Brandschutzes**

Teil IV: Ansätze und Bemessungsbrände

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

205

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE
VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 205

**Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei
Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicher-
stellung des abwehrenden Brandschutzes**

Teil 4: Ansätze und Bemessungsbrände

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2020

FA. Nr. 249 (3/2020)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">205</p>	Titel des Berichtes: Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes Teil IV: Ansätze und Bemessungsbrände		ISSN: <p style="text-align: center;">0170-0060</p>
Autoren: Dipl.-Ing. Dominique Max		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 249 (3/2020)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und – senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehr-angelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Dezember 2020			
Seitenzahl: 49	Bilder: 17	Tabellen: 10	Literaturverweise: 15
Kurzfassung: <p>Der vorliegende Bericht baut auf den Forschungsberichten Nr. 180 und Nr. 196 auf. In Bericht Nr. 180 werden die Grundlagen der Ingenieurmethoden des Brandschutzes (Zonen- und Feldmodelle) mit den zugrundeliegenden Modellierungsansätzen beschrieben. In Bericht Nr. 196 wurde anhand ausgewählter Beispiele die Unterschiede der Methoden herausgearbeitet. Dabei kommt der Definition des Brandereignisses eine zentrale Bedeutung zu.</p> <p>Für die Bemessung der Standsicherheit von Konstruktion im Brandfall müssen Grenzzustände berücksichtigt werden. Damit sind auch Einwirkungen zu definieren, die auf der sicheren Seite liegend hinreichend mögliche Brände mit einem hohen Brandrisiko berücksichtigen.</p> <p>Es stehen hierfür mehrere Verfahren zur Bestimmung bemessungsrelevanter Szenarien zur Verfügung. Darunter die bauaufsichtlich eingeführten Verfahren des Eurocodes (EC) mit den entsprechenden nationalen Anhängen. In diesem Bericht werden die Grundzüge der Verfahren nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E und nach DIN EN 1991-1-2/NA Abschnitt BB beschrieben. Dem gegenüber wird der Bemessungsbrand nach DIN SPEC 18230-4 beschrieben, der auch den Auslegungsgrundsätzen der DIN 18230-1 entspricht.</p> <p>An einem Testfall der DIN SPEC 18230-4 werden die Brandfolgen (Heißgastemperatur und Wärmefreisetzungsrate) der Bemessungsbrände mit einem Zonenmodell berechnet und diese gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass für diesen Fall deutliche Unterschiede entstehen, in beiden Fällen wird die Wärmefreisetzungsrate und in Folge die Heißgastemperatur durch die schlechte Ventilierung des Brandes begrenzt. Dadurch werden die nach Szenario vorgegebenen Verläufe nicht erreicht.</p>			
Schlagwörter: Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Modellierung, Zonenmodell, Feldmodell, Bemessungsbrand, Brandszenarien, Feuerwiderstandsfähigkeit, Sicherheitskonzept, Bemessung, Brände			

Inhaltsverzeichnis

BERICHTSKENNBLATT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
FORMELVERZEICHNIS	XI
1 EINLEITUNG	1
2 BRENNBARE STOFFE	3
2.1 m-Faktor	3
3 BEMESSUNG	4
3.1 DIN EN 1991-1-2	5
3.1.1 Brandszenario nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E	7
3.1.2 Brandszenario nach DIN EN 1991-1-2 NA BB	9
3.1.2.1 Brandschutztechnische Infrastruktur	12
3.2 DIN 18230-1	16
3.2.1 Äquivalente Branddauer	16
3.2.2 Sicherheitskonzept	17
3.2.3 Sicherheitsbeiwert	18
3.2.1 Brandschutztechnische Infrastruktur	19
3.2.2 DIN SPEC 18230-4	20
3.3 DIN 18232	22
4 BEISPIEL DIN SPEC 18230-4	23
4.1 Kleine Halle 400 m ²	23

4.1.1	RANDBEDINGUNGEN	23
4.1.2	Szenario 1: Bemessungsbrand nach DIN 18230-4	24
4.1.2.1	Ergebnisse	25
4.1.3	Szenario 2: Bemessungsbrand nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB	27
4.1.3.1	Ergebnisse	29
5	DISKUSSION	31
6	FAZIT UND AUSBLICK	31
	LITERATURVERZEICHNIS	34

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken.
Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle
für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht Design Fire	5
Abbildung 2 Schritte zur Tragwerksbemessung im Brandfall nach [3]	6
Abbildung 3 Faktor δq_2 nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E	8
Abbildung 4 Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{fi, q}$ in Abhängigkeit von β_{fi} nach [4]; Kurve 1 Brandlastdichte nach Tabelle 1; Kurve 2 Brandlastdichte individuell.....	14
Abbildung 5 Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ nach DIN 18230-1 mit den Einflussgrößen und deren Abschnitten der DIN 18230-1 [5]	17
Abbildung 6 Schematische Darstellung der Einflussgrößen eines Brandes innerhalb des Bemessungskonzeptes der DIN 18230-1	17
Abbildung 7 Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer $erft^F$ nach DIN 18230-1 und den Einflussgrößen und deren Abschnitten der DIN 18230-1 [5]	18
Abbildung 8 Einteilung der Brandsicherheitsklassen nach DIN 18230-1 [5]	18
Abbildung 9 Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes γ nach DIN 18230-1	19
Abbildung 10 Ablaufschema Bemessung	21
Abbildung 11 links: dreidimensionale Ansicht der Beispielgeometrie kleine Halle 400 m ² ; rechts Darstellung des geometrischen Brandausbreitungsmodells	24
Abbildung 12 Verlauf der Wärmefreisetzungskurve und des Radius für Brandszenario kleine Halle	25
Abbildung 13 Wärmefreisetzungsrate Q und Heißgastemperatur T_g	26
Abbildung 14 Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlast für das Brandszenario DIN EN 1991-1-2 oL	29
Abbildung 15 Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlast für das Brand-szenario DIN EN 1991-1-2 oL	29
Abbildung 16 Ergebnisse-Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Heißgastemperatur für das Szenario oL	30

Abbildung 17 Ergebnisse-Verlauf der Wärmefreisetzungsrates und der
Heißgastemperatur für das Szenario mL.....30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	ausgewählte charakteristische Werte für Brandlastdichte nach [4] (Norm)	10
Tabelle 2	ausgewählte Werte der Brandlastdichte für Industriegebäude	10
Tabelle 3	Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr p_1 für ausgewählte Nutzungen nach [4] (Norm)	11
Tabelle 4	Ausgewählte Ausfallwahrscheinlichkeiten der Brandbekämpfung nach [4]	12
Tabelle 5	Richtwerte des Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit p_f (innerhalb eines Jahres) bei ausgewählten Nutzungen nach [4]	13
Tabelle 6	Ausgewählte Parameter α für die Brandentwicklungsphase und die maximale Wärmefreisetzungsrates RHR_f nach [4]	16
Tabelle 7	Versagenswahrscheinlichkeiten je Jahr nach [10]	19
Tabelle 8	Bestimmung der mittleren Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes p_1 für das Beispiel	27
Tabelle 9	Wahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeitsindex für die beiden Szenarien	27
Tabelle 10	Daten Bemessungsbrandszenarien mit (mL) und ohne Löschanlage (oL)	28
Tabelle 11	Zusammenstellung der wesentlichen, berechneten Größen in den Szenarien	31

Abkürzungsverzeichnis

BBA	Brandbekämpfungsabschnitt
CFAST	Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC	Eurocode
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
IndBauRL	Industriebaurichtlinie
MBO	Musterbauordnung
MRFC	Multi-Room-Fire-Code
SK _b	Sicherheitsklassen für den Brandschutz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VwV-TB	Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen

Formelverzeichnis

A_b	Oberfläche der Brandlast
A_{geo}	geometrische Fläche
A_w	Ventilationsfläche
a_v	Flächenverhältnis für vertikale Öffnungen
a_h	Flächenverhältnis für horizontale Öffnungen
α_L	Zusatzbeiwert zur Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen DIN 18230-1
c_p	spezifische Wärmekapazität
c_v	Widerstandsbeiwert
$E_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Einwirkung unter Brandbeanspruchung zum Zeitpunkt t
γ	Sicherheitsbeiwert
χ	Verbrennungseffektivität
δ_i	Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E
p_i	(Ausfall-) Wahrscheinlichkeit
f	Verlustfaktor des strahlenden Anteils der Wärmefreisetzungsrate
H	Raumhöhe
H_u	unterer Heizwert
h_w	Lichte Höhe der Öffnung in m
m	m-Faktor
$\dot{m}_{Br,f}$	Abbrandrate des Brennstoffes

m_{rest}	Restbrandlast in kg
M_i	Masse des Stoffes i
\dot{Q}	Gesamte Wärmefreisetzungsrate kW bzw. MW
\dot{Q}_{max}	Maximale (berechnete) Wärmefreisetzungsrate kW bzw. MW
$\dot{Q}_{max,d}$	Maximale (mögliche) Wärmefreisetzungsrate gemäß Szenario kW bzw. MW
$q_{fi,k}$	Charakteristische Brandlastdichte MJ/m ²
$q_{fi,d}$	Bemessungswert der Brandlastdichte MJ/m ²
q_{rd}	Bemessungswert der rechnerischen Brandlastdichte kWh DIN-18230-1
$R_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Widerstandsfähigkeit eines Bauteils im Brandfall zum Zeitpunkt t
T	absolute Temperatur
T_B	Bauteiltemperatur in °C bzw. K
$T_{B,cr}$	kritische Bauteiltemperatur in °C bzw. K
$T_{B,d}$	Bemessungswert der Bauteiltemperatur in °C bzw. K
T_g	Gastemperatur in °C bzw. K
T_o	Schichttemperatur der heißen Schicht in °C
T_s	Oberflächentemperatur in °C bzw. K
T_u	Schichttemperatur der unteren Schicht in °C
T_∞	Temperatur der Umgebungsluft in °C bzw. K
t	Zeit

$erf t_f$	Erforderliche Feuerwiderstandsdauer
t_i	Referenzzeitpunkt
$t_{\ddot{a}}$	äquivalente Branddauer
t_{α}	Brandausbreitungsgeschwindigkeit
w	Ventilationsfaktor w nach DIN 18230-1
x	Ort auf x-Koordinate
z_i	Höhenlage
Z_i, z_{int}	Schichthöhe

1 Einleitung

Dieser Bericht soll anhand ausgewählter Beispiele den Zugang zu den Methoden und Ansätzen erleichtern sowie die Beurteilung der Ergebnisse unterschiedlicher Methoden für den jeweils betrachteten Fall ermöglichen. Der Bericht baut dabei auf dem Grundlagen-Bericht^a und dem Beispielbericht^b auf.

Ingenieurmethoden können für den Brandschutzingenieur Werkzeuge sein, unter bekannten Randbedingungen, den Brand und seine Brandfolgen abzuschätzen. Dabei stellt sich wiederholt die Frage, insbesondere wenn es um die Bemessung von Bauteilen geht, in wie weit das angestrebte Sicherheitsniveau erreicht wird, unabhängig der eingesetzten Werkzeuge. Es muss sichergestellt werden, dass mit den Nachweisverfahren mindestens das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird, wie es das aktuelle Baurecht, im Hinblick auf den Brandschutz, mit seinen materiellen Anforderungen und den zugrunde gelegten Normen für den Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeiten von Bauarten und Bauprodukten definiert.

Derzeit gibt es unterschiedliche Verfahren, die unter Berücksichtigung der tatsächlichen Randbedingungen eines möglichen Brandes die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen nachweisen können, von denen im Rahmen dieses Berichtes zwei Verfahren vor- und in einem akademischen Beispiel aus der DIN SPEC 18230-4 [1] gegenübergestellt werden.

