

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

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

Teil I: Grundlagen

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

180

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. 180

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

Teil 1: Grundlagen

von

Dipl.-Ing. Dominique Max

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2017

FA. Nr. 228 (2/2014)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">180</p>	Titel des Berichtes: Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes Teil I: Grundlagen		ISSN: 0170-0060
Autoren: Dipl.-Ing. Dominique Max Dr.-Ing. Ilian Dinkov		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 228 (2/2014)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und – senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehr-angelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Dezember 2017			
Seitenzahl: 98	Bilder: 20	Tabellen: 8	Literaturverweise: 82
Kurzfassung: Im vorliegenden Bericht werden verfügbaren Methoden zur ingenieurmäßigen Beschreibung von Bränden behandelt. Dieser Bericht dient als Einleitung eingehender Untersuchungen zur Bewertung und Gegenüberstellung von Bemessungsansätzen sowie der Modellierung. Ingenieurmethoden des Brandschutzes werden herangezogen, um den Nachweis zu führen, dass Gebäude sicher sind durch die Erfüllung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele gemäß der gültigen Bauordnung (Landesbauordnung). Die Schutzziele berühren gleichermaßen die Belange des vorbeugenden wie auch des abwehrenden Brandschutzes, so dass im Bericht keine scharfe Abtrennung dieser Brandschutzmaßnahmen gezogen wird. Brandszenarien und Bemessungsbrände bilden wesentliche Eingabeparameter für ingenieurmäßige Berechnungen eines Brandes und dessen Auswirkungen. Es stehen hierfür Zonen- und Feldmodelle zur Verfügung. Die wesentlichen Grundzüge der Modellierung werden beschrieben und modellspezifische, bekannte Anwendungsgrenzen werden zusammengestellt. In Form von Richtlinien und Normen stehen unterschiedliche Bemessungsansätze zur Verfügung. Man unterscheidet hierbei Brandszenarien und Bemessungsbrände. Brandszenarien definieren ein eintretendes Szenario, das unter den konkret vorliegenden Gegebenheiten ablaufen kann. Dabei liegt ein bemessungsrelevantes Brandszenario dann vor, wenn ein Szenario mit hinreichender Wahrscheinlichkeit auftritt und das den größten Schaden verursachen kann. Es stehen Rechenverfahren, zum Nachweis der Feuerwiderstandsdauer unter Vorgabe eines definierten Temperaturverlaufes (Einheitstemperaturzeitkurve, Außenbrandkurve und Hydrocarbonkurve) oder unter Vorgabe von Brandleistungen (DIN EN 1991-1-2) bzw. brandlastabhängigen Bemessungsbrandszenarien (DIN 18230) zur Verfügung. Zum Nachweis der Freihaltung und Abfuhr von Rauch und Wärme (DIN 18232 und VDI 6019) sind weitergehend Regelungen vorhanden			
Schlagwörter: Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Modellierung, Zonenmodell, Feldmodell, Bemessungsbrand, Brandszenarien, Brände			

Inhaltsverzeichnis

BERICHTSKENNBLATT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XI
FORMELVERZEICHNIS	XIII
1 EINLEITUNG	1
2 BAURECHTLICHER UND NORMATIVER RAHMEN	2
2.1 Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit	6
2.2 Nachweis zur Rauchableitung	7
3 DER BRAND	10
3.1 Brandverlauf	12
4 BRANDSZENARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE	15
4.1 Brandszenarium	15
4.2 Bemessungsbrand	17
4.2.1 Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)	18
4.2.2 Außenbrandkurve	18
4.2.3 Hydrocarbonkurve	19
4.2.4 t^2 Modelle	20
4.2.5 DIN 18232	22
4.2.6 VDI 6019 Blatt 1	24
4.2.7 DIN 18230	25
4.2.8 Naturbrandmodelle	28

5	INGENIEURMETHODEN	33
5.1	Zonenmodelle	33
5.1.1	Erhaltungsgleichungen	35
5.1.2	Plume Modellierung	36
5.1.3	Ceiling Jet	37
5.1.4	Anwendungsgrenzen	38
5.2	Feldmodelle	40
5.2.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen	42
5.2.1.1	Massenbilanz	43
5.2.1.2	Impulsbilanz	43
5.2.1.3	Energiebilanz	44
5.2.1.4	Bilanz der Elementmassen (Speziesbilanz)	45
5.2.2	Newton-Ansatz	46
5.2.3	Turbulente Strömungen	47
5.2.3.1	Reynolds-Mittelung	48
5.2.3.2	Reynolds-Gleichungen	49
5.2.4	Turbulenzmodelle	50
5.2.4.1	Die Boussinesq-Hypothese	50
5.2.4.2	Die Prandtl'sche Mischungsweg-Hypothese	51
5.2.4.3	Das Standard k- ϵ Turbulenzmodell	51
5.2.5	Verbrennungsmodellierung (Reaktionsmodell)	53
5.2.5.1	Brutto-Reaktionen	54
5.2.5.2	Eddy-Dissipation-Modell	55
5.2.5.3	Finite-Rate-Chemistry	55
5.2.5.4	Chemisches Gleichgewicht	56
5.2.5.5	Tabellierungstechniken: Flamelet-Ansatz	56
5.2.6	Strahlungsmodellierung	57
5.2.7	Diskretisierungsmethoden	59
5.2.7.1	Finite Differenzen Methode (FDM)	60
5.2.7.2	Finite Volumen Methode (FVM)	61
5.2.8	Numerischen Berechnungsmethoden	65
5.2.8.1	Reynold-Averaged-Navier-Stokes-Equations (RANS)	65
5.2.8.2	Large-Eddy - Simulation (LES)	65
5.2.8.3	Direkte Numerische Simulation (DNS)	65
5.2.9	Anwendungsgrenzen	66
6	ZUSAMMENFASSUNG	68
7	FAZIT UND AUSBLICK	69

LITERATURVERZEICHNIS	70
ANHANG	79
ANHANG 1. AUSZUG ANLAGE MUSTER-LISTE DER TECHNISCHEN BAUBESTIMMUNGEN ZU NATURBRANDVERFAHREN	80
ANHANG 2. EINGABEDATEN FÜR BRANDLASTGESTEUERTE, CHARAKTERISTISCHE WÄRMEFREISETZUNGSKURVEN NACH DIN 199112/NA 82	
ANHANG 3. AUSGEWÄHLTE PLUMEFORMELN NACH [28] BZW. [42]	83

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 Darstellung der Schutzziele entsprechend des Grundlegendokuments Brandschutz [2].....	3
Abbildung 2 Schutzziele entsprechend des Grundlegendokuments Brandschutz [2] mit einer beispielhaften Zuordnung zu Brandschutzmaßnahmen	4
Abbildung 3 Schematische Darstellung der Wärme- und Stoffströme sowie deren Mechanismen für den Abbrand eines flüssigen Brennstoffes.....	11
Abbildung 4 Einflussgrößen eines Raumbrandes [25].....	12
Abbildung 5 Qualitativer Temperaturverlauf (Mitte Decke) eines Brandes in einem geschosshohen ca. 25 m ² großen Raum mit gewöhnlicher Möblierung und konstanten Ventilationsbedingungen.....	13
Abbildung 6 Mögliche Gliederung von Design Fires nach [23]	17
Abbildung 7 Vergleich von Temperaturzeitkurven, Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), Außenbrandkurve und Hydrocarbonkurve mit qualitativen Temperaturverläufen (Decke) zweier Realbrandversuche, Brandversuch an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik [32] und Versuch aus Versuchsreihe in Lehrte [33].....	20
Abbildung 8 t ² -Brandleistungskurven mit Referenzzeitpunkt $t_i = 0$	22
Abbildung 9 Definition eines Steady-State Bemessungsbrandes nach [5]	22
Abbildung 10 Brandleistungskurven nach DIN 18230-2 (spez. Brandleistung 300 kW/m ²).....	24
Abbildung 11 beispielhafter Brandverlauf einer quadratischen 1 600 m ² Halle mit den Bemessungsbrandgrößen der Referenzhalle (siehe Text) unter Annahme eines brandlastgesteuerten Brandes.....	27
Abbildung 12 Beispielhafte charakteristische Wärmefreisetzungskurven nach DIN 1991-1-2/NA mit Eingabedaten (siehe Anhang 2).....	30
Abbildung 13 Schematische Darstellung Zonenbildung in einem Zwei-Zonenmodell (Fall 2)	34
Abbildung 14 Schematische Darstellung der Stoff- und Energieströme in einem Zonenmodell (Fall 2).....	35
Abbildung 15 Schematische Darstellung des Ceiling Jets (Fall 1).....	38

Abbildung 16 Ablaufschema zur Durchführung einer Brandsimulationsrechnung mit Feldmodellen	42
Abbildung 17: Kontrollvolumina, Knoten und Integrationspunkte in der Finite Volumen Methode	63
Abbildung 18: links: unstrukturiertes Netz rechts: strukturiertes Netz.....	64
Abbildung 19: Ausschnitt eines unstrukturierten Gitters, incl. Verfeinerung in Nähe zu festen Wänden.	64
Abbildung 20 Stromlinien bzw. Wirbel unterschiedlicher Größe einer turbulenten Rohrströmung mit schematischer Darstellung eines Gitternetzes mit den Gitterweiten δy und δz	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 systematisches, schrittweises Verfahren um relevante Brandszenarien mit dem entsprechenden quantifizierbaren Risiko zu identifizieren	15
Tabelle 2 Angaben zu Flammenausbreitungsparameter α für quadratisches Ausbreitungsmodell	21
Tabelle 3 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten nach [14]	23
Tabelle 4 Angaben der Verbrennungseffektivität χ nach	32
Tabelle 5 Randbedingungen ausgewählter Plumeformeln nach [28].....	39

Abkürzungsverzeichnis

aaRdT	allgemein anerkannten Regeln der Technik
CFAST	Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNS	Direkte numerische Simulation
EC	Eurocode
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
FDM	Finite Differenzen Methode
FDS	Fluid Dynamics Simulator
FEM	Finite Elemente Methode
FVM	Finite Volumen Methode
LES	Large-Eddy Simulation
LTB	Liste der technischen Baubestimmungen
MBauVorIV	Muster Bauvorlage-Verordnung
MBO	Muster Bauordnung
MIndBauRL	Muster-Industriebaurichtlinie
MLTB	Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen
M-PPVO	Muster-Verordnung über die Prüfsachverständigen
MRA	Maschinelle Rauchabzugsanlagen
MRFC	Multi-Room-Fire-Code

MVkVO	Muster-Verkaufsstättenverordnung
MVStättVO	Muster-Versammlungsstättenverordnung
MVV TB	(Muster)-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
NRA	Natürliche Rauchabzugsanlagen
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
RANS	engl.: Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VFDB	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.