Über die Verwaltungsvorschriften Technische Baubestimmungen (VwV-TB) können die obersten Bauaufsichten der Länder nach § 85a Musterbauordnung (MBO), im Weiteren wird nur auf das Muster (MVwV-TB) [2] herausgegeben vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) Bezug genommen, technischen Baubestimmungen definiert, die zu beachten sind.

^a IMK-Forschungsbericht Nr. 180 Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes-Teil I-Grundlagen

^b IMK-Forschungsbericht Nr. 196 Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes-Teil II-Beispiele

Für die Bemessung von Tragwerken im Brandfall ist der Eurocode (EC) mit den Teilen DIN EN 1991-1-2 [3] und dem nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2/NA [4] als technische Baubestimmung eingeführt. Die Industriebaurichtlinie (IndBauRL) ist ebenso als technische Baubestimmung für den Bau von Industriegebäuden eingeführt und über das Nachweisverfahren nach Abschnitt 7 (IndBauRL) wird auch auf die DIN 18230-1 [5] als technische Regel referenziert. In den angesprochenen Normen und Richtlinien werden Verfahren beschrieben um Tragwerke bzw. Tragwerksteile brandschutztechnisch zu bemessen. Dabei werden unterschiedliche Vorgehensweisen definiert auf die im Weiteren eingegangen wird.

Mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes stehen Werkzeuge zur Verfügung die als Bindeglied zwischen den bauordnungsrechtlichen Anforderungen und Normen und einer wirtschaftlichen Auslegung der Tragwerke unter Berücksichtigung der tatsächlichen Gegebenheiten Vorort, Art und Menge der Brandlast, Ventilationsbedingungen oder thermische Eigenschaften von Umgebungsbauteilen, fungieren können.

Dieser Bericht stellt lediglich einen Zwischenbericht dar. Im Weiteren sollen die Erkenntnisse vertieft und in einer für Anwender und Prüfer handhabbaren Checkliste münden. Die Checkliste soll dabei einen roten Faden bilden der auf beiden Seiten zu einem einheitlichen Verständnis der Ingenieurmethoden führt.

2 Brennbare Stoffe

Bei der Verbrennung von Stoffen finden eine Vielzahl von Reaktionen und Umwandlungsprozessen statt. Die Bestandteile fester bzw. flüssiger Brennstoffe erfahren beispielsweise vor deren Abbrand einen Wechsel des Aggregatzustandes.

Diese Prozesse werden durch mehrere Größen beeinflusst beispielsweise die Rückstrahlung der Flamme und Wärmeleitung die innerhalb des Stoffes stattfindet. Durch die Beeinflussung kann das Abbrandverhalten unter anderem abhängig sein von der Stoffzusammensetzung, der Form, Verteilung und Lagerungsdichte aber auch den Ventilationsbedingungen [6]. Um ein realistisches Brandverhalten darstellen zu können müssen bei der Bestimmung der Abbrandrate \dot{m}_{br} und in dessen Folge der Wärme-freisetzungsrates \dot{Q} , die sich aus der Abbrandrate und dem unteren Heizwert H_u ergibt, diese Einflüsse berücksichtigt werden. Daher der m-Faktor oder die Verbrennungseffektivität χ eingeführt, die das Brandverhalten bestimmter (charakteristischer) Stoffe auf das Brandverhalten eines Modellbrennstoffes zurückführt und dadurch eine Vergleichbarkeit der Brennstoffe ermöglicht.

Insbesondere bei der individuellen Bestimmung der Brandlastdichte beispielsweise innerhalb der Nachweisführung nach Industriebaurichtlinie (IndBauRL) Abschnitt 7 und dem damit verbundenen Nachweisverfahren nach DIN 18230-1 [5] für die Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsfähigkeit ist der m-Faktor von zentraler Bedeutung.

2.1 m-Faktor

Der m-Faktor ist für bestimmte Stoffe und Stoffgemische und Anordnungen in der DIN 18230-3 tabellarisch aufgeführt. Diese Faktoren wurden in speziellen Brandversuchen ermittelt. Den Versuchstand (m-Faktor Ofen) mit der entsprechenden Peripherie wird in der DIN 18230-2 beschrieben.

Zur Zeit gibt es keinen in Betrieb befindlichen m-Faktor Ofen. Daher hat Knaust et. al. [7] aufgezeigt, wie mit numerischen Methoden (Fire Dynamics Simulator) der m-Faktor rechnerisch bestimmt werden kann.

3 Bemessung

Bei der Bemessung von Tragwerken soll ein außergewöhnliches Ereignis wie es ein Brand darstellt, berücksichtigt werden. Hierbei sind vor allem Grenzzustände zu berücksichtigen, die für die Standsicherheit des Gebäudes und der Eindämmung, beispielsweise an brandschutztechnisch trennenden Wänden, des Brandes von Bedeutung sind [8]. Grenzzustände hinsichtlich des Feuerwiderstandes von Bauteilen sind Vollbrände, nach dem Feuerübersprung (Flash-Over), bei denen alle brennbaren Materialien im Raum brennen [9]. Die Brandereignisse mit den größten Heißgastemperaturen werden bei Ereignissen erwartet, die nach der Entstehungsphase in einen Vollbrand übergehen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Grenzzustand einstellt ist abhängig von:

- der Auftretenswahrscheinlichkeit von Entstehungsbränden und
- der Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr oder Feuerlöschanlagen.

Diese Grundüberlegung liegt den im Weiteren beschriebenen Verfahren zugrunde, das Bub et. al. [8] beschrieben hat.

Die Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen hängt im Wesentlichen von der vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur und ist entsprechend gestaffelt.

Das Brandrisiko, berücksichtigt neben der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Grenzzustandes, die Schadenfolgen eines solchen. Diese sollten ebenso in die Bewertung einfließen.

Grundsätzlich wird das Schutzziel verfolgt, dass das Gesamttragwerk auch unter den Belastungen, die ein Brand (im Grenzzustand) auf das Tragwerk ausübt standsicher bleibt. Dabei kann nach [10], [8] zugelassen werden, dass:

- Gebäude ganz oder teilweise nach dem Brand nicht mehr gebrauchsfähig sind,
- örtliches Versagen eintreten kann,
- größere Verformungen auftreten können,
- Die Tragfähigkeit unter Brandeinwirkung nur für eine begrenzte Zeit erhalten bleibt.

Diese Differenzierung wird in der DIN 18230-1 aufgegriffen durch die Einteilung von Bauteilen in Brandsicherheitsklassen, also in Bauteilgruppen, bei denen eine tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit zugelassen wird.

Für die Ermittlung von Grenzzuständen im Brandfall muss zunächst ein Bemessungsbrand/ Bemessungsfall definiert werden. In Abbildung 1 wird eine Übersicht gegeben welche Verfahren zur Bestimmung von Bemessungsbränden (Design Fires) vorhanden sind. Im Weiteren wird auf die hervorgehobenen Verfahren näher eingegangen.

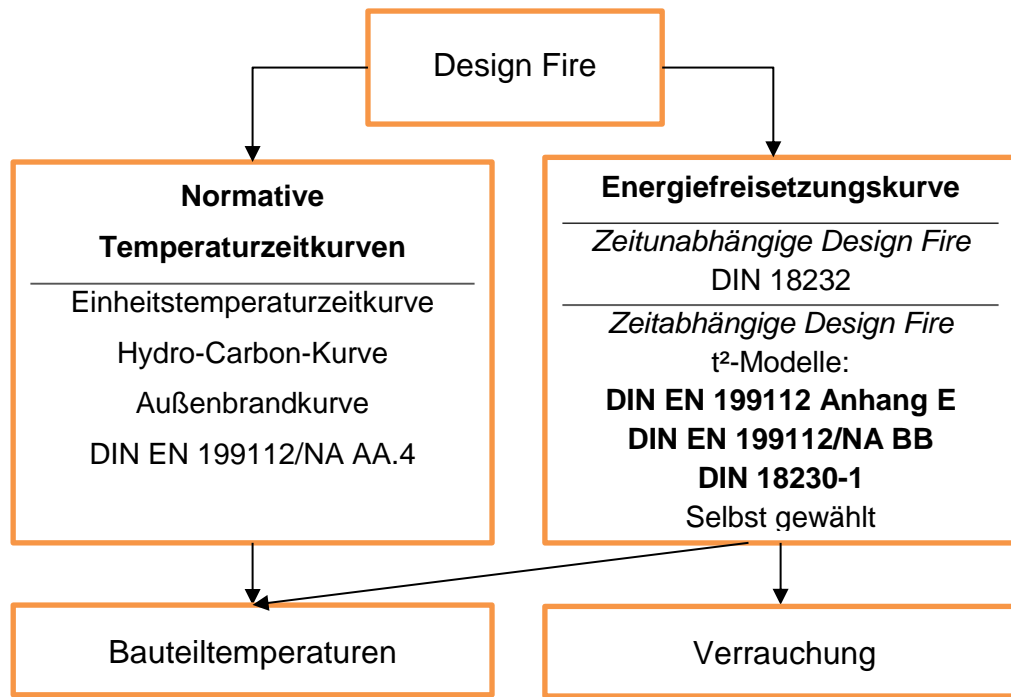


Abbildung 1 Übersicht Design Fire

Die normativen Temperaturzeitkurven stellen derzeit die gängige Praxis bei der Bemessung von Tragwerken dar. Diese Ansätze stellen (mit Ausnahme des vereinfachten Naturbrandverfahrens nach DIN EN 1991-1-2/NA AA.4) einfache Temperaturzeitkurven zur Verfügung, die eine Bemessung unabhängig der tatsächlich vorhandenen Randbedingungen eines Brandes erlauben.

3.1 DIN EN 1991-1-2

In dem Normteil DIN EN 1991-1-2 [3] und dem entsprechenden nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2/NA [4] werden die thermischen und mechanischen Einwirkungen auf Tragwerke unter Brandbeanspruchung definiert. In Verbindung mit den Brandschutzteilen der baustoffbezogenen Eurocodes (Stahl, Stahlbeton und Holzbau) kann eine Bemessung von Tragwerken erfolgen.

Die Bemessung von Tragwerken im Brandfall mit dem Eurocode (EC) kann nach [3] mit den in Abbildung 2 beschriebenen Schritten durchgeführt werden. Zunächst wird

ein Bemessungsbrand/Brandszenario definiert bspw. über die Brandlastdichte q_d und den Verlauf der Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q}(t)$. Über geeignete Verfahren beispielsweise Ingenieurmethoden des Brandschutzes werden die bei einem Bemessungsbrand erreichten/ berechneten Heißgastemperaturen T_g und mit den entsprechenden Vorgaben für den Wärmeübergang die Temperatur des Bauteils T_B bestimmt. Zusammen mit den mechanischen Einwirkungen für den außergewöhnlichen Bemessungsfall Brand, die Kombinationsbeiwerte der veränderlichen und dauerhaften Lasten sind entsprechend zu berücksichtigen, werden die mechanischen und thermischen Einwirkungen auf das Tragwerk bestimmt. Unter Verwendung der baustoffspezifischen (temperaturabhängigen) Kennwerte für die Festigkeit, wird der Bemessungswert der Widerstandsfähigkeit des Bauteils $R_{fi,d,t}$ ermittelt und dem Bemessungswert der Einwirkungen $E_{fi,d,t}$ gegenübergestellt. Es ist auch möglich nachzuweisen, dass der Bemessungswert der Baustofftemperatur T_d^c die kritische Bauteiltemperatur nicht überschreitet.

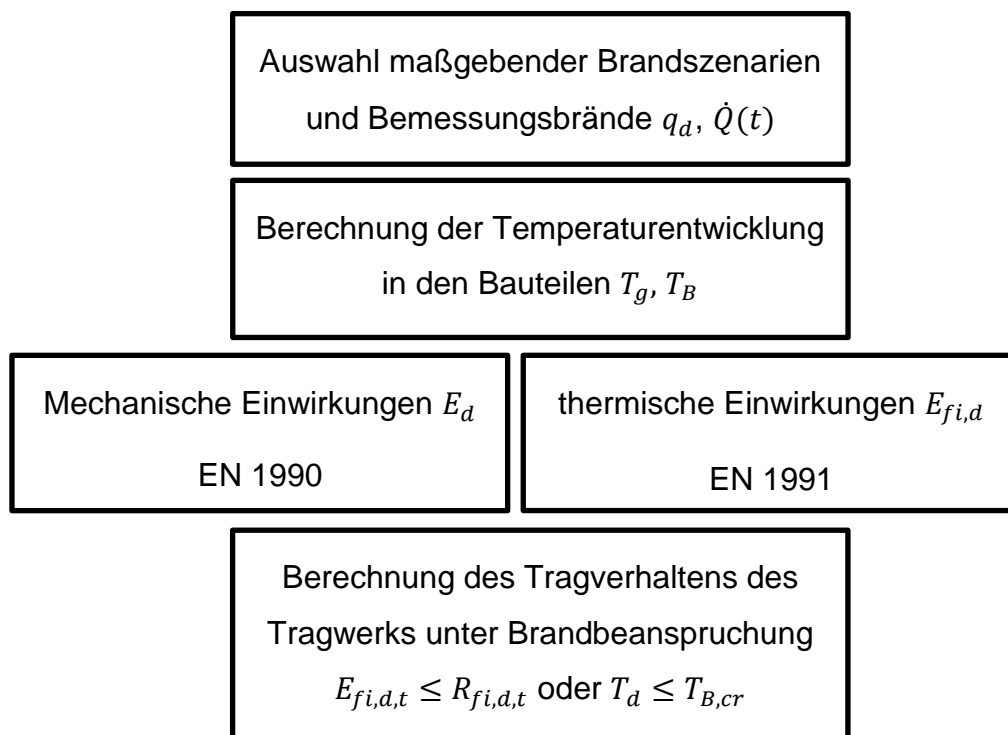


Abbildung 2 Schritte zur Tragwerksbemessung im Brandfall nach [3]

^c Θ_{cr} Bzw. Θ_d Bezeichnung nach DIN EN 1991-1-2

Neben den parametrischen Temperaturzeitkurven stehen mit den Naturbrandverfahren weitere Möglichkeiten der Bemessung zur Verfügung. In [11] wird eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren der Bemessung im Brandfall gegeben.

Naturbrand

Je nach Naturbrandverfahren und Nachweisverfahren sind unterschiedliche Eingangsgrößen für die Brandeinwirkung zu berücksichtigen [11]:

- Brandbelastung
- Brandausbreitungsgeschwindigkeit
- Brandfläche
- Ventilationsbedingungen

Diese Einflussgrößen sind mit Streuungen und Modellunsicherheiten behaftet und müssen bei der Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden [11].

Vereinfachte Naturbrandmodelle

Es gibt parametrische Verfahren die den Naturbrandmodellen zugeordnet werden. Des Weiteren gibt es Vollbrandmodelle und Modelle, die über empirische Gleichungen die Wirkung lokaler Brände auf die Konstruktion abschätzen kann.

Das Verfahren nach DIN EN 1991-1-2/NA AA.3 gehört auch zu der Gruppe der Naturbrandmodelle. Es stellt ein vereinfachtes Verfahren zur Verfügung auf das, im Rahmen dieses Berichtes nicht eingegangen wird. Dabei ist herauszustellen, dass ein definierter Anwendungsrahmen für diese Verfahren gegeben ist.

Die im folgenden angewandte Ingenieurmethode (Zonenmodell) wird den allgemeinen Brandmodellen zugeordnet.

3.1.1 Brandszenario nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E

Die Ermittlung der Brandlastdichte darf nach DIN EN 1991-1-2 **Anhang E** bestimmt werden,

- anhand einer nationalen Brandlastklassifizierung entsprechend der **Nutzung** und/oder
- **individuell** für ein bestimmtes Projekt durch eine Erhebung der Brandlasten.

Der Anhang E ist nach den Ausführungen im Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2 NA [4] **nicht** zur Anwendung in Deutschland zugelassen. Dieser Teil der Norm wird durch die Regelungen des Anhang BB des nationalen Anhangs ersetzt.

Die Bemessung von Bauteilen erfolgt in der Regel bezogen auf einen brandschutztechnisch abgetrennten Bereich eines Gebäudes. Daher ist mit der Bezeichnung eines Brandabschnittes im Weiteren Verlauf die Bezugsfläche eines solchen abgetrennten Raumes zu verstehen. Es handelt sich nicht zwangsweise um einen nach Baurecht erforderlichen Brandabschnitt sondern ein brandschutztechnisch abgetrennter Bereich.

Der Bemessungswert der Brandlastdichte $q_{f,d}$ (Anhang E) ist gegeben nach Gl. 1 mit:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \delta_{qn} \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei ist m der Abbrandfaktor (vgl. 2.1).

Die Variable δ_{q1} ist ein Faktor, der die Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandabschnittsgröße definiert. Mit einer größeren Fläche erhöht sich die Gefahr einer Brandentstehung, daher steigt der Betrag des Faktors mit steigender Brandabschnittsfläche (siehe auch [8]).

Mit der Variable δ_{q2} wird die Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Art und Nutzung (vgl. Abbildung 3) berücksichtigt.

Brandentstehungsgefahr δ_{q2}	Beispiele für verschiedene Nutzungen
0,78	Kunstgalerie, Museum, Schwimmbad
1,00	Büro, Wohngebäude, Hotel, Papierindustrie
1,22	Fertigung von Maschinen und Motoren
1,44	Chemische Labore, Malerwerkstätten
1,66	Herstellung von Feuerwerken oder Farben

Abbildung 3 Faktor δ_{q2} nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E

Geschützte Brandlasten bleiben in den folgenden Betrachtungen außer Acht.

Der EC gibt mit dem Anhang E bzw. deutschem nationalem Anhang die Möglichkeit den Bemessungswert der Brandlastdichte $q_{f,d}$ aus der nutzungsbedingten charakteristischen Brandlastdichte $q_{f,k}$ zu bestimmen nach Gl. 2 bzw. Gl. 3 [3]. Im Verfahren nach Anhang E wird die 80 Prozent Fraktile für die Bemessung herangezogen.

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit t_α und damit der Verlauf der Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} in kW ist in der Brandentwicklungsphase gegeben durch Gl. 2.

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

Der Wert für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit t_α und die maximal erreichbare Wärmefreisetzungsrates ist definiert in Abhängigkeit der Nutzung.

3.1.2 Brandszenario nach DIN EN 1991-1-2 NA BB

Der Bemessungswert für die Brandlastdichte $q_{f,d}$ nach DIN EN 1991-1-2 NA [4] Abschnitt BB (vgl. auch Gl. 2) bestimmt sich aus einer charakteristischen Brandlastdichte $q_{f,k}$ (90 Prozent Fraktile), der Verbrennungseffektivität (vgl. 2) (üblicherweise 0,7) und einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$, der die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Grenzzustandes berücksichtigt.

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot \chi \cdot \gamma_{fi,q} \quad \text{Gl. 3}$$

Charakteristische Brandlast $q_{f,k}$

Die charakteristische Brandlastdichte ist entsprechend der Nutzung klassifiziert und ist in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei sind brennbare Teile der Konstruktion nicht berücksichtigt.

In besonderen Fällen können Vorort Brandlasten aufgenommen werden und für die charakteristische Brandlast herangezogen werden. Es ist jedoch eine Mindestbrandlast $q_{f,d,min}$ für die Bemessung von mindestens 50 MJ/m² anzusetzen, sollte die Erhebung des charakteristischen Wertes unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität und des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{fi,q}$ einen geringeren Bemessungswert ergeben.

Zeile [4]	Nutzung	Brandlastdichte $q_{f,k}$ [MJ/m ²]		
		Mittelwert	Standard- abweichung	90%-Quantil
1	Wohngebäude	780	234	1 085
7	Verkaufsstätte	600	180	835
9	Transport (öffentlicher Bereich)	100	30	139

Tabelle 1 ausgewählte charakteristische Werte für Brandlastdichte nach [4] (Norm)

Brandlasten in Industriegebäuden hängen stark von der Nutzung ab. Selbst innerhalb von Nutzungsobergruppen können die Brandlastdichten durchaus sehr streuen. Daher scheint der Rückgriff auf pauschale nutzungsspezifische Werte der Brandlastdichte für eine wirtschaftliche Auslegung der Konstruktion nicht praktikabel. Sollten jedoch pauschale Werte herangezogen werden, sollten die 90 %-Fraktilewerte verwendet werden. Beispiele werden in der Tabelle 2 gegeben.

Nutzung	Brandlastdichte $q_{f,k}$ [MJ/m ²]			Quelle
	Mittelwert	Standard- abweichung	90%- Quantil	
Industrie-Lager	1180	-	2 240	[12]
Industrie-Produktion	300	-	590	[12]
Baustofflager	-	-	266,4	[13]
Kunststoffverarbeitung mit Thermo- presse	-	-	547,2	[13]

Tabelle 2 ausgewählte Werte der Brandlastdichte für Industriegebäude

Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$ ergibt sich aus der:

- Auftretenswahrscheinlichkeit eines Grenzzustandes und
- Dem nutzungsspezifischen Zuverlässigkeitsindex.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers und Ausmaß der Schadenfolgen in einer brandschutztechnischen Einheit liegt bei

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad \text{Gl. 4}$$

Die zulässige Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers p_{fi} in einer brandschutztechnisch wirksam getrennten Einheit setzt sich aus der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 und den Ausfallwahrscheinlichkeiten der manuellen bzw. automatischen Brandbekämpfung p_2 bzw. p_3 zusammen.

Die mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit je Quadratmeter ist abhängig von der Geschoss- bzw. Brandabschnittsfläche und von der Nutzung (siehe auch [8]):

$$p_1 \approx a \cdot A_f^b \quad \text{Gl. 5}$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 wird gemäß Tabelle 3 angenommen:

Zeile [4]	Nutzung	a [1/(m ² a)]	b	1/a
1	Wohngebäude	4,8*10 ⁻⁵	0,9	3,0*10 ⁻³
6	Verkaufsstätte	6,6*10 ⁻⁵	1,0	8,4*10 ⁻³

Tabelle 3 Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr p_1 für ausgewählte Nutzungen nach [4] (Norm)

Neben den in der Norm aufgeführten Werten für spezifische Nutzungen, gibt es in der Literatur Werte für die Brandentstehungshäufigkeit von weiteren Nutzungen. Beispielsweise wird die Brandentstehungshäufigkeit für Industriebauten, ermittelt in Finnland, mit einem Wert von $6,6 \cdot 10^{-6}$ [$1/(m^2 \cdot a)$] angegeben. Die Schwierigkeit, besteht darin, dass statistische Werte nur bedingt länderübergreifende Aussagekraft haben. Daher sollte die Erhebung statistischer Daten mit einer für diese Fragestellung ausreichenden Aussagekraft, flächendeckend angestrebt werden. Derzeit gibt es keine übergeordnete Erhebung solcher statistischer Daten in Deutschland. Mit der Initiative des Vereins zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (VFDB) Referat 14 gibt es Ansätze eine solche Statistik aufzubauen. Diese richtet sich speziell an Feuerwehren, welche aufgerufen sind sich an der Initiative zu beteiligen um mit dem beigesteuerten Datenmaterial dazu beizutragen, die Wirksamkeit des vorbeugenden, anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutz zu verbessern.