Formelverzeichnis

α	Wärmefreisetzungparameter
β_k	dimensionsloser Temperaturexponent
$\gamma_{fi,q}$	Teilsicherheitsbeiwert
Δ	Differenz
ε	Dissipationsrate
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	Dynamische Viskosität
$\nu_k^{(j)}$	Atomanzahl
ν_t	Wirbelviskosität
$O(x)$	Approximationsfehler
π	Kreiszahl
ρ	Dichte
σ_{ij}	Spannungstensor
$\sigma_{i,j}$	viskose Spannung
σ_k	turbulente Prandtlzahl
σ_c	turbulente Schmidtzahl
σ_{stg}	Streukoeffizient
σ_{Str}	Boltzmannkonstante
τ	Reynoldsspannung
Φ	Phasenfunktion, Transportgleichungen

χ	Verbrennungseffektivität
Ω_{stg}	Raumwinkel der Strahlung
$\dot{\omega}$	Verbrennungswärme
$\dot{\omega}_k$	Reaktionsrate
A	Fläche
A_b	Oberfläche der Brandlast
A_k	Präexponentieller oder Frequenzfaktor
a_{str}	Absorptionskoeffizient
c_μ	dimensionsloser Faktor der Wirbelviskosität
c_p	spezifische Wärmekapazität
c	Faktor für Umgebungsbauteile
D	Durchmesser
$\frac{Di}{Dt}$	totales Differential
E	Gesamtenergie
E_k	Aktivierungsenergie
e	innere Energie
F_k	Geschwindigkeitskonstante
f_i	Volumenkraft des Volumens i
g	Erdbeschleunigung, gaseitig
H	Totalenthalpie

H_{ui}	unterer Heizwert
h	statische Enthalpie
\dot{h}	Enthalpiestrom
h_{fl}	normalisierte Flammenhöhe
$\Delta h_{f,k}^0$	Standard Bildungsenthalpie
I	Strahlungsintensität
$[I]$	molare Konzentration,
j_i^j	Diffusionsstrom
k	kinetische Energie
l	charakteristische Länge
l_t	Mischungslänge
m_i	Abbrandfaktor des Stoffes i
M_i	Masse des Stoffes i
p	Druck
\dot{Q}	Wärmestrom/Wärmefreisetzungsrate
\dot{Q}^*	Froude-Zahl
q_i	Energiestrom
q_r	Brandlastdichte
R_k	Reaktionsrate
r	Reaktionsordnung
\vec{r}	Positionsvektor

S_c	Schmidtzahl
s	Weglänge
\vec{s}	Ausbreitungsrichtung der Strahlung
\vec{s}_{stg}	Ausbreitungsrichtung der gestreuten Strahlung
T	absolute Temperatur
T_g	Gastemperatur in °C
t	Zeit
t_f	Feuerwiderstandsdauer
t_i	Referenzzeitpunkt von Entzündung bis exponentieller Anstieg der Wärme-freisetzung
$t_{\ddot{a}}$	äquivalente Branddauer
u	Geschwindigkeit in x Richtung
u_{str}	Brechungsindex
\bar{u}	mittlere Geschwindigkeit
v	Geschwindigkeit in y Richtung
W	Molmasse
w	Geschwindigkeit in z Richtung, Faktor für Wärmeabzugsflächen
x	Ort auf x Koordinate
Y_k	Massenbruch Spezies k
Z	Massenbruch

1 Einleitung

Um die Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden sicherzustellen, werden seitens des Gesetzgebers in den Bauordnungen Anforderungen definiert, die ein Gebäude zu erfüllen hat. Diese betreffen unter anderem die Standsicherheit oder die bauphysikalische Eigenschaften, wie Schallschutz, Feuchteschutz und den Brandschutz.

Können materielle Anforderungen der Bauordnung aufgrund z.B. geometrischer Zwänge nicht erfüllt werden, kann die Sicherheit eines Gebäudes durch Ingenieurmethoden des Brandschutzes mittels Brandsimulationsrechnungen nachgewiesen werden indem definierte Kriterien eingehalten werden. Eine Übersicht der Nachweisverfahren wird in Kapitel 4 gegeben.

Zur Durchführung von Brandsimulationsrechnungen stehen unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung, mit denen ein Brand mit gegebenen Randbedingungen, wie Geometrie oder Anordnung brennbarer Stoffe abgebildet werden kann. Zunächst wird kurz der Brand mit seinen Eigenschaften und Auswirkungen (Kapitel 3) beschrieben um die den Modellen zugrunde liegenden Phänomene zu erklären. Bemessungsrelevante Ansätze die Eingabeparameter für die Berechnungsmodelle darstellen werden in Kapitel 4 erläutert. Eine Beschreibung der Modellen bzw. Methoden wird in Kapitel 5 gegeben. Aus den Ergebnissen lassen sich Schlussfolgerungen auf die Belastung von Bauteilen und Personensicherheit schließen. Jedoch liegen den Berechnungen Annahmen und Modelle zu Grunde, die dazu führen können, dass aus den Rechnungen gewonnenen Erkenntnisse, nur bedingt für den betrachteten Fall aussagekräftig sind.

Der vorliegende Bericht soll die Methodik der Ingenieurmethoden beschreiben und hinsichtlich deren Anwendung auf baupraktische Problemstellungen untersuchen.

Im folgenden Kapitel 2 wird der baurechtliche Rahmen erläutert, in dem Ingenieurmethoden des Brandschutzes zur Anwendung kommen.

2 Baurechtlicher und normativer Rahmen

Maßnahmen, die den Brandschutz betreffen werden in zwei Kategorien unterteilt. Der **vorbeugende Brandschutz** umfasst alle Maßnahmen die im Vorfeld eines Brandes unternommen werden. Darunter zählen der bauliche, anlagentechnische und organisatorische Brandschutz.

Neben den vorbeugenden Maßnahmen fasst der **abwehrende Brandschutz** Maßnahmen zusammen, die nach dem Entstehen eines Brandes getroffen werden müssen, insbesondere das Retten und Löschen durch die Feuerwehr.

Das Baurecht konkretisiert Maßnahmen in Form von materiellen Anforderungen zur Erfüllung der Schutzziele (siehe unten).

Das Baurecht wird in der Bundesrepublik Deutschland als Landesrecht ausgeübt, das von den Bundesländern definiert und durchgesetzt wird. Hierfür werden Landesbauordnungen (LBO) erlassen.

Die grundsätzlichen Schutzziele, die ein Gebäude erfüllen muss, sind in den meisten Bauordnungen gleich und lehnen sich an der Schutzzieldefinition der Musterbauordnung (MBO) [1] an. In § 14 (MBO) werden die Schutzziele des Brandschutzes wie folgt definiert:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Das Grundlagendokument Brandschutz [2] der europäischen Kommission greift die oben genannten Schutzziele auf und konkretisiert diese entsprechend Abbildung 2 weiter.

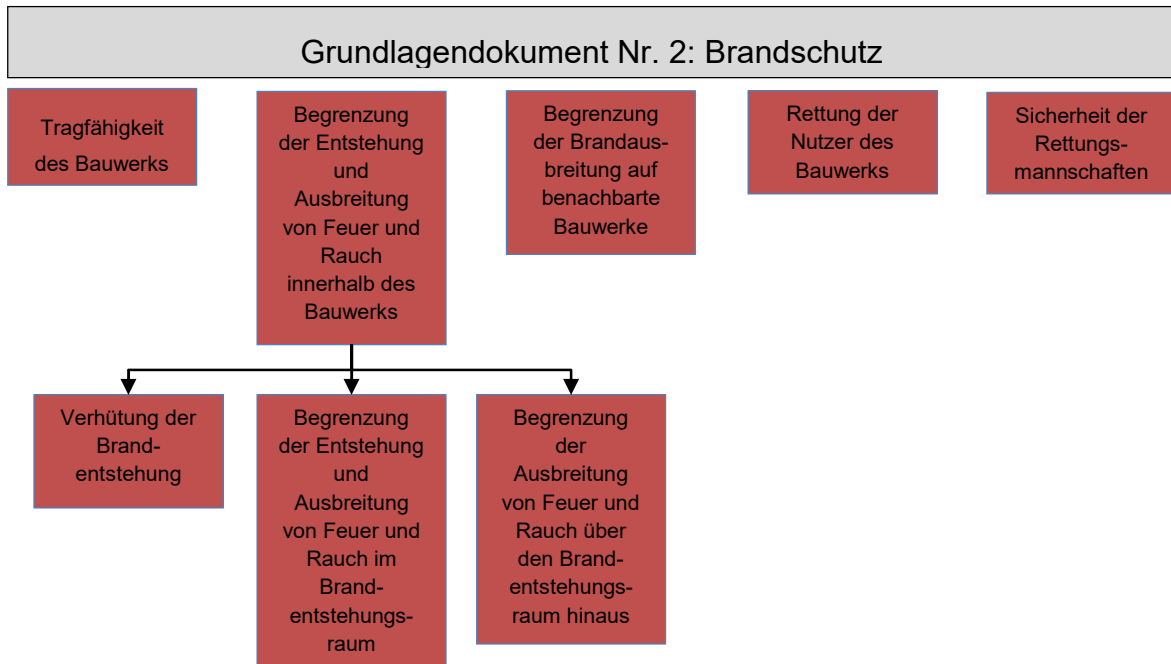


Abbildung 1 Darstellung der Schutzziele entsprechend des Grundlegendokuments Brandschutz [2]

Um die zuvor eingeführte Nomenklatur der Brandschutzmaßnahmen aufzugreifen ist in Abbildung 2 eine beispielhafte Zuordnung der Schutzziele aufgezeigt. Diese zeigt, dass die Schutzziele nicht eindeutig zu einer bestimmten Brandschutzmaßnahme zugeordnet werden können. Vielmehr können Schutzziele teilweise nur durch ein Bündel an Brandschutzmaßnahmen unterschiedlichster Kategorien erreicht werden.