3.1.2.1 Brandschutztechnische Infrastruktur

Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfungsmaßnahmen p_2 ergibt sich aus der Multiplikation der Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung $p_{2,1}$ welche mit 0,5 angenommen wird, sowie die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr $p_{2,2}$ wird mit 0,2 angenommen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Löschanlage p_3 wird nach [4] mit 0,02 angenommen.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} ergibt sich aus der 6:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{2,1} \cdot p_{2,2} (\cdot p_3) \quad \text{Gl. 6}$$

Aus der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} lässt sich zusammen mit der nutzungsabhängigen zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ beziehungsweise der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} bestimmen.

Zeile [4]	Brandbekämpfung durch	$p_{2,2}$	p_3
1	Öffentliche Feuerwehr < 15 Min	0,2	
3a	Sprinkleranlage nach VdS/CEA Standard		0,02

Tabelle 4 Ausgewählte Ausfallwahrscheinlichkeiten der Brandbekämpfung nach [4]

Um dem Brandrisiko Rechnung zu tragen wird eine gewisse Zuverlässigkeit für die Bauteile gefordert. Dadurch soll berücksichtigt werden, dass bei bestimmter Nutzung ein Versagen im Grenzzustand unterschiedlich große Schäden entstehen. Es lässt sich daher eine zulässig bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall definieren. Diese ergibt sich nach Gl. 8 aus der zulässigen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} (vgl. Gl. 5 bzw. Gl. 7) und der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f nach Tabelle 5 oder über Gl. 8:

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad \text{Gl. 7}$$

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad \text{Gl. 8}$$

Dabei ist $\Phi(\cdot)$ die Funktion der Standardnormalverteilung.

Zeile [4]	Nutzung	Schadenfolgen					
		hoch		mittel		gering	
		β	p_f	β	p_f	β	p_f
1	Wohngebäude	4,7	1,3*10-6	4,2	1,3*10-5	3,7	1,1*10-4
5	Verkaufsstätte	5,2	1,0*10-7	4,7	1,3*10-6	4,2	1,3*10-5
8	landwirtschaftlich genutzte Gebäude			4,2	1,3*10-5	3,7	1,1*10-4

Tabelle 5 Richtwerte des Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit p_f (innerhalb eines Jahres) bei ausgewählten Nutzungen nach [4]

Üblicherweise sollen mittlere Schadensfolgen angenommen werden. Aus der zulässig bedingten Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$, kann der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} bestimmt werden (nach Gl. 9).

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) \quad \text{Gl. 9}$$

Aus dem Zuverlässigkeitsindex β_{fi} lässt sich über ein Diagramm (Abbildung 4) gemäß [4] der Beiwert $\gamma_{fi,q}$ bestimmen.

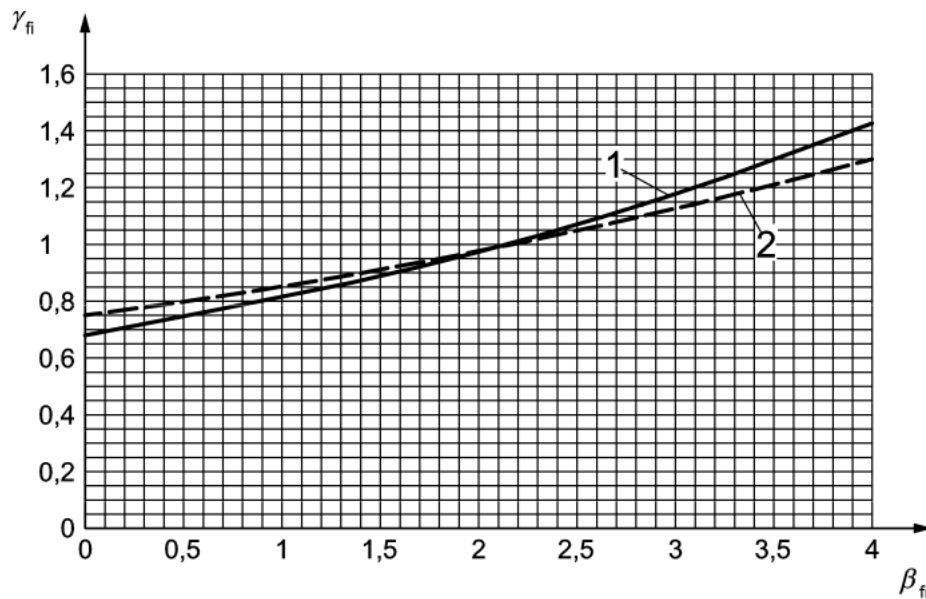


Abbildung 4 Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{fi,q}$ in Abhängigkeit von β_{fi} nach [4]; Kurve 1 Brandlastdichte nach Tabelle 1; Kurve 2 Brandlastdichte individuell
Wärmefreisetzung \dot{Q}_k :

Der zeitliche Verlauf der charakteristische Wärmefreisetzungsrates \dot{Q}_k in MW kann über Gl. 10 bestimmt werden. Der Anstieg der Wärmefreisetzung ist dabei als t^2 -Ansatz^a vorgesehen, der üblicherweise in der Brandentstehungsphase zur Anwendung kommt. Über den Parameter t_α wird die Anstiegsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der erwarteten Brandausbreitungsgeschwindigkeit analog zu Anhang E, welche von der vorhandenen Nutzung abhängt, definiert.

$$\dot{Q}_k = \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad \text{Gl. 10}$$

Die maximale Wärmefreisetzung $\dot{Q}_{max,f,k}$ ergibt sich nach Gl. 11 aus den nutzungsspezifischen Angaben aus Tabelle 6 und der betrachteten maximalen Fläche Brandraumes A_f . Dabei ist hervorzuheben, dass angenommen wird, dass der Brand nicht über die Bezugsfläche hinausreichen kann. Damit werden entsprechend qualifizierte Abschlüsse der Bezugsfläche vorausgesetzt. Sind die Abschlüsse nicht vorhanden oder kann deren brandschutztechnische Funktion nicht sichergestellt werden, ist die Bezugsfläche entsprechend zu vergrößern.

$$\dot{Q}_{max,f,k} = RHR_f \cdot A_f \quad \text{Gl. 11}$$

Wird der Brand unter Sauerstoffmangel aufrecht erhalten, kann die im vorliegenden Fall erreichbare Wärmefreisetzung durch Gl. 12 abgeschätzt werden. Diese Gleichung ist nach [4] bis zu einer Größe von 400 m² anwendbar.

$$\dot{Q}_{max,v,k} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{Gl. 12}$$

Dabei ist H_u der untere Heizwert des Brennstoffes, bei üblichen Brandlasten kann 17,3 MJ/kg angesetzt werden. Der Faktor χ kann für übliche Mischbrandlasten mit 0,7 (siehe oben) angegeben werden. Die Ventilationsöffnungen über die dem Brand Frischluft zugeführt werden kann, limitieren mit ihrer lichten Öffnungsfläche A_w und ihrer lichten Höhe h_w den Abbrand des Brandgutes.

Hinter dem Konzept aus Gl. 12 steckt der Modellfall eines Vollbrandes (post-flashover) den Drysdale [9] beschreibt. Dabei handelt es sich um ein Einraummodell bei dem angenommen wird, dass aus einem Raum, in dem ein Vollbrand mit homogenen Bedingungen vorherrscht, hinsichtlich des Druckes und der Temperatur. In einer vertikalen Wandöffnung stellt sich in Folge ein Strömungsprofil ein mit ein- und ausströmenden Massenströmen. Dabei ist, bei einem üblicherweise aus Erfahrung bei Raumbränden ähnlichen Dichtedifferenzen zwischen Rauchgas und Umgebung die Größe des ein- bzw. ausströmende Massenstrom abhängig von der Öffnungsfläche und der lichten Höhe der Öffnung (vgl. Gl. 12). Im Weiteren wird Gl. 12 nur zum Vergleich herangezogen. Die Begrenzung der unter den gegebenen Ventilationsöffnungen erreichbaren Wärmefreisetzungsrates wird mit dem Zonenmodell berücksichtigt.

Zeile [4]	Nutzung	Brandausbreitung	t_α [s]	RHR_f [MW/m ²]
1	Wohngebäude	Mittel	300	0,25
8	Verkaufsstätte	Schnell	150	0,25
9	Transport (öffentlicher Bereich)	langsam	600	0,25

Tabelle 6 Ausgewählte Parameter t_α für die Brandentwicklungsphase und die maximale Wärmefreisetzungsrate RHR_f nach [4]

In der Norm wird die Brandfläche für ein Bemessungsszenario nicht explizit definiert. Es ist jedoch denkbar, als Grundlage für den Abbrand ein geometrisches Abbrandmodell zu wählen, wie es auch die DIN 18230 unterstellt. Es wird dabei angenommen, dass die Brandlast im Raum gleichverteilt ist. Der Brand beginnt an einem beliebigen Punkt und breitet sich mit einer Geschwindigkeit v aus.

Die Kurve der Wärmefreisetzungsrate steigt dabei nach dem t^2 - Gesetz gemäß an, bis die maximale Wärmefreisetzungsrate RHR erreicht ist. Gemäß Definition klingt ab dem Zeitpunkt an dem 70 Prozent der Brandlast verbrannt sind der Brand linear ab.

3.2 DIN 18230-1

3.2.1 Äquivalente Branddauer

Die Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen beruht auf der Einstufung nach DIN 4102 bzw. DIN EN 13501. Die dort zugrunde gelegte Brandbelastung für Bauteile ist die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Die DIN 18230-1 zeigt mit dem Verfahren der äquivalenten Branddauer $t_{\bar{a}}$ eine Möglichkeit auf, Brandbelastungen die unter Berücksichtigung einer vorliegenden Situation, der Brandlast, der Umgebungsbauteile und der Ventilationsbedingungen auf eine entsprechende Belastung nach ETK umzurechnen. Das Prinzip der äquivalenten Branddauer wurde u. a. in den Vorgängerberichten dargestellt.

Die äquivalente Branddauer $t_{\bar{a}}$ bestimmt somit die maximale Brandeinwirkung die sich ohne eine Brandbekämpfung ergeben würde [10]. Sie ist abhängig von den vorhandenen Randbedingungen des Brandes und wird nach Abbildung 5 bestimmt.

$$t_{\ddot{a}} = q_r \cdot c \cdot w$$

q_r : rechnerische Brandbelastung [kWh/m²] **Abschnitt 6**
 c : Umrechnungsfaktor [min m²/kWh] **Abschnitt 7**
 w : Wärmeabzugsfaktor [-] **Abschnitt 8**

Abbildung 5 Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ nach DIN 18230-1 mit den Einflussgrößen und deren Abschnitten der DIN 18230-1 [5]

In Abbildung 6 werden die Einflussgrößen und deren Einfluss auf die für die Bestimmung der Brandeinwirkungen maßgebende Heißgastemperatur dargestellt.