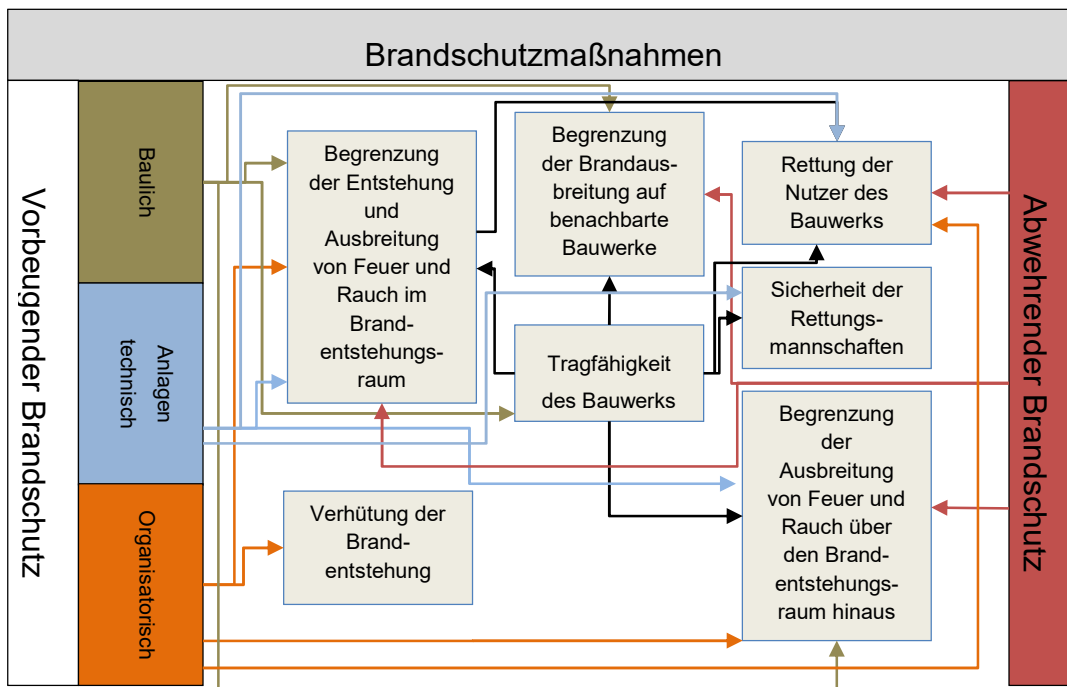


Abbildung 2 Schutzziele entsprechend des Grundlagendokuments Brandschutz [2] mit einer beispielhaften Zuordnung zu Brandschutzmaßnahmen

Zur Erfüllung bestimmter Schutzziele gibt das Baurecht konkrete materielle Anforderungen vor, z.B. hinsichtlich des Raumabschlusses und der Feuerwiderstandsfähigkeit, die Bauprodukte bzw. Bauarten in der jeweiligen Einbausituation erfüllen müssen. Ebenso können (vorwiegend bei Sonderbauten) Anforderungen an brandschutztechnische Anlagen wie z.B. RWA oder Löschanlagen definiert werden. Sollen die materiellen Anforderungen nicht eingehalten werden, so können weitere bzw. andere Maßnahmen ergriffen werden um die Schutzziele einzuhalten. In einem solchen Fall sind Abweichungen vom Baurecht zu definieren, die durch die zuständige Behörde genehmigt werden muss.

Durch Ingenieurmethoden des Brandschutzes ist es möglich für das konkrete Bauwerk bzw. Teilen davon die Folgen eines Brandes abzuschätzen und dementsprechend das Einhalten der Schutzziele (bei einer materiellen Abweichung) nachzuweisen.

Die Anwendbarkeit von Ingenieurmethoden wird ist nach [2] wie grundsätzlich zulässig. Dazu werden folgende Möglichkeiten genannt:

- Ermittlung grundlegender Kenntnis über die Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Brandgasen
- Bewertung von Einwirkungen
- Beurteilung des Verhaltens von Bauprodukten, wenn sie einem Brand ausgesetzt sind

- Beurteilung der Brandmeldung, Aktivierung und Brandbekämpfung
- Beurteilung und Bemessung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen

Über Rechtsvorschriften kann die oberste Bauaufsicht nach § 85 (MBO) Rechtsverordnungen erlassen, die z.B. besondere Anforderungen oder Erleichterungen gegenüber der Bauordnung definieren. Diese betreffen insbesondere Sonderbauten nach § 2 Abs. 4, wie z.B. Versammlungsstätten (MVStättVO^a) oder Verkaufsstätten (MVkVO^b). Besondere bzw. abweichende Anforderungen können zum Beispiel Anforderungen an die Rauchableitung oder die zulässige Rettungsweglänge sein.

Neben Rechtsverordnungen gibt das Baurecht die Möglichkeit Technische Baubestimmungen nach § 85a (MBO) zu erlassen, die die Anforderungen des Baurechts konkretisieren. Diese werden über die Liste der technischen Baubestimmungen (LTB) bzw. in Zukunft über die (Muster)-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) von der obersten Baubehörde des jeweiligen Bundeslandes veröffentlicht und in Kraft gesetzt. Diese definiert technische Regeln die es bei der Erstellung und Planung von Gebäuden einzuhalten gilt. Neben den über die LTB eingeführten Regelungen besteht die Möglichkeit, dass die Baurechtsbehörden „im Rahmen ihrer Entscheidungen zur Ausfüllung unbestimmter Rechtsbegriffe auch auf nicht bekanntgemachte allgemein anerkannte Regeln der Technik zurückgreifen“ (Vorbemerkungen [3]). Hintergründe und weitere Einordnungen in Bezug auf Ingenieurmethoden sind [4] zu entnehmen.

Neben baurechtlichen Fragestellungen können weitere Schutzinteressen des Betreibers, Errichters oder des Versicherers bei der Beurteilung eine Rolle spielen. Diese können u. a. nach [5] sein:

- Schutz von Waren und Produktionsmitteln
- Vermeidung von Betriebsunterbrechungen
- Optimierung der Kosten für Versicherungsdeckung durch Präventionsmaßnahmen

Aus den genannten Interessen ergeben sich über die bauordnungsrechtlichen Schutzziele hinausgehende ergänzende Schutzziele, die jeweils definiert werden müssen. Es

^a MVStättVO: Muster-Versammlungsstättenverordnung

^b MVkVO: Muster-Verkaufsstättenverordnung

ist empfehlenswert, bereits in einer frühen Planungsphase die Schutzziele mit allen Beteiligten abzustimmen.

Zum Nachweis der beschriebenen Schutzziele können im Wesentlichen die Nachweise der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen und der ausreichenden Rauchableitung, auf die im Weiteren eingegangen wird, hervorgehoben werden.

2.1 Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit

Mit der Einführung der Eurocodes (EC) als technische Regel haben die obersten Baubehörden im Rahmen der europäischen Harmonisierung von technischen Regeln die Möglichkeit geschaffen die Tragfähigkeit von Bauteilen unter anderem nach definierten Randbedingungen (ETK^c siehe Kapitel 4) aber auch aufgrund von realen Brandlastfällen (Naturbrand siehe Kapitel 4) rechnerisch nachzuweisen. Die Brandschutzteile des EC umfassen dabei sowohl die thermischen und mechanischen Lastannahmen (EC 1) für den außergewöhnlichen Bemessungsfall Brand wie auch Methoden und Verfahren Bauteile bestimmter Bauarten (EC 2 bis 9) im „heißen“ Fall unter Einbeziehung der Lastannahmen nachzuweisen. Gegenüber der DIN 4102-4 [6], die Nachweise gleichwohl auf der Basis der ETK mit Bemessungstabellen ermöglichte, wird durch den EC ein rechnerisches Bemessungsverfahren zur Verfügung gestellt [7].

Ein Nachweis nach den Vorgaben des Normteils DIN EN 1991-1-2 [8] (EC 1) mit Randbedingungen eines Naturbrandes kann auf Grundlage von vereinfachten Brandmodellen oder allgemeinen Brandmodellen durchgeführt werden. Unter allgemeinen Brandmodellen werden die Werkzeuge der Ingenieurmethoden des Brandschutzes verstanden (siehe auch 4.2.8).

Bei der Nachweisführung nach Naturbrand werden in der Anlage zur Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen (MLTB) [9], (Auszug siehe Anhang 1) Grenzen beschrieben, die eine Verwendung dieses Verfahrens bedingen.

In einigen Bundesländern war die Nachweisführung auf Grundlage eines Naturbrandes von der Anwendung ausgeschlossen und ist teilweise (z. B. in Baden-Württemberg) nur in Verbindung mit einer baurechtlichen Abweichung, welche die Zustimmung der zuständigen Bauaufsicht erfordert zulässig. Diese Vorgaben sind wiederum in den

^c ETK: Einheits-Temperaturzeitkurve

Anlagen der jeweiligen, bundeslandspezifischen Liste der technischen Baubestimmung (LTB) zu finden. Eine Übersicht über die Nachweisführung mit Naturbrandverfahren sowie die baurechtliche Akzeptanz wird in [10] beschrieben.

Neben dem Eurocode besteht für die Nachweisführung in Industriegebäuden über die technische Regel der Industriebaurichtlinie (MIndBauRL^d [11], [12]) und einer Nachweisführung nach DIN 18230-1 [13] die Möglichkeit eine wirtschaftliche, den Gegebenheiten angepasste Bemessung für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen durchzuführen. Darüber hinaus erlaubt die MIndBauRL-Anhang 1 den Nachweis durch Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu führen. Dabei sind die dort aufgeführten Grundsätze für die Durchführung des Nachweises zu beachten.

2.2 Nachweis zur Rauchableitung

Neben den Nachweisen zur Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen, sind vor allem bei Sonderbauten, Nachweise der Rauch und Wärmefreihaltung erforderlich. Dabei wird in der Regel nachgewiesen, dass durch Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) eine raucharme Schicht einer bestimmten Dicke erzielt wird. Unter dem Begriff raucharme Schicht wird der Abstand zwischen Fußboden und Unterkante einer Rauchgasschicht verstanden, die sich unterhalb der Decke eines Raumes während eines Brandes einstellt.

Die Normenreihe DIN 18232 definiert Begriffe, Bemessungsverfahren sowie Prüfverfahren für RWA. Dabei ist die Bemessung zum Erreichen einer definierten Schichthöhe einer raucharmen Schicht in zwei Normteilen enthalten, für natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) (DIN 18232-2 [14]) und maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA) (DIN 18232-5 [15]). Die Normteile sind nicht in der MLTB aufgeführt und zählen somit nicht zu den technischen Baubestimmungen nach § 85a (MBO). Jedoch werden in Begründungen zu Rechtsverordnungen (z.B. VStättVO [16]) die Grundgedanken der Normteile mit aufgegriffen und ein entsprechendes Nachweisverfahren einer raucharmen Schicht einer bestimmten Dicke empfohlen.

Die angestrebte Höhe der raucharmen Schicht soll nach [14] und [15] u. a. folgenden Zwecken dienen:

^d MIndBauRL: Muster-Industriebaurichtlinie

- den Nutzern von Gebäuden ermöglichen, sich in Sicherheit zu bringen,
- den Rettungsmannschaften zu ermöglichen, Menschen, Tiere und Sachwerte zu retten,
- eine wirksame Brandbekämpfung ermöglichen, und
- Brandfolgeschäden durch Rauchgase und thermische Zersetzungsprodukte herabsetzen.

Die Zuordnung der oben genannten Punkte zu baurechtlichen Schutzziele des Baurechtes (s. S. 2) ist sehr umstritten. Eine mögliche Definition wird in einem Grundsatzpapier [17] gegeben. Danach sind zur Sicherstellung der Selbstrettung die Anforderungen an die zulässige Länge und Breite von Rettungswegen ausreichend. Zusätzliche Anforderungen an die betroffenen Rettungswege sind nicht zu stellen. Diese Grundsätze beziehen sich nur auf Gebäude die ohne bauordnungsrechtliche Abweichungen auskommen und die alle materiellen Anforderungen des Bauordnungsrechtes erfüllen. Es wird klargestellt, dass für den Regelfall eine ingenieurmäßige Bemessung von Rettungswegen nicht vorgesehen ist und solche Ansätze nur in Verbindung mit der Kompensation einer baurechtlichen Abweichung zu führen sind. Es wird weiter klargestellt, dass bauordnungsrechtlich verlangte Öffnungen zur Rauchableitung dem Schutzziel der wirksamen Löscharbeiten zuzuordnen sind. Maßnahmen zur Rauchableitung können nur im Einzelfall im Rahmen einer Kompensation als Abweichung zur Sicherstellung von Rettungswegen eingesetzt werden. Damit sind Nachweise der Personensicherheit mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes in diesem Rahmen durchaus denkbar.

Eine Auslegung der RWA mit dem Ziel die Rauchgastemperatur zu senken und dadurch die thermische Belastung der Konstruktion zu verringern um eine frühzeitiges Versagen zu verhindern ist als Nachweisziel denkbar.

Die angestrebte Dicke der raucharmen Schicht soll nach den Normteilen der DIN 18232 mindestens 2,50 m betragen, bzw. 0,5 m über zu schützenden Gegenständen liegen.

Mit VDI 6019 Blatt 1 [18] und 2 [19] stellt der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Richtlinien zur Verfügung, die eine Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden mit ingenieurmäßigen Ansätzen beschreibt. In Blatt 2 [19] werden die Bewertungsgrößen der Berechnungen konkretisiert. So muss zur Erhaltung der schutzzielorientierten raucharmen Schicht,

1. Die Raumtemperatur der raucharmen Schicht kleiner 70°C sein,

2. In der raucharmen Schicht eine ausreichende Sichtweite vorhanden sein, die das Erkennen von Rettungswegzeichen ermöglicht. Die Sichtweite muss mindestens der Rettungsweglänge entsprechen.

Des Weiteren werden Angaben für eine mögliche Nachweisführung gemacht, die im Folgenden aufgegriffen werden.

Im Leitfaden- Ingenieurmethoden im Brandschutz [7] der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (VFDB) werden ebenso Schutzkriterien definiert, die zur Einhaltung der Personensicherheit nachgewiesen werden müssen. Diese sind in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer angegeben. Als Kriterien werden vorgegeben:

1. CO-Konzentration,
2. CO₂-Konzentration
3. HCN-Konzentration
4. Wärmestrahlung
5. Gastemperatur
6. Rauchdichte
7. Erkennungsweite

Für die quantitativen Angaben der Kriterien wird auf [7] verwiesen.

Leider bestehen hinsichtlich der Quantifizierung der Schutzziele in Bezug auf Nachweisverfahren zur Personensicherheit keine einheitlich, verbindlichen Angaben, so dass nur auf genannte Kriterien zurückgegriffen werden kann. Es ist somit im Planungsprozess hilfreich sich frühzeitig mit allen Beteiligten auf die Quantifizierung der Schutzziele zu verständigen.

Mit der Nachweisführung durch Ingenieurmethoden steht im baurechtlichen Verfahren ein Werkzeug zur Verfügung, das in der Lage ist die Schutzziele des Baurechtes nachzuweisen, wie es auch in der europäischen Union über das Grundlagendokument dokumentiert wird.

Um die Mechanismen einer Modellierung von Bränden mit den Werkzeugen der Ingenieurmethoden des Brandschutzes besser beschreiben zu können wird zunächst auf Brände im Allgemeinen eingegangen.

3 Der Brand

Ein Brand ist nach der Definition der DIN 14011 „ein nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich unkontrolliert ausbreiten kann“ [20].

Diese Definition beschreibt das Phänomen ziemlich gut und gibt schon einen Hinweis welche Schwierigkeiten die Beschreibung dieses Phänomens mit sich bringt. Denn Brände vor allem in Gebäuden finden in einer weitestgehend nicht kontrollierten Umgebung statt und jeder Brand läuft unter verschiedenen Randbedingungen ab.

Es ist allgemein bekannt, dass für eine Verbrennung eines brennbaren Stoffes, ein Oxidationsmittel vor allem Sauerstoff und zur Brandentstehung eine Zündenergie vorhanden sein muss. Die Verbrennung an sich ist eine chemische Reaktion, die unter Bildung von Wärme und Verbrennungsprodukten abläuft. Die erzeugte Wärme teilt sich auf in Wärmestrahlung und Konvektion.

Die Wärmestrahlung ist eine Übertragungsform von Wärme, die nicht an Materie gebunden ist. Dabei wird die Wärme durch elektromagnetische Wellen in den Raum über einem Strahlungssender emittiert [21]. Im Falle eines Brandes sind die Flamme, sowie die heißen Verbrennungsprodukte in erster Linie Ruß und Gase solche Strahlungsemittenten. Jedoch sind nur bestimmte Gase wirksame Strahler, darunter ist z.B. Kohlendioxid (CO_2) [22].

Unter Konvektion wird die Aufnahme und Abgabe von Wärme durch Fluide (Flüssigkeiten und Gase) verstanden [21]. Dabei wird die Wärme an die Materie gebunden, weitertransportiert und wieder abgegeben.

Eine wesentliche den Brand beeinflussende Größe ist die Art und Anordnung des brennenden Stoffes bzw. Stoffgemische. Es werden die Brennstoffe und deren Brandverhalten unter anderem entsprechend ihres Aggregatzustandes unterschieden.

Brennbare **Gase und Dämpfe** verbrennen mit einer Flamme, in der Sauerstoff mit Brennstoff reagieren.

Das Brandverhalten **brennbarer Flüssigkeiten** entspricht dem brennbarer Gase und Dämpfe, jedoch mit dem Unterschied, dass durch auf die Flüssigkeit einwirkende Wärme die brennbaren Gase zunächst durch Verdampfen entstehen müssen. In der Brandschutzforschung wird bei Bränden brennbarer Flüssigkeiten auch von „Pool“- oder Lachenbränden gesprochen.

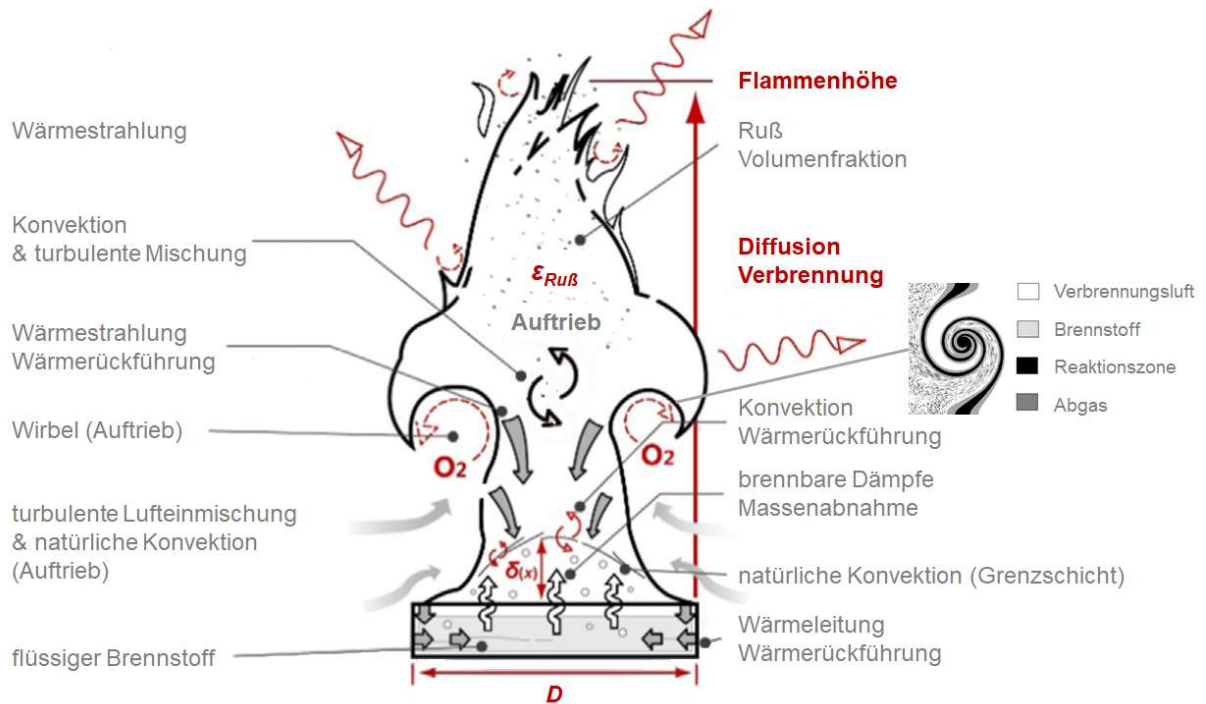


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Wärme- und Stoffströme sowie deren Mechanismen für den Abbrand eines flüssigen Brennstoffes

Feststoffe können mit Flamme und/oder unter Bildung von Glut verbrennen. Bei einem Feststoffbrand wird der Feststoff durch Pyrolyse oder Schmelzen in eine Flüssigkeit überführt, die sich wiederum zersetzt oder verdampft. Die brennbaren Dämpfe können bei genügender Energie des Brandes mit einer Flamme abbrennen. Bei einem Glutbrand entsteht keine Flammenbildung und die Pyrolyseprodukte kondensieren im Wesentlichen in der kalten Luft und bilden Aerosole. Erfahrungsgemäß sind solche Brände mit einer sehr hohen Rauchgasproduktion verbunden [23].

Die **Abbrandrate** beschreibt die durch den Brand umgesetzte brennbare Masse pro Zeit. Sie ist abhängig von dem Stoff bzw. des Stoffgemisches und der Anordnung des Brandstoffes.

Zur Beschreibung eines Brandes ist die **Energiefreisetzung** oder auch **Brandleistung** eine wichtige Größe. Sie beschreibt die freiwerdende Energie pro Zeit in Watt üblicherweise in Megawatt [MW] oder Kilowatt [kW]. Dabei wird für brandschutztechnische Betrachtungen, die Energiefreisetzung durch das Produkt der umgesetzten Masse eines Brandstoffes mit dessen stoffspezifischen **unteren Heizwert H_u** bestimmt.

Für die Umsetzung der brennbaren Masse wird Sauerstoff benötigt, wodurch die Ventilationsbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die Energiefreisetzung

haben. Man unterscheidet zwischen **brandlastgesteuerten** Bränden, bei denen genügend Sauerstoff vorhanden ist um frei gewordene Brennstoffe zu verbrennen und **ventilationsgesteuerte** Brände, bei denen ein unzureichendes Sauerstoffangebot vorhanden ist. In den meisten Fällen handelt es sich um brandlastgesteuerte Brände [5]. Die Brandarten brandlast- und ventilationsgesteuerter Brände werden in der Fachliteratur auch als Brandregime bezeichnet [24].