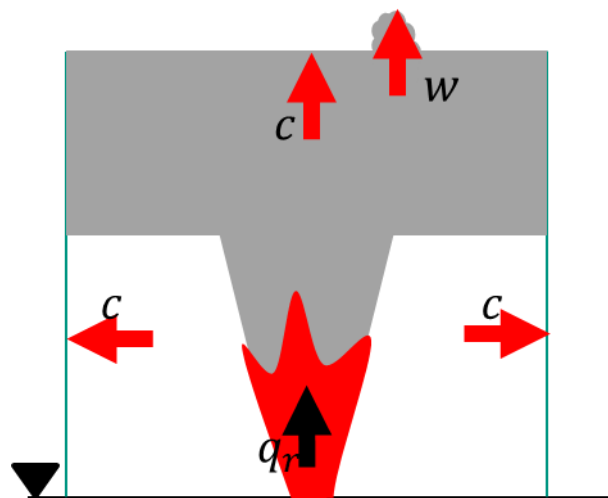


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Einflussgrößen eines Brandes innerhalb des Bemessungskonzeptes der DIN 18230-1

3.2.2 Sicherheitskonzept

Die erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen ergibt sich aus der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$, dem Sicherheitsbeiwert γ und dem Zusatzbeiwert α_L und werden in Abbildung 7 dargestellt.

$$erft_F = t_{\ddot{a}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L$$

$t_{\ddot{a}}$: äquivalente Branddauer [min]

α_L : Zusatzbeiwert zur Begrenzung der Brandausbreitung aufgrund der brandschutztechn. Infrastruktur
Abschnitt 10

γ : Sicherheitsbeiwert für Bauteile
Abschnitt 9

Abbildung 7 Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer $erft_F$ nach DIN 182301 und den Einflussgrößen und deren Abschnitten der DIN 18230-1 [5]

3.2.3 Sicherheitsbeiwert

Wie zuvor schon angedeutet, werden Bauteile in Sicherheitsklassen eingeteilt. Damit wird dem definierten Schutzziel vom Beginn des Kapitels Rechnung getragen. Es werden folgende Einstufungen in drei „Sicherheitsklassen für den Brandschutz (SK_b)“ [10] mit beispielhaften Bauteilen vorgenommen:

SK _b 1	SK _b 2	SK _b 3
<ul style="list-style-type: none"> • Dachtragwerk^d • nichttragende Außenwand 	<ul style="list-style-type: none"> • nichtaussteifende Decken • Bauteile des Dachtragwerkes 	<ul style="list-style-type: none"> • Haupttragwerk • Brandbekämpfung abschnitt BBA trennende Decken und Wände

Abbildung 8 Einteilung der Brandsicherheitsklassen nach DIN 18230-1 [5]

^d Damit sind Bauteile des Dachtragwerkes gemeint, die bei Versagen **nicht** zum Einstürzen des Gesamttragwerkes führen. Verbände oder Längspfetten die eine Aussteifung der Tragkonstruktion herstellen sind daher ausgeschlossen

Den Bauteilen und den davon abgeleiteten Teilsicherheitsbeiwerten liegt eine tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Geschossigkeit und der Sicherheitsklasse nach [10] zugrunde.

Tabelle 7 Versagenswahrscheinlichkeiten je Jahr nach [10]

	SK _b 1 p_{f1}	SK _b 2 p_{f2}	SK _b 3 p_{f3}
Mehrgeschossige Gebäude	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
Eingeschossige Gebäude	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$

Die Sicherheitsbeiwerte der SK_B 3 sind auf die 10%-Fraktile der Feuerwiderstandsdauer und die 90%-Fraktile der äquivalenten Branddauer bezogen (vgl. Abbildung 9). Der Variationskoeffizient der äquivalenten Branddauer und der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer mit jeweils 25 Prozent angesetzt [5].

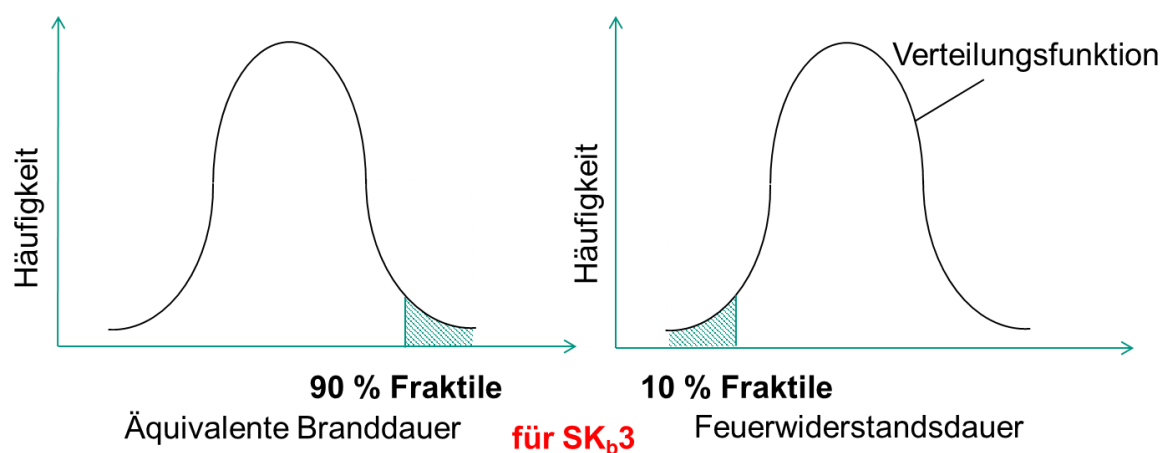


Abbildung 9 Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes γ nach DIN 18230-1

Der Sicherheitsbeiwert ist dabei gestaffelt nach der Größe des Brandbekämpfungsabschnittes. Dabei wird berücksichtigt, dass mit einer größeren Fläche die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden zunimmt. Sie wird mit p_1 $5 \cdot 10^{-6}$ je m² angenommen.

3.2.1 Brandschutztechnische Infrastruktur

Durch den Zusatzbeiwert α_L wird die Behinderung der Brandausbreitung durch sogenannte brandschutztechnische Infrastruktur wie beispielsweise:

- Werkfeuerwehr,
- Automatische Brandmeldeanlagen oder
- Halbstationäre oder selbsttätige Löschanlagen

berücksichtigt [10].

3.2.2 DIN SPEC 18230-4

Die DIN SPEC 18230-4 [1] definiert unter anderem Testfälle, die eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Methoden zulassen. Dabei kann die Bemessung der Feuerwiderstandsdauer in der Systematik der Normreihe DIN 18230 entsprechend Abbildung 10 erfolgen.

Der Grundgedanke ist, dass mit der Bestimmung der äquivalenten Branddauer und der Rückführung auf einen Wärmeabzugsfaktor w eine direkte Bemessung (nach erfolgter Simulation mit Grundbemessungsszenario) aus einer ermittelten Brandlastdichte erfolgen kann.

Das gezeigte Verfahren ist dabei **nicht** bauaufsichtlich eingeführt. Auch ist die DIN-SPEC-18230-4 ein Fachbericht und keine Norm.

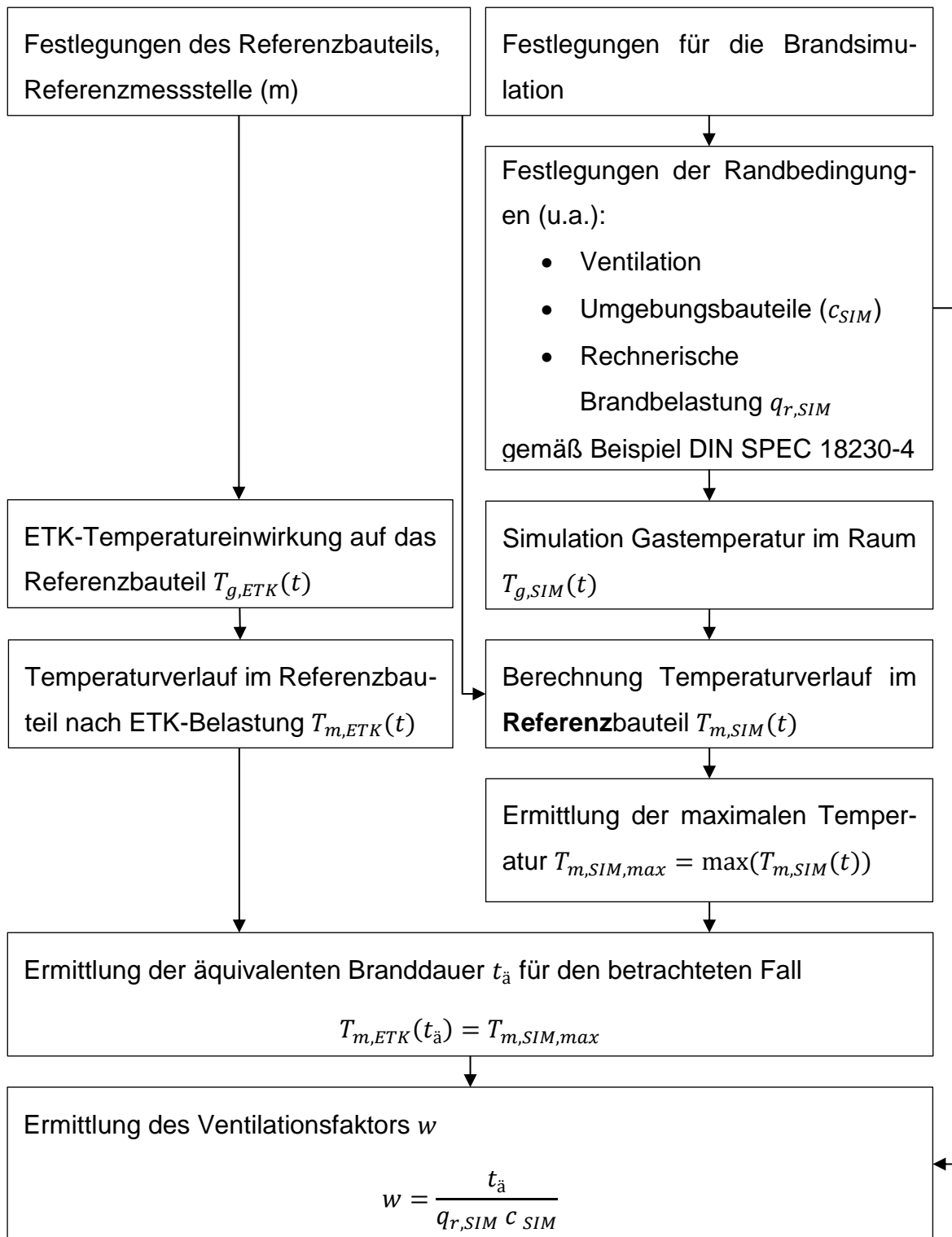


Abbildung 10 Ablaufschema Bemessung

3.3 DIN 18232

Die Anwendbarkeit von Bemessungsszenarien für die Beurteilung des Feuerwiderstandes von Tragwerken ist fortlaufend zu hinterfragen. Wie zuvor angedeutet sollte der Feuerwiderstand von Tragwerken auch die Standsicherheit in Grenzzuständen gegeben sein. Für eine Bemessung mit Brandszenarien muss daher sichergestellt sein, dass mit dem Brandszenario relevante Grenzzustände abgedeckt werden.

Die Normreihe der DIN 18232 [14], [15] mit den darin enthaltenen Bemessungsszenarien zielt darauf ab die Auslegung von Rauch- und Wärmeabzügen zu ermöglichen. Nimmt man die Ausführungen von Famers und Messerer [16] für die Zuordnung der Schutzziele des Bauordnungsrechtes zu den baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen heran, werden im Regelfall (ohne Abweichung) Anlagen und Möglichkeiten der Rauch- und Wärmeableitung schutzzielorientiert der Unterstützung der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung zugeordnet. Das entsprechende Brandszenario kann somit nicht den Grenzzustand (einen Vollbrand) darstellen, da eine Brandbekämpfung im Inneren des Gebäudes durch die Feuerwehr üblicherweise nicht vorgesehen ist. Eine wirksame Rauchableitung kann vielmehr in Ausnahmefällen eine Reduktion der Heißgastemperatur erzielen und dadurch die Einwirkungen im Brandfall auf das Tragwerk verringern. Des Weiteren kann eine wirksame Entrauchung bei der Freihaltung von Rettungswegen eingesetzt werden.

4 Beispiel DIN SPEC 18230-4

In der Vornorm DIN SPEC 18230-4 [1] werden verschiedene Beispielfälle definiert, die sich für eine Gegenüberstellung verschiedener Berechnungsmethoden eignen. Dabei steht im Fokus die Bestimmung, der für die Bemessung der Bauteile entscheidenden Heißgastemperaturen.