Eine Übersicht der Einflussgrößen eines Raumbrandes findet sich in Abbildung 4:

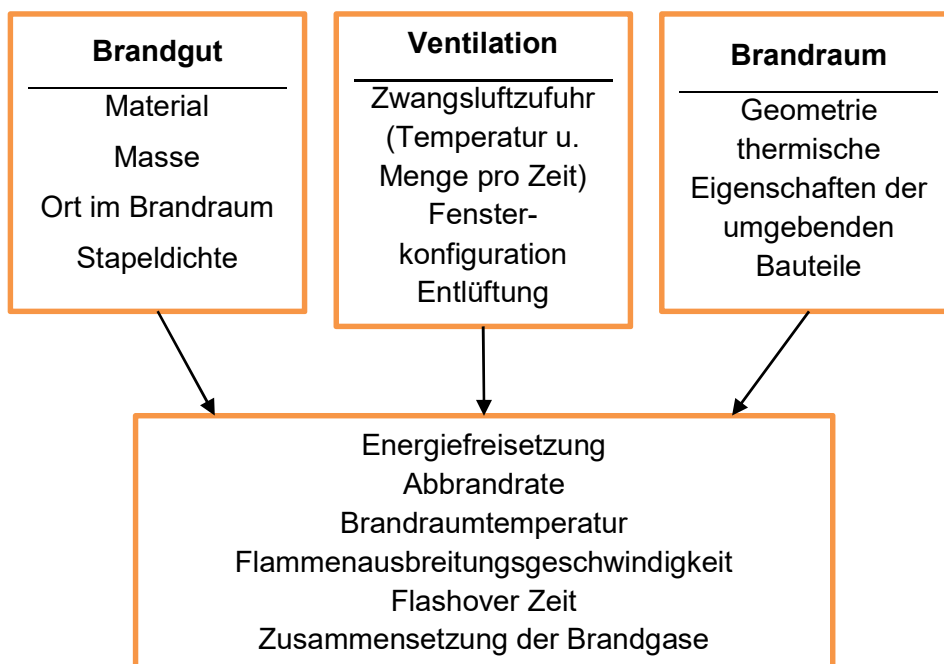


Abbildung 4 Einflussgrößen eines Raumbrandes [25]

Die genannten Einflüsse führen dazu, dass ein Brand in unterschiedlicher Ausprägung und Gestalt verläuft. Werden bei der Bewertung oder Abbildung von Bränden die wesentlichen Parameter wie z. B. die Brandlastdichte oder Ventilationsbedingungen berücksichtigt so nähert man sich einem real zu erwartenden Brand an. Man spricht in diesem Kontext auch von **Naturbränden** bzw. Naturbrandmodellen.

3.1 Brandverlauf

Üblicherweise können bei einem Brand in Räumen drei typische Abschnitte unterschieden werden.

Zunächst der **Entstehungsbrand** oder **Entwicklungsbrand** der direkt nach der Zündung eines brennbaren Gegenstandes zu beobachten ist und durch niedrige

Temperaturen und geringe Brandleistungen (kleiner 25 kW/m^2) gekennzeichnet ist [23].

Stehen ausreichend Sauerstoff und brennbare Gase zur Verfügung, kann es zu einem schlagartigen Übergang eines lokal begrenzten Brandes zu einem Vollbrand im Raum kommen. Dabei gasen die zuvor von der strahlenden Flamme und der Gasschicht thermisch aufbereiteten, brennbaren Oberflächen in großen Mengen aus und diese entzünden sich im gesamten Raum. Dieses Phänomen, das von einem kurzzeitigen Temperaturabfall begleitet wird beschreibt den so genannten **Flashover** oder Feuerübersprung. Dies ist gleichzeitig auch der Zeitpunkt, zu dem ein Brand von einem brandlastgesteuerten zu einem ventilationsgesteuerten Brand umschlagen kann [26].

Der anschließende **Vollbrand** zeigt die größte Brandleistung (ca. 50 bis 1200 kW/m^2) und damit auch die größte thermische Einwirkung auf Bauteile.

Die Brandleistung bleibt danach solange nahezu konstant bis ein Löscheinsatz erfolgreich ist oder der größte Teil der Brandlast verbrannt ist. Danach liegt ein **abklingender Brand** bis zum Verlöschen des Brandes vor.

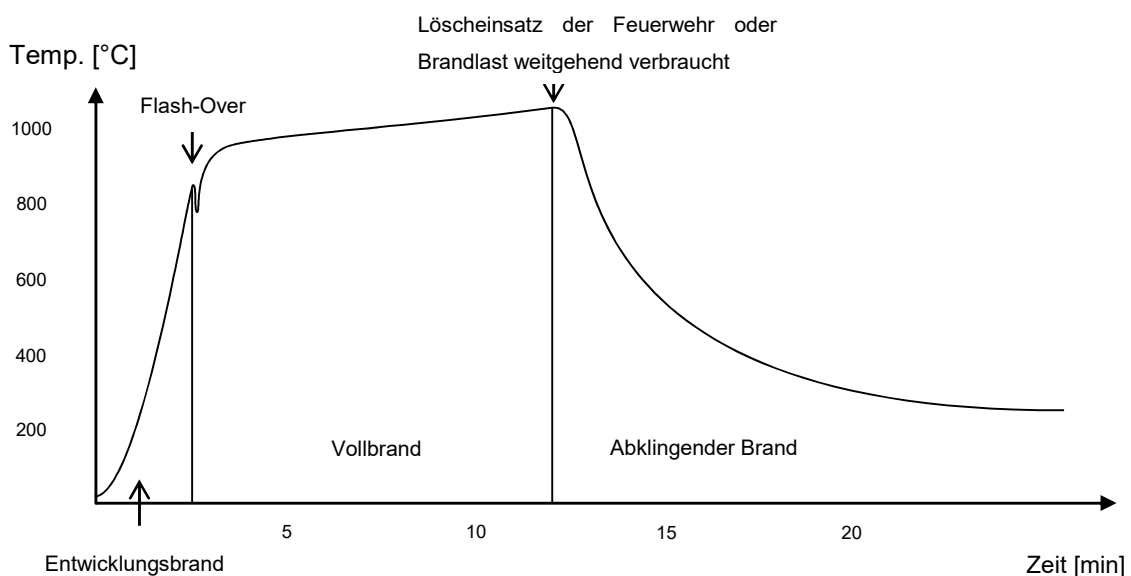


Abbildung 5 Qualitativer Temperaturverlauf (Mitte Decke) eines Brandes in einem geschosshohen ca. 25 m^2 großen Raum mit gewöhnlicher Möblierung und konstanten Ventilationsbedingungen

Im Allgemeinen folgt der Temperaturverlauf in der Heißgasschicht dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrates.

Der in Abbildung 5 gezeigte, qualitative Brandverlauf kann mit den gezeigten Brandphasen je nach Randbedingungen (z.B. Initialzündung, Ventilation, Abbrandverhalten der Brandlasten) variieren.

Es wurden die wesentlichen Parameter erläutert, die einen Brand charakterisieren. Will man einen Brand und dessen Brandfolgen wie Temperatur und Rauchbildung abbilden, so spielt die Kenntnis der einflussgebenden Parameter eine herausragende Bedeutung. Im Folgenden werden Verfahren und Ansätze beschrieben, die ein ingenieurmäßiges Abschätzen von Bränden deren Brandverläufe und Brandstärken unter Berücksichtigung der Parameter zur modellmäßigen Beschreibung, vor allem der Abbrandrate, für Rechenmodelle zulassen.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Für die Abschätzung eines Brandes muss zunächst ein Brandszenario (Fire Scenario) definiert werden. Dieses beschreibt ein mögliches, erwartbares Ereignis, bei dem ein Brand mit gegebenen Randbedingungen ablaufen kann. Ein Brandszenario stellt somit eine **qualitative** Beschreibung eines Brandes dar [27].

Der Bemessungsbrand beschreibt unter anderem die Intensität mit der ein Brand abläuft und ist die **quantitative** Beschreibung eines Brandes [27].

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die gewählten Brandereignisse (Brandszenarien und Bemessungsbrände) zusammen mit den quantitativen Schutzziele (s. o.) möglichst frühzeitig mit den am Bau Beteiligten abzustimmen sind, um eine tragfähige und genehmigungsfähige Planung und Ausführung zu erreichen.

4.1 Brandszenarium

Ein Brandszenarium beschreibt u. a. die Zündart eines Brandes und dessen weitere Entwicklung in der betrachteten Umgebung [5].

Für die Auswahl eines für die Bemessung maßgebenden Brandszenariums kann es erforderlich sein eine Risikoanalyse durchzuführen um ein mögliches Risiko zu quantifizieren. Das Risiko wird dabei als Zahlenwert beschrieben, der angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein ungewünschtes Ereignis eintritt. In [23], [28] und [5] wird ein Verfahren beschrieben, dass im Wesentlichen in Schritten nach Tabelle 1 gegliedert ist. Ein solches Vorgehen erlaubt die transparente Auswahl von Brandszenarien, die eine korrekte Auswahl eines Brandszenariums ermöglicht welches mit akzeptablem Restrisiko die relevanten, erwartbaren Brandereignisse abbildet.

Tabelle 1 systematisches, schrittweises Verfahren um relevante Brandszenarien mit dem entsprechenden quantifizierbaren Risiko zu identifizieren

Schritt 1	Brandtyp	wahrscheinlichste Brandtyp mit den wahrscheinlich größten Konsequenzen
Schritt 2	Ort der Brandentstehung	Mögliche Brandentstehungsorte für Brandszenarien aus Schritt 1
Schritt 3	Besondere Gefahren	Erkennen zusätzlicher kritischer Szenarien mit großen Konsequenzen

Schritt 4	Brandbeeinflussende Systeme	Maßnahmen und Systeme z.B. anlagentechnischer Brandschutz
Schritt 5	Verhalten der Gebäudenutzer	Festlegen der Charakteristika und Reaktionsverhalten der Gebäudenutzer
Schritt 6	Ereignisbaum	Möglichst vollständige deterministische Beschreibung eines Brandereignisses mit Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit an jeder Ereignisgabelung
Schritt 7	Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien	Die relative Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Produkt aller Eintrittswahrscheinlichkeiten entlang eines Ereignispfades
Schritt 8	Betrachtung der Brandfolgen	Ingenieurmäßige Abschätzung der Brandfolgen z.B. Brandopfer oder Sachschaden
Schritt 9	Risikobetrachtung	Es wird die Reihenfolge der Szenarien entsprechend der Schwere der Konsequenzen definiert.
Schritt 10	Auswahl und Dokumentation bei der letztendlichen Festlegung der zu untersuchenden Szenarien	

Für die Durchführung der einzelnen Schritte ist die Beurteilung des Brandschutzingenieurs entscheidend. In der Regel müssen für die Auswahl des Brandtyps (Schritt 1), der Festlegung von Eintrittswahrscheinlichkeiten entlang eines Ereignisbaumes (Schritt 6) sowie für die Abschätzung der Brandfolgen (Schritt 8) ingenieurmäßige Abschätzungen und Annahmen getroffen werden, da i. d. R. kein belastbares Datenmaterial (zur Zeit) verfügbar ist.

Das in Schritt 10 ausgewählte Brandszenarium sollte dabei für Baugenehmigungsfragen könnte dabei der 90 %-Fraktilewert und für Versicherungsfragen Worst Case-Szenarien als maßgebend angenommen werden [5], [27].

Eine Quantifizierung des Risikos ist hilfreich um die Gleichwertigkeit der Maßnahmen mit baurechtlichen Anforderungen und dem entsprechenden Sicherheitsniveau zu beurteilen, die mit einer Simulationsrechnung nachgewiesen werden sollen.