Dieser Bericht bezieht sich auf ein Beispiel („kleine Halle“) einer rechteckigen Halle mit einer Grundfläche von 400 m².

Die gezeigten Beispiele werden mit dem Zonenmodell Multi-Room-Fire Code (MRFC) berechnet. Es werden dabei die folgenden Einstellungen des Zonenmodells verwendet:

- Plume-Modell: Heskestad
- Einmischfaktor e : 1,0
- Flammenlänge-Modell Heskestad
- Strahlungsanteil Plume f 0,2

4.1 Kleine Halle 400 m²

Die Geometrie des Beispiels (vgl. Abbildung 11) ist eine 20 Meter lange und 20 Meter breite Halle, die eine Höhe von 6 Metern aufweist. In den Hallenwänden sind vier Öffnungen vorgesehen, die als ständig offen angenommen werden. Es sind im Bodenbereich zwei Tore mit einer Breite von 2 Meter und einer Höhe von 2,5 Meter auf der jeweils gegenüberliegenden Seite (West^e und Ostseite) vorhanden. Des Weiteren sind zwei Fenster mit jeweils 1x1 m je auf der Süd- bzw. Nordseite mit einer Sturzhöhe von 5 Metern vorgesehen.

Im folgenden fiktiven Vergleich sollen zwei Fälle verglichen werden:

- Brandschutztechnische Infrastruktur; mit (mL) und ohne Löschanlage (oL)

4.1.1 RANDBEDINGUNGEN

Die Randbedingungen entsprechen den Randbedingungen der DIN SPEC 18230-4 [1] und werden auch im Bericht Nr. 196^b beschrieben.

^e Die Himmelsrichtungen sind zur Orientierung und willkürlich gewählt

4.1.2 Szenario 1: Bemessungsbrand nach DIN 18230-4

Das Brandszenario oder der Bemessungsbrand sieht eine spezifische, im Raum gleichverteilte Brandlastdichte von 10 kg/m^2 vor. Die Brandlast hat einen Heizwert von $17\,280 \text{ kJ/kg}$ ($17,28 \text{ MJ/kg}$). Daraus ergibt sich eine Brandlastdichte von $172,8 \text{ MJ/m}^2$. Mit einer spezifischen Umsetzung von $30 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ ergibt sich eine Wärmefreisetzung von 144 kW/m^2 ($0,144 \text{ MW/m}^2$).

Im gegebenen Szenario wird ein geometrisches Abbrandmodell angenommen. Der Brand beginnt in der Mitte des Raumes und breitet sich radial r_2 (vgl. Abbildung 11) mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 1 m/min aus. Ist am Brandursprung die Brandlast verbraucht verringert sich die Brandfläche um die Kreisfläche mit Radius r_1 .

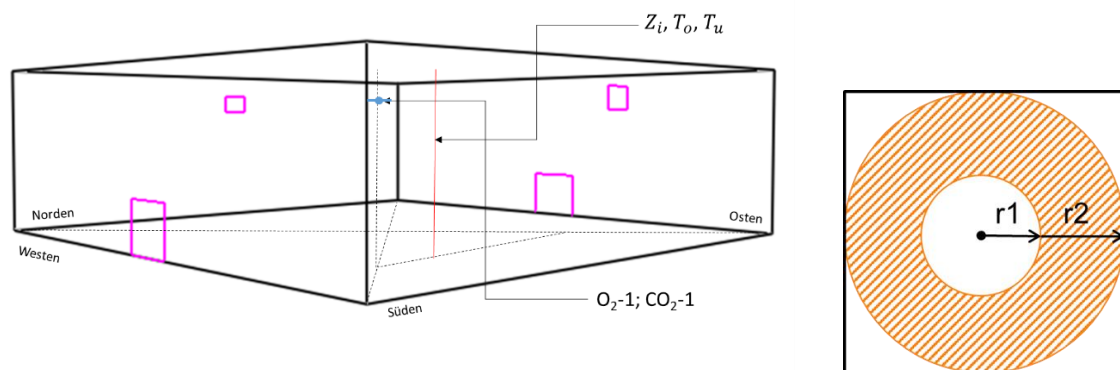


Abbildung 11 links: dreidimensionale Ansicht der Beispielgeometrie kleine Halle 400 m^2 ; rechts Darstellung des geometrischen Brandausbreitungsmodells

Bei dem gegebenen Brandszenario und unter der Annahme, dass der gesamte gemäß Szenario freigesetzte Brennstoff abbrennt ergibt sich eine Wärmefreisetzungskurve nach Abbildung 12.

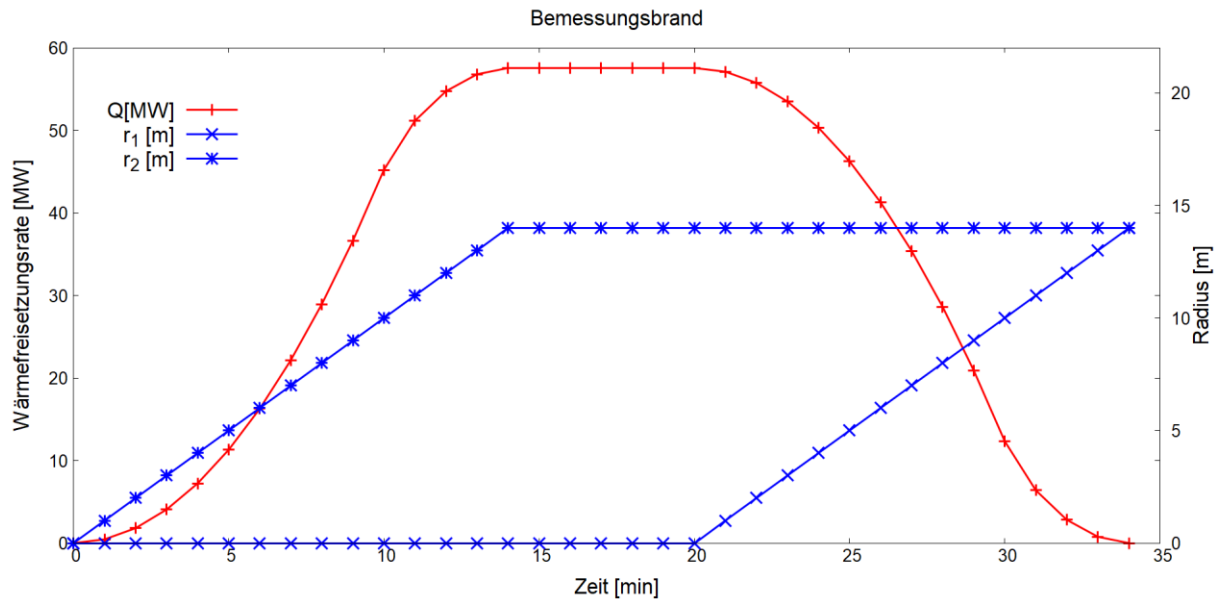


Abbildung 12 Verlauf der Wärmefreisetzungskurve und des Radius für Brandszenario kleine Halle

Damit ergibt sich eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 57,6 MW.

Die Umgebungsbauteile sind vorgegeben mit 30 cm starkem Beton. Nach DIN 18230-1 [5] ergibt sich ein Umrechnungsfaktor c von 0,2 min m²/kWh (Einflussgruppe II). Dabei sind die Materialkennwerte für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie Dichte temperaturabhängig vorgegeben.

4.1.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden bereits umfassend im Forschungsbericht 196^b dargestellt. Im Folgenden werden lediglich ausgewählte Ergebnisse zur besseren Vergleichbarkeit dargestellt.

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} und der Heißgastemperatur T_g werden in Abbildung 13 dargestellt. Die Heißgastemperatur T_g ist in der weiteren Betrachtung die im Zonenmodell ermittelte Temperatur T_o für die obere, deckennahe Zone.

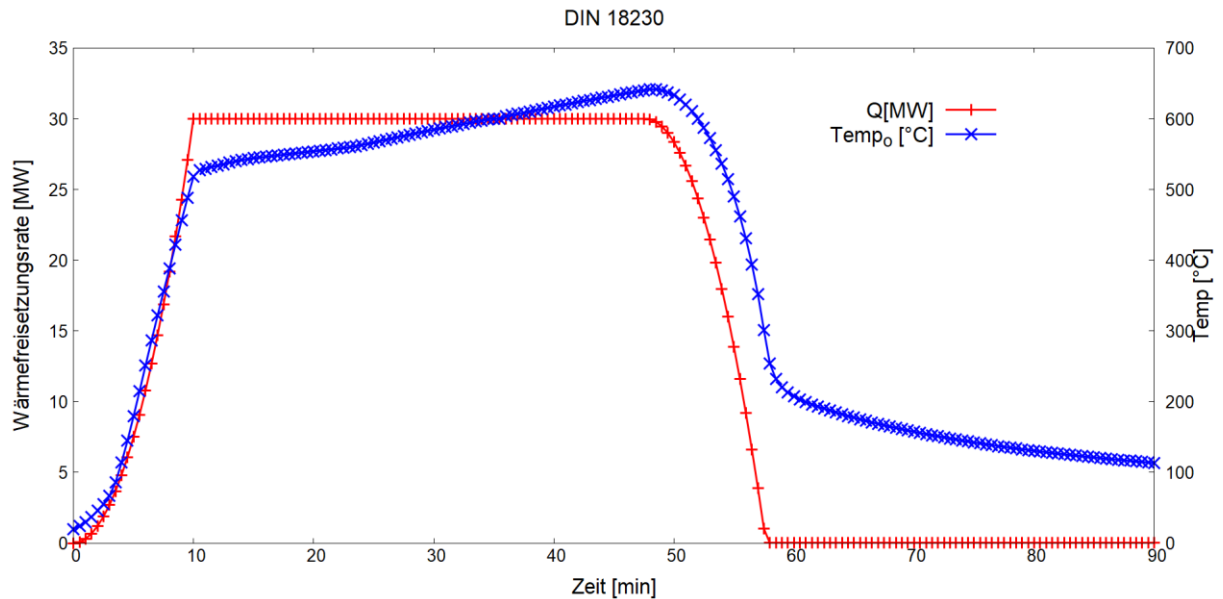


Abbildung 13 Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} und Heißgastemperatur T_g

Die Wärmefreisetzungsrates erreicht nach ca. 9 min das Maximum bei ca. 30 MW. Bei ca. 58 min fällt die Wärmefreisetzungsrates ab, da gemäß Brandszenario keine Brandlast mehr vorhanden ist. Die Heißgastemperatur folgt dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrates zu Beginn und steigt innerhalb des horizontalen Plateaus leicht an, bis zu einem Maximum von etwa 650°C.

Die äquivalente Branddauer t_a ergibt sich aus der Bauteilberechnung zu 25,8 min^b.

Erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit

Die erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit ergibt sich nach Abbildung 7 aus dem Sicherheitsbeiwert γ und dem Beiwert für die brandschutztechnische Infrastruktur α_L . Unter der Voraussetzung, dass es sich bei dem Bauteil, das zur Beurteilung steht, um ein Bauteil der Sicherheitsklasse SK_B 3 handelt ergeben sich die folgenden Werte.

- oL; $A_b \leq 2\,500\text{ m}^2$; $\gamma = 1,0$; $\alpha_L = 1,0$
- mL; $A_b \leq 2\,500\text{ m}^2$; $\gamma = 1,0$; $\alpha_L = 0,6$

Es wird für das Beispiel angenommen, dass keine Werkfeuerwehr und/oder flächendeckende automatische Brandmeldeanlagen oder halbstationäre Löschanlagen vorhanden sind. Damit ergibt sich eine erforderliche Feuerwiderstandsdauer von **25,8 min** (oL) bzw. **15,48 min**. Damit ergibt sich nach DIN 18230-1 die bauordnungsrechtliche Anforderung **feuerhemmend**, für beide Fälle.