Jedoch besteht dabei das Problem, dass für eine sinnvolle Gleichwertigkeit, seitens des Gesetzgebers hinsichtlich der Personensicherheit ebenfalls ein angestrebtes Risiko definiert werden müsste. Regelungen bzw. Definitionen diesbezüglich sind nicht vorhanden und auch Aussagen bzgl. des aktuell vorhandenen, baurechtlich verankerten Restrisikos über eine Brandschadenstatistik fehlen in Deutschland.

Es obliegt daher dem Brandschutzingenieur das Restrisiko zu quantifizieren und die Gleichwertigkeit in Abstimmung mit den zuständigen Behörden zu definieren.

Die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen hinsichtlich ihrer Standsicherheit kann gemäß den Angaben des EC's quantifiziert werden.

4.2 Bemessungsbrand

Ein Bemessungsbrand (Design Fire) beschreibt den möglichen Brandverlauf (s. 3.1) in Form von zeitabhängigen bzw. zeitunabhängigen Parametern. Bemessungsbrände können nach Abbildung 6 unterschieden werden.

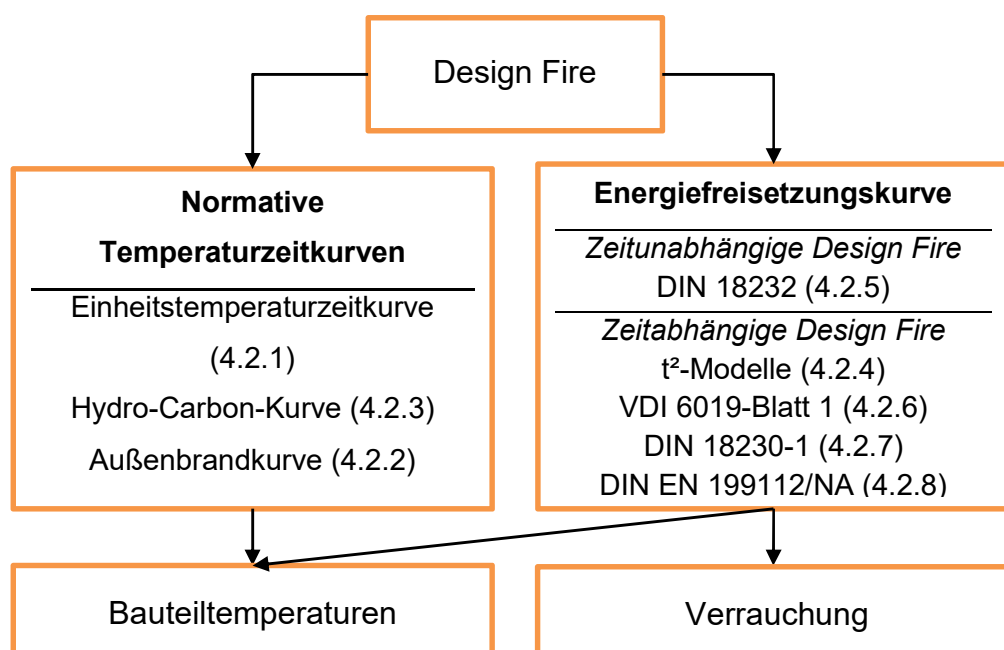


Abbildung 6 Mögliche Gliederung von Design Fires nach [23]

Normative Temperaturzeitkurven definieren einen Lastfall auf den ein Bauteil ausgelegt werden muss. Dabei sind die Temperaturen und deren zeitlicher Verlauf, die an einem Bauteil anliegen vorgegeben unbeachtet der zu betrachtenden Einbausituation und der bei einem Naturbrand tatsächlich zu erwartenden Temperaturentwicklung.

4.2.1 Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)

Die Einheitstemperaturzeitkurve nach Gl. 1^e bildet die Prüfgrundlage zur Prüfung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen und Baustoffen nach DIN 4102 [29] und DIN EN 13501.

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10} (8 t + 1) [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Gl. 1}$$

Mit:

T_g : Gastemperatur in $^{\circ}\text{C}$

t : Zeit in min

Diese Gleichung entspricht der Gleichung wie sie in DIN EN 1991-1-2 [8] für die ETK angegeben wird.

4.2.2 Außenbrandkurve

Die Außenbrandkurve nach Gl. 2Gl. 1 gemäß DIN EN 1991-1-2 [8] soll die thermischen Belastungen von Bauteilen widerspiegeln, die außerhalb des Gebäudes liegen.

$$T_g = 20 + 660 (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 t}) [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Gl. 2}$$

Mit:

T_g : Gastemperatur in $^{\circ}\text{C}$

t : Zeit in min

Dabei wird nicht zwangsläufig ein Brandereignis außerhalb des Gebäudes unterstellt, vielmehr sollen die Belastungen eines Brandes im Gebäude, der durch Öffnungen in Außenwänden Bauteile von außen beansprucht abgebildet werden. Gemäß den Angaben des Nationalen Anhangs [30] darf diese zum Nachweis des Raumabschlusses bei nichttragenden Außenwänden sowie für Tragwerksteile die vollständig vor der Fassade des Gebäudes liegen, verwendet werden.

^e Bei der gezeigten Gleichung wird unterstellt, dass bei Prüfbeginn der Prüfkörper eine Temperatur von 20°C besitzt.

4.2.3 Hydrocarbonkurve

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen als Brennstoff kann es zu deutlich höheren Temperaturen in kürzerer Zeit gegenüber der ETK kommen [31]. Diesen Aspekt soll die Hydrocarbon-Kurve nach Gl. 3 berücksichtigen

$$T_g = 1080 [1 - 0,325 \cdot e^{(-0,167 t)} - 0,675 \cdot e^{(-2,5 t)}] [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Gl. 3}$$

Mit:

T_g : Gastemperatur

t : Zeit in min

Diese drei Lastfälle (ETK, Außenbrandkurve und Hydrocarbonkurve) werden für die Standfestigkeit von Bauteilen im EC berücksichtigt.

Die Temperaturzeitkurven stellen ein vereinfachtes Abbild der Realität dar. In Abbildung 7 werden den Temperaturzeitkurven Deckentemperaturen zweier Realbrandversuche gegenübergestellt, die in Räumen mit gewöhnlicher Größe (Grundfläche ca. 20 m², Höhe ca. 2,50 m) und ähnlichen Ventilationsbedingungen aber unterschiedlichen Brandlasten durchgeführt wurden.

Es ist hierbei zu erkennen, dass die Temperaturzeitkurven durchaus einen Realbrand auf der sicheren Seite abbilden können. Vor allem im späteren Brandverlauf, jenseits der 35 Minuten sind die Temperaturzeitkurven, im Falle der betrachteten Raumbrände deutlich auf der sicheren Seite. Es ist jedoch auch in einer früheren Brandphase eine kurzzeitige Überschreitung der Temperaturen im Realbrand gegenüber der Temperaturzeitkurven zu beobachten.

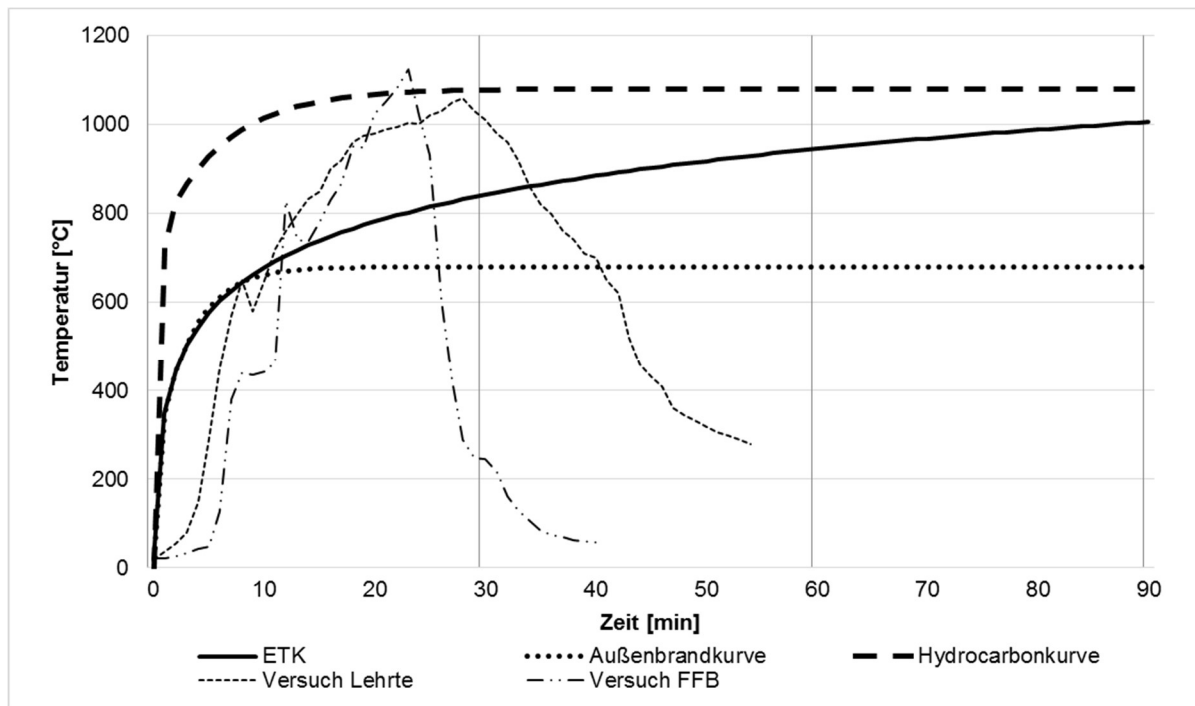


Abbildung 7 Vergleich von Temperaturzeitkurven, Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), Außenbrandkurve und Hydrocarbonkurve mit qualitativen Temperaturverläufen (Decke) zweier Realbrandversuche, Brandversuch an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik [32] und Versuch aus Versuchsreihe in Lehrte [33]

Es bleibt festzuhalten, dass Temperaturzeitkurven eine anerkannte (Prüf-) Methode darstellen, um Brandlastfälle zu definieren. Sie basieren auf Erkenntnissen die anhand von Versuchen gewonnen wurden, in Raumgrößen und mit Brandlasten die für den mehrgeschossigen Hochbau typisch sind.

Neben der Vorgabe einer definierten Temperatur-Belastung gibt es Verfahren, die einen zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate als Belastung definieren.

4.2.4 t^2 Modelle

Bei den international oft verwendeten t^2 -Ansätzen wird von einer exponentiellen Zunahme der Wärmefreisetzung entsprechend der Gl. 4 [23], [34] ausgegangen. Diese Ansätze werden zur Beschreibung des Anstiegs der Wärmefreisetzungsrate in der Brandentwicklungsphase (vgl. Abbildung 5), also vor Erreichen der Vollbrandphase herangezogen.

$$Q = \alpha \cdot (t - t_i)^2 [kW] \quad \text{Gl. 4}$$

Mit:

α : Parameter zur Beschreibung der Zunahme der Wärmefreisetzungsrate [kW/s^2]

t : Zeit [sec]

t_i : Referenzzeitpunkt von Entzündung bis exponentieller Anstieg der Wärmefreisetzung [sec]

Der Referenzzeitpunkt ist eine sehr schwer zu bestimmende Größe, da dieser maßgeblich durch die Art der Zündquelle, deren Position im Raum und der Eigenschaften des zuerst entzündeten Brandgutes abhängt [35]. Er wird für konservative Anwendungen in der Regel vernachlässigt, d. h. $t_i = 0$.