4.1.3 Szenario 2: Bemessungsbrand nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB

Um vergleichbare Szenarien (mit und ohne Löschanlage) zu generieren wird im Folgenden entsprechend des Szenarios 1 mit einer Brandlastdichte von 172,8 MJ/m².

Das Verfahren nach Anhang BB stellt auf der Einstufung von Nutzungen ab. Mit dem Verfahren nach DIN 18230-1 gibt es speziell für den Industriebau ein Verfahren um über die situationsabhängige Ermittlung der Brandlasten wirtschaftliche Auslegungen von Tragwerken zu ermöglichen. Eine direkte Vergleichbarkeit zwischen der DIN 18230-1 bzw. der Bemessungsmethode ist nicht möglich. Um die Größenordnungen abzuschätzen und um die Einflüsse zu zeigen wird im Weiteren für das Beispiel von einer Nutzung des Gebäudes mit vergleichbaren Werten zum Szenario 1 (4.1.2) der Brandlastdichte und der maximalen Wärmefreisetzungsrates im Transportsektor (öffentlicher Bereich) ausgegangen. Für die Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden werden die Werte einer Verkaufsstätte verwendet. Damit ergibt sich nach Gleichung (Gl. 6) die mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 ausgehend von den Werten nach Tabelle 8.

Fläche A_f [m ²]	Zugeordnete Nutzung	a [1/(m ² a)] [4]	b [4]	p_1
400	Transport - Verkaufsstätte	6,6*10 ⁻⁵	1,0	0,027

Tabelle 8 Bestimmung der mittleren Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes p_1 für das Beispiel

Zusammen mit der Versagenswahrscheinlichkeit nach Tabelle 4 ergeben sich die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Szenarien.

Zugeordnete Nutzung	mL			oL		
	p_{fi}	$p_{fi,fi}$	β_{fi}	p_{fi}	$p_{fi,fi}$	β_{fi}
Schule	1,06*10 ⁻⁴	1,23*10 ⁻²	2,25	5,28*10 ⁻³	2,46*10 ⁻⁴	3,48

Tabelle 9 Wahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeitsindex für die beiden Szenarien

Zugeordnete Nutzung	$q_{f,k}$ [MJ/m ²]	χ [-]	mL	oL	mL	oL
			$\gamma_{fi,q}$ [-]	$\gamma_{fi,q}$ [-]	$q_{f,d}$ [MJ/m ²]	$q_{f,d}$ [MJ/m ²]
Transport	172,8	1,0	1,02	1,293	176,45	223,46

Tabelle 10 Daten Bemessungsbrandszenarien mit (mL) und ohne Löschanlage (oL)

Die Abschätzung der Wärmefreisetzungsrate als Eingabegröße erfolgt nach Tabelle 6. Die Menge vorhandene Brandlast zu Beginn ist gegeben durch die Bemessungswerte nach Tabelle 10, die vorhandene und die abnehmende Wärmemenge wird über den Heizwert H_u von Holz hier 17,28 MJ/kg (vgl. [4]) angenommen. Des Weiteren werden angenommen:

- t^2 -Anstieg: Langsam $t_\alpha=600$ sec
- maximale Design-Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max,f,k} = 100$ MW
- Lineare Abnahme der Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} ab Zeitpunkt t_{30} in sec bei 70 Prozent Abbrand (30 Prozent Restbrandlast m_{rest}), nach Gl. 13

Die Abklingphase, kann mit der Funktion nach Gl. 13 angenähert werden. Dabei ist \dot{Q}_{max} die maximal erreichte Wärmefreisetzungsrate bis zum Erreichen von t_{30} , dem Beginn der Abklingphase.

$$\dot{Q}_{Abkling}(t - t_{30}) = -\frac{1}{2} \frac{\dot{Q}_{max}^2}{m_{rest} \cdot H_u} t + \dot{Q}_{max} \quad \text{Gl. 13}$$

Die Verläufe der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlast ist in Abbildung 14 und Abbildung 15.

In beiden Szenarien ist dieselbe Brandausbreitungsgeschwindigkeit zugrundegelegt. Daher unterscheiden sich die Szenarien in der Anfangsphase nicht. Die maximale Design-Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max,f,k}$ wird nicht erreicht. Die Abklingphase beginnt bevor $\dot{Q}_{max,f,k}$ erreicht wird. Erreicht wird eine maximale Wärmefreisetzungsrate beim Szenario mL liegt bei ca. 38,4 MW und bei Szenario oL bei ca. 45 MW. Gleichzeitig ist die Dauer des Brandszenarios oL ca. 10 Minuten länger. Beides ist auf die in diesem Szenario höhere Brandlastdichte $q_{f,d}$ zurückzuführen (vgl. Tabelle 10).

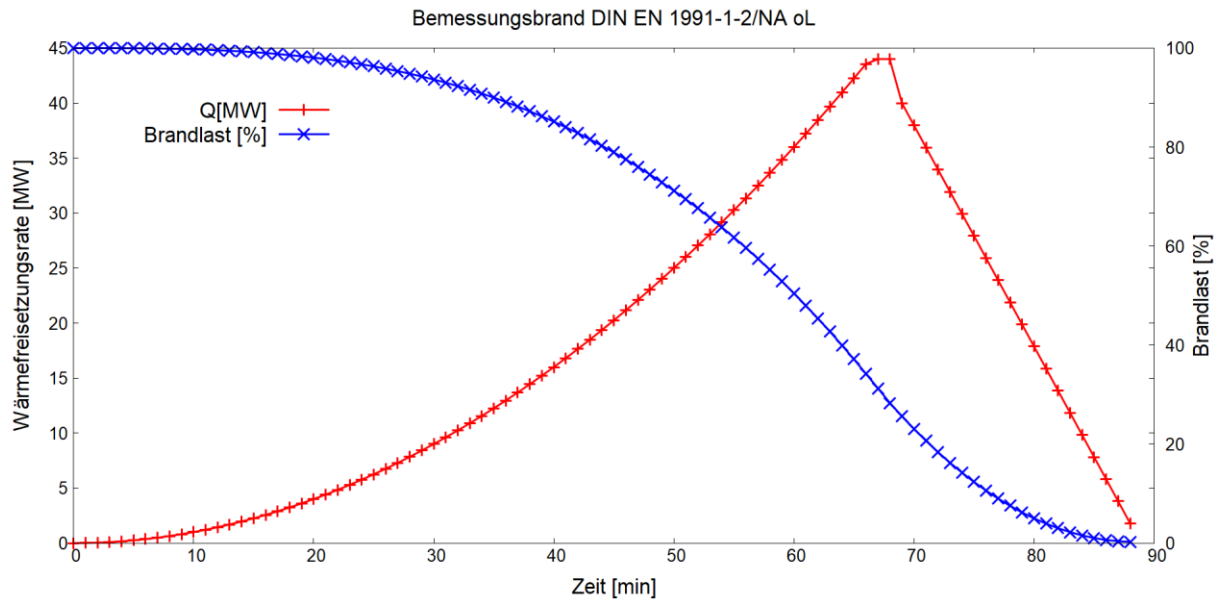


Abbildung 14 Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlast für das Brand-szenario DIN EN 1991-1-2 oL

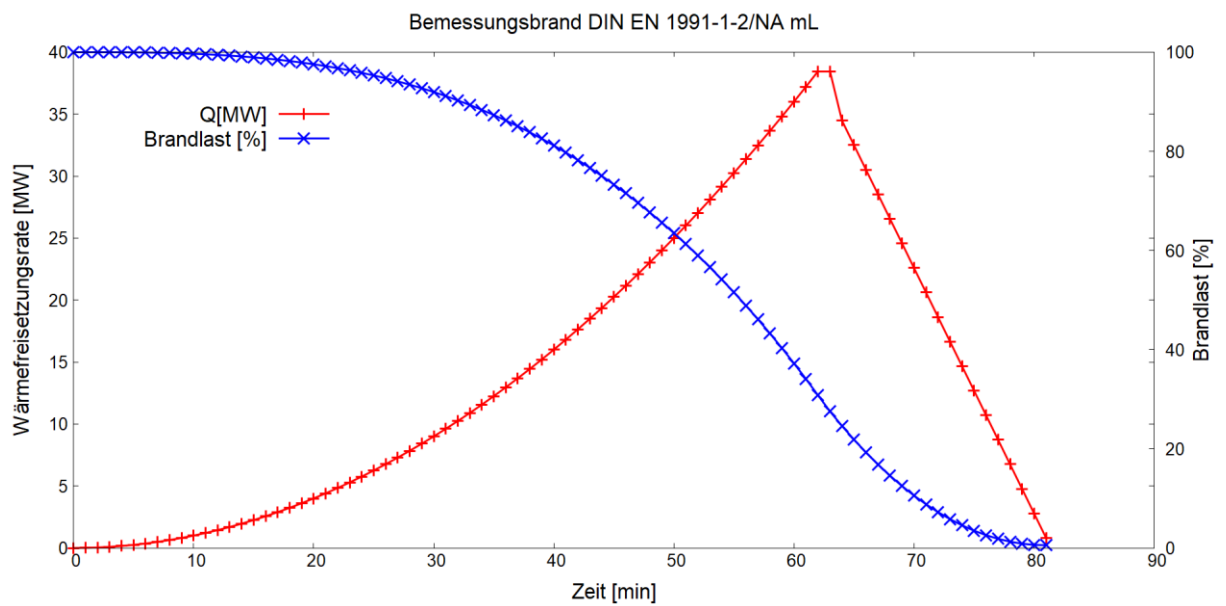


Abbildung 15 Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandlast für das Brand-szenario DIN EN 1991-1-2 mL

4.1.3.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung für das Brandszenario oL ist in Abbildung 16 und für das Brandszenario mL in Abbildung 17 dargestellt.

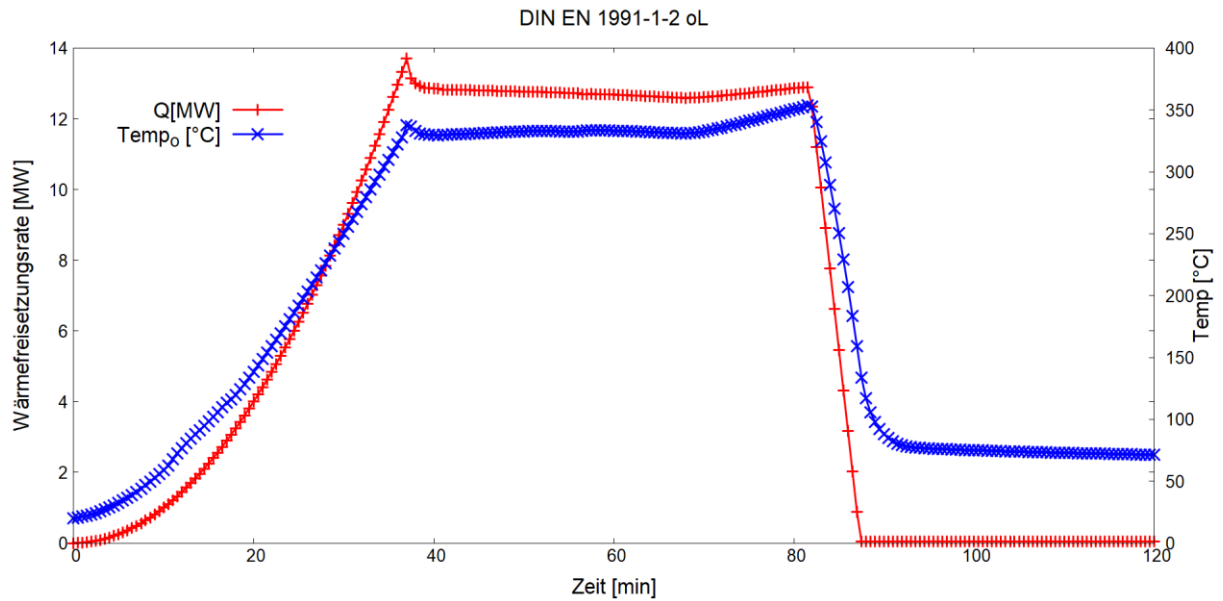


Abbildung 16 Ergebnisse-Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Heißgastemperatur für das Szenario oL

Die Wärmefreisetzungsrate im Szenario oL erreicht ihr Maximum nach ca. 36 min mit ca. 13,8 MW Leistung. Die maximale Heißgastemperatur wird nach ca. 85 min erreicht mit ca. 350°C.