Dabei wird der Parameter α in Abhängigkeit der zu erwartenden Flammenausbreitung in Abhängigkeit des brennbaren Stoffes und der Nutzung in vier Kategorien nach Tabelle 2 unterteilt.

Tabelle 2 Angaben zu Flammenausbreitungsparameter α für quadratisches Ausbreitungsmodell

Flammenausbreitung	Stoffgruppe nach [23], [35]	Nutzungsgruppe [5] bzw. [30]	α [kW/s ²]
Langsam	Leicht verpackte Papierprodukte	Gemäldegalerie	0,00293
Mittel	Traditionelle Matratze und traditioneller Sessel	Wohnungen, Büros, Hotel	0,01172
Schnell	PU ^f -Matratze, gestapelte Holzplatten, gefüllte Postsäcke	Warenhaus, Verkauf	0,0469
Sehr Schnell	Hochregallager; geschäumter Kunststoff, Methylalkohol, schnell brennende Polstermöbel	-	0,1876

Damit ergeben sich die Brandleistungen nach Gl. 4 mit den Parametern α nach Tabelle 2 die Brandleistungskurven nach Abbildung 8.

^f PU-Polyurethan

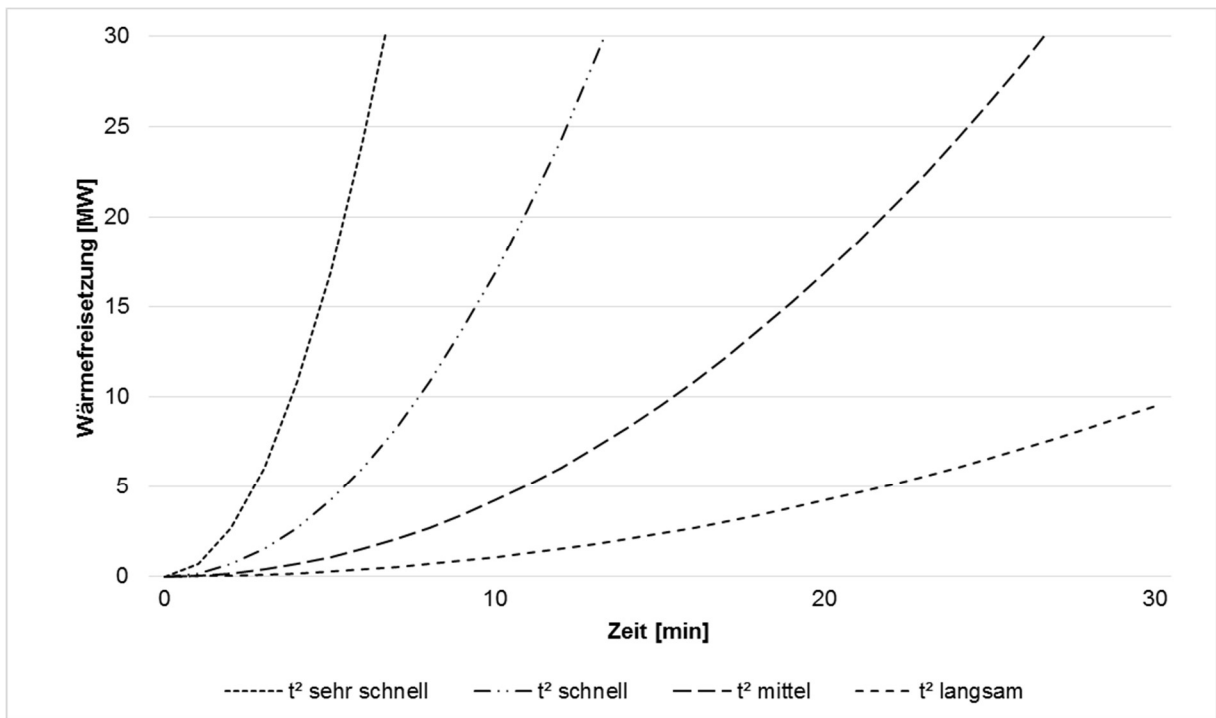


Abbildung 8 t^2 -Brandleistungskurven mit Referenzzeitpunkt $t_i = 0$

4.2.5 DIN 18232

Für die Bemessung von RWA stehen die Normteile DIN 18232 [14], [15] zur Verfügung. Dieser Bemessung liegen Brandszenarien zu Grunde, die den Steady State Fall entsprechend Abbildung 9 also „zeitunabhängige“ Design Fires abbilden.

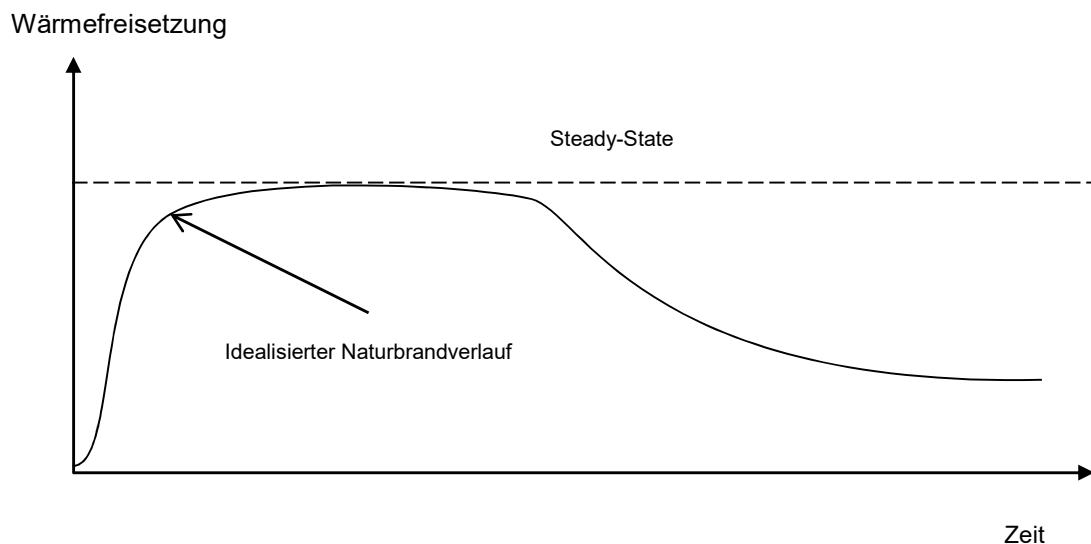


Abbildung 9 Definition eines Steady-State Bemessungsbrandes nach [5]

Es wird dabei eine zeitliche Entwicklung der Brandleistung in Abhängigkeit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt bis eine maximale Brandleistung erreicht wird,

die dann im Weiteren Verlauf konstant bleibt. Dabei liegt die Vorstellung zu Grunde, dass mit Erreichen der maximalen Brandleistung keine weitere Brandausbreitung zu erwarten ist. Das Brandszenarium soll dabei den größtmöglich, zu erwartenden Brandfall abdecken [36]. Der tabellarischen Bemessung nach DIN 18232 liegt ein zeitunabhängiger Maximalwert (vgl. Abbildung 9) des Bemessungsbrandes zu Grunde. Gleichwohl wird dabei ein zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bis zum Erreichen des Maximalwertes unterstellt.

Die Brandentwicklungsdauer ist von der brandschutztechnischen Infrastruktur bzw. der Eingreifzeit der örtlichen Feuerwehr abhängig und definiert zusammen mit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit (nach) die maximale Brandleistung.

Tabelle 3 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten nach [14]

Beschreibung	Gemittelte Brandausbreitungsgeschwindigkeit [m/min]
Besonders gering	0,15
mittel	0,25
Besonders groß	0,45

In der Regel ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit mittel anzusetzen [14]. In Abbildung 10 sind beispielhaft Brandleistungskurven in Abhängigkeit der Bemessungsgruppen angegeben.

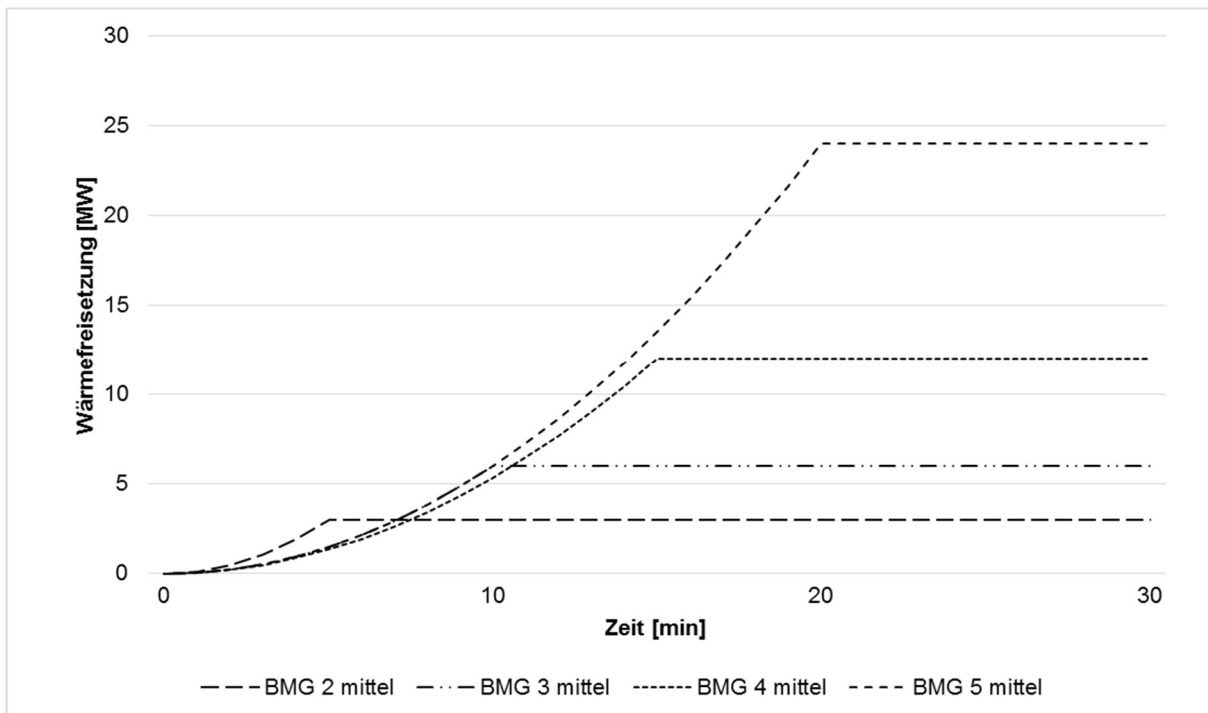


Abbildung 10 Brandleistungskurven nach DIN 18230-2 (spez. Brandleistung 300 kW/m²)

4.2.6 VDI 6019 Blatt 1

In der VDI-Richtlinie VDI 6019 Blatt 1 [18] werden die Brandverläufe die einer ingenieurmäßigen Berechnung zugrunde liegen können, definiert. Dabei werden fünf Brandphasen definiert.