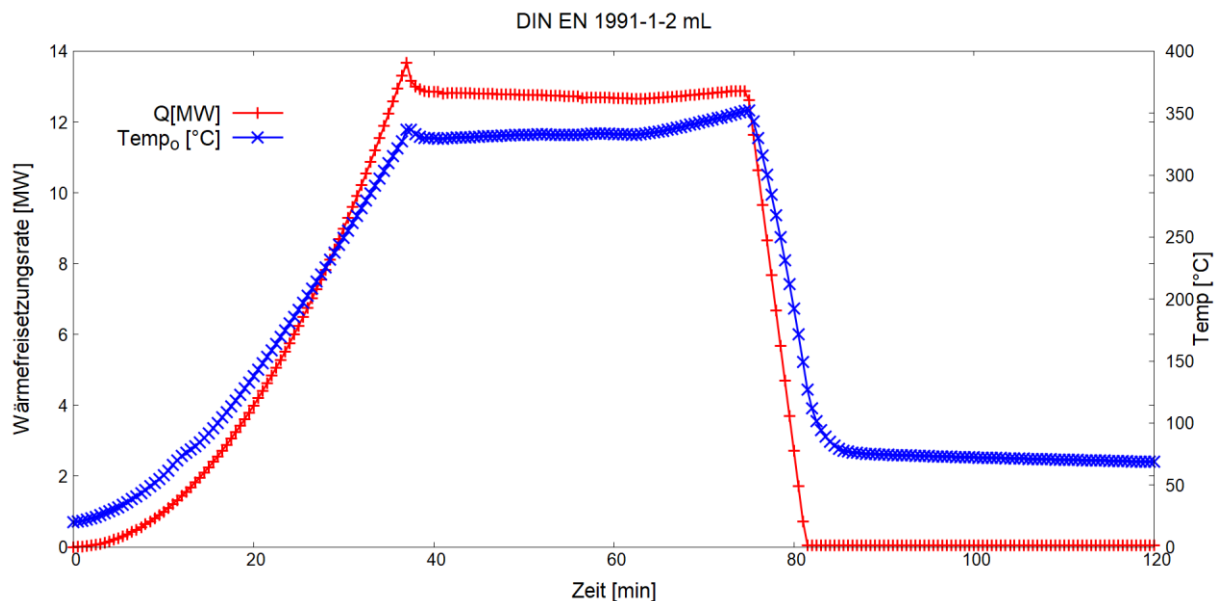


Abbildung 17 Ergebnisse-Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Heißgastemperatur für das Szenario mL

Im Szenario mL ist die Wärmefreisetzungsrate ebenso beschränkt auf 13,8 MW. Die Dauer der Wärmefreisetzungsrate ist aufgrund der im Szenario angenommenen kleineren Bemessungsbrandlastdichte im Vergleich ein wenig kürzer. Die maximale Heißgastemperatur ist ebenso bei ca. 350°C.

5 Diskussion

Für die Beurteilung von Brandsimulationen sind die Brandbedingungen entscheidend. Der gezeigte Testfall unter den durchgeführten Brandszenarien und Ventilationsöffnungen führen zu unterventilierten Bränden. In allen Fällen werden die nach Szenario vorgegebenen Wärmefreisetzungsraten nicht erreicht. Die wichtigsten berechneten Kenngrößen werden in Tabelle 11 aufgeführt.

Szenario	Max. Wärmefreisetzungsrates \dot{Q}_{max} [MW]	Max. Heißgastemperatur $T_{g,max}$ [°C]
DIN 18230	30	650
DIN EN 1991-1-2/NA oL	13,8	350
DIN EN 1991-1-2/NA oL	13,8	350

Tabelle 11 Zusammenstellung der wesentlichen, berechneten Größen in den Szenarien

Um eine Aussage zu treffen welche Auswirkung die berechneten Temperaturen auf die Bauteiltemperaturen haben müssen die Temperaturen im Bauteil analysiert werden. Beispielsweise kann eine kurze, höhere Heißgastemperatur zu niedrigeren Bauteiltemperaturen führen als eine lange Beanspruchung mit niedrigeren Temperaturen.

Die Unterschiede bei Szenarien mit (mL) und ohne Löschanlage (oL) sind im gezeigten Beispiel marginal. Das hängt in erster Linie damit zusammen, dass durch die Ventilationsbedingungen alleine die Brandintensität deutlich beschränkt wird. Unabhängig davon ist für Konstruktionen ohne Feuerwiderstand eine Feuerlöschanlage von enormer Bedeutung. Daher muss die Ausfallwahrscheinlichkeit, die zweifelsohne für Anlagen nach dem Stand der Technik (z. B. CEA 4001) sehr gering ist, bei der Beurteilung der Standsicherheit im Brandfall berücksichtigt werden.

6 Fazit und Ausblick

Es wurden zwei unterschiedliche Verfahren, die Bemessung gemäß der äquivalenten Branddauer und die Bemessung nach EC mit der Bestimmung der maßgebenden Heißgastemperatur am Bauteil zur Bemessung von Bauteilen gegenübergestellt. Die

Sicherheitskonzepte wurden dargestellt. Dabei ist zu betonen, dass die beiden Verfahren unterschiedliche Vorgehensweisen verfolgen. Der Grundgedanke hinter den Konzepten ist jedoch sehr ähnlich.

Das Verfahren der äquivalenten Branddauer ermittelt zunächst, aus einer bemessungsrelevanten Brandlastdichte und einer (vorgegebenen) Definition des Abbrandes, die Einwirkungen auf das Bauteil und bezieht diese auf Normbrandbedingungen. Für die anschließende Bemessung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer wird **nach** der Ermittlung der thermischen Einwirkung, diese mit einem Sicherheitsbeiwert und einem Zusatzbeiwert beaufschlagt. Das Sicherheitskonzept erfolgt daher nach der Bestimmung der thermischen Einwirkungen.

Dem gegenüber wird bei einer Bemessung nach Eurocode zunächst die bemessungsrelevante Brandlastdichte (nutzungsspezifisch) ermittelt. Das Sicherheitskonzept greift **vor** Ermittlung der thermischen Beanspruchung ein und die Brandlastdichte wird mit entsprechenden Beiwerten vergrößert oder reduziert. Damit ändern sich die Randbedingungen für die Berechnung von Bränden. Dieses Vorgehen findet sich sowohl in der DIN EN 1991-1-2 [3] Anhang E wie auch im nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2/NA [4] Abschnitt BB. Dabei gibt es mehrere Unterschiede zwischen den Verfahren. Unter anderem wird im Verfahren nach Anhang E für die bemessungsrelevante Brandlastdichte auf die 80 Prozent Fraktile zurückgegriffen. Im Abschnitt BB wird auf die 90 Prozent Fraktile zurückgegriffen. Des Weiteren verzichtet der Anhang E darauf, eine hinreichende Zuverlässigkeit zu definieren.

Der gezeigte Testfall war deutlich unterventiliert und der große Einfluss der Ventilationsbedingungen auf die Wärmefreisetzungsrate wurde unabhängig des gewählten Szenarios gezeigt. Bei der Bemessung von Bauteilen und der Anwendung von Naturbrandverfahren ist daher immer zu berücksichtigen, dass die tatsächlichen Ventilationsbedingungen auf der sicheren Seite abgeschätzt werden. Beispielsweise können Fenster, die während eines unterventilierten Brandes versagen durch die Ventilation des Brandes die Wärmefreisetzungsrate beeinflussen. Hinweise welche Öffnungen wie berücksichtigt werden können finden sich in der DIN 18230-1.

Die Bemessungsbrandszenarien decken durch die nutzungsspezifische Definition von Brandlastdichten und Wärmefreisetzungsraten einen Großteil der baupraktischen Fragestellungen ab. Es treten jedoch immer wieder Sonderfragestellungen auf die es erforderlich machen auf selbst gewählte Brandszenarien zurückzugreifen. Hierfür gibt

es mit der DIN 18009-1 ein Grundgerüst wie solche Nachweise zu strukturieren sind. Ziel muss es immer sein mit einer hinreichenden Zuverlässigkeit das allgemeine Sicherheitsniveau herzustellen. Dafür werden weitere Erfahrungen und in letzter Konsequenz die Erarbeitung eines ganzheitlichen Sicherheitskonzeptes erforderlich. Beispielsweise ist für eine Bemessung nach dem Schema der DIN SPEC 18230-4 wie es in Abbildung 10 gezeigt wird zu prüfen, wie ein Sicherheitskonzept entwickelt werden kann oder ob eine solche Nachweisführung mit dem Sicherheitskonzept der DIN 18230-1 bereits abgedeckt ist. Hierfür sollten in naher Zukunft weitere Forschungsarbeiten initiiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Normenausschuss Bauwesen, „DIN SPEC 18230-4 Baulicher Brandschutz im Industriebau Teil 4: Brandsimulation,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2015.
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik, „Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen,“ Berlin, Ausgabe 2019/1 Druckfehlerberechtigung 7. August 2020.
- [3] Normenausschuss Bauwesen, „DIN EN 1991-1-2 Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [4] Normenausschuss Bauwesen, „DIN EN 1991-1-2/NA Nationaler Anhang-National festgelegte Parameter-Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen -Brandeinwirkungen auf Tragwerke,“ Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- [5] Normenausschuss Bauwesen und Feuerwehrwesen, „DIN 18230-1 Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2010.
- [6] A. Haksever und E. Hagen, Natürlicher brand, seine Einflußparameter in kleinen und großen Brandräumen, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 1988.
- [7] C. Knaust und C. Kusche, „Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen,“ Fraunhofer IRB, 2013.
- [8] H. Bub, D. Hosser, K.-B. Marita und U. Schneider, Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1983.
- [9] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, West Sussex: John Wiley & Sons, 2. Auflage, 1998.

- [10] U. Schneider, T. Hegger, U. Max, F. Mehl, U. Seifert und K.-D. Wathling, Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz, Renningen: expert Verlag, 2007.
- [11] „Risikomodelle und Sicherheitskonzepte,“ in *Technischer Bericht vfdb TB 04-01 März 2020 Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), März 2020, pp. 358-394.
- [12] D. Hosser, A. Weilert, C. Klinzmann, R. Schnetgöke und C. Albrecht, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben-Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung), Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz-TU Braunschweig, 2008.
- [13] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB, Baulicher Brandschutz im Industriebau Kommentar zu DIN 18230 und Industriebaurichtlinie, Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2003.
- [14] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 18232-2 Rauch und Wärmefreihaltung-Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA),“ Beuth Verlag , Berlin, November 2007.
- [15] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 18232-5 Rauch- und Wärmefreihaltung- Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA),“ Beuth Verlag, Berlin, November 2012.
- [16] G. Famers und J. Messerer, „"Rettung von Personen" und "wirksame Löscharbeiten" - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung,“ Grundsatzpapier der Fachkommision Bauaufsicht, 2008.

H i n w e i s

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
<http://www.ffb.kit.edu/>**

und des

**Instituts der Feuerwehr (IdF)
am Institut für Brand und Katastrophenschutz (IBK) Heyrothsberge
<https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/>
eingesehen werden.**