- Phase 1: Brandentstehung mit niedriger Wärmefreisetzungsrates
- Phase 2: Fortentwickelter Brand mit quadratischer Zunahme der Wärmefreisetzungsrates und Brandfläche
- Phase 3: Stetiger Brand mit konstanter Wärmefreisetzungsrates und Brandfläche
- Phase 4: Kontrollierter Brand bei aktivierter selbsttätiger Löschanlage
- Phase 5: Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Des Weiteren wird zwischen Brandszenarien mit niedrigenergetischen Bränden und hochenergetischen Bränden unterschieden.

Ein niedrigenergetischer Brand zeichnet sich durch eine geringe Wärmefreisetzungsrates aus. Diese werden bei speziellen raumklimatischen Verhältnissen im Brandraum angesetzt und bleiben auf die Brandentstehungsphase (Phase 1) beschränkt.

Hochenergetische Brandszenarien bilden die Basis für die Ermittlung der maximalen Leistungsfähigkeit von Entrauchungsanlagen.

4.2.7 DIN 18230

Die DIN 18230-1 [37] gibt ein Verfahren vor mit dem der erforderliche Feuerwiderstand eines Bauteils im Industriebau berechnet werden kann. Aufgrund der großen Streubreiten von Brandlasten und -dichten im Bereich der Industrie stellt das Verfahren auf der Brandlastermittlung ab, mit der eine objektbezogene, wirtschaftliche Bemessung von Bauteilen durchgeführt werden kann.

Im Anwendungsbereich wird definiert, dass die getroffenen Regelungen für oberirdische Gebäude im Bereich der Industrie und des Gewerbes vorgesehen sind. Ausgenommen wird die Anwendung auf:

- Hochhäuser nach § 2 Abs. 4 Nr. 1 MBO
- Angrenzende Teilbereiche von Industriebauten die überwiegend der Verwaltung dienen
- Regallager mit Lagerguthöhen von **mehr als 9 Meter**
- Silos
- Betriebsgebäude in denen Energie erzeugt oder verteilt wird

Die Bemessung nach DIN 18230-1 beruht auf dem Äquivalenzprinzip. Es soll für baupraktische Anwendungen eine Vergleich der Auswirkungen auf ein Bauteil (Bauteiltemperaturen) bei einem realen Brand mit den Auswirkungen einer ETK-Temperaturbelastung, äquivalente Zeiten $t_{\ddot{a}}$ bestimmt werden, nach denen im Normbrand (ETK) die gleiche Bauteiltemperatur auftritt (vgl. Abbildung 11).

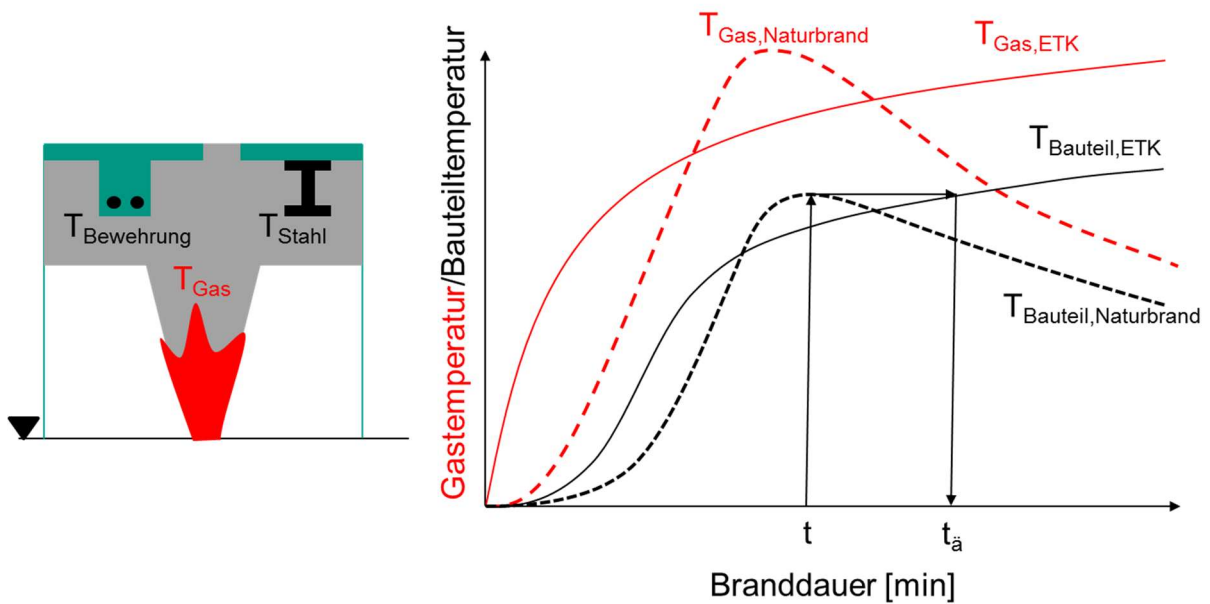


Abbildung 11 Darstellung des Äquivalenzprinzips der Nachweismethode nach DIN 18230-1 (vgl. [38])

Die äquivalente Branddauer $t_{\text{ä}}$ wird nach Gl. 5 ermittelt, welche den zu erwartenden Brand in Abhängigkeit der Brandlastdichte q_r , den Umgebungsbauteilen (Faktor c) und der Wärmeabzugsflächen (Faktor w) ermöglicht.

$$t_{\text{ä}} = q_r \cdot c \cdot w \text{ [min]} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Brandlastdichte q_r wird bezogen auf die Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes nach Gl. 6 für ungeschützte Stoffe in Abhängigkeit der Summe der Produkte der Masse des i -ten Stoffes, dessen unteren Heizwertes und dessen Abbrandfaktor m , der entsprechend DIN 182303 (Rechenwerte) angenommen werden kann.

$$q_r = \frac{\sum(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i)}{A_b} \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad \text{Gl. 6}$$

Der Abbrandfaktor m wird als stoffspezifische Größe behandelt, die das individuelle Brandverhalten berücksichtigt und kann nach der Prüfmethode der DIN 18230-2 [39] in einem speziellen m -Faktor-Ofen ermittelt werden. Die anhand dieser Prüfmethode gewonnenen m -Faktoren sind zunächst bis zu einer Lagerguthöhe von 4,5 m gültig [39]. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichtes ist dem Autor kein in Betrieb befindlicher m -Faktor-Ofen bekannt. Somit sind die Angaben für m -Faktoren auf die des Normteiles DIN 18230-3 [40] beschränkt. In diesem Normteil wird auch ein Verfahren

beschrieben, mit dem m-Faktoren von 4,5 m bis auf 9 m extrapoliert werden können. Die m-Faktoren liegen dabei in der Regel zwischen 0,2 und maximal 2,0 (Tabellenwerte nach [40]).

Der Faktor w aus Gl. 5 wurde anhand von Wärmebilanzrechnungen ermittelt. Dabei wurde eine Referenzhalle definiert, die eine Grundfläche von 2 400 m² aufweist und mit einer gleichmäßig über der Hallenfläche verteilte Brandlast mit einer Brandlastdichte von 144 kWh/m² beaufschlagt ist. Das verwendete Brandszenario sieht vor, dass eine Brandausbreitung stattfindet mit einer Geschwindigkeit von 1 m/min in alle vier Richtungen beginnend in der Raummitte. Der Brennstoff ist mit einem Heizwert von 3,74 kWh/kg und einer definierten Abbrandgeschwindigkeit von 20 kg/m²h daraus folgend einer spezifischen Brandleistung von 74,8 kW/m² und dem entsprechenden m-Faktor vorgegeben [38].

In Abbildung 12 wird beispielhaft ein Brandverlauf eines Brandes mit den Randbedingungen der Referenzhalle jedoch mit einer Grundfläche von 1 600 m².

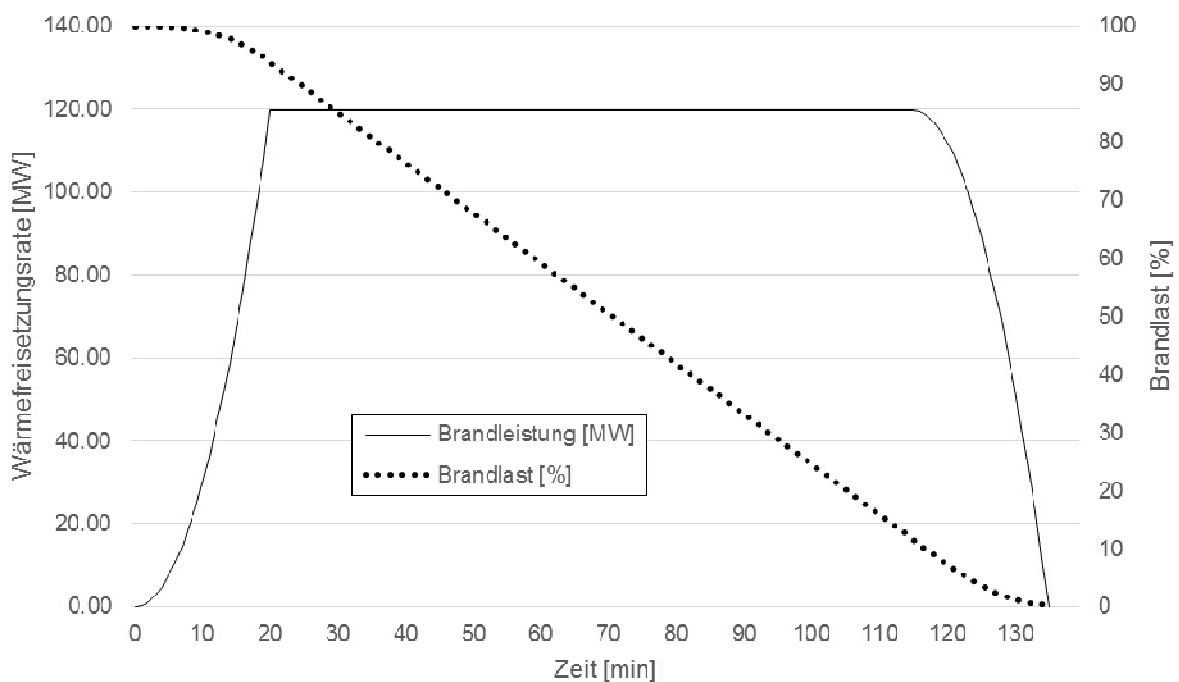


Abbildung 12 beispielhafter Brandverlauf einer quadratischen 1 600 m² Halle mit den Bemessungsbrandgrößen der Referenzhalle (siehe Text) unter Annahme eines brandlastgesteuerten Brandes

Dem Verfahren liegt somit der Grundgedanke zugrunde, dass die als gleichverteilt angenommene Brandlast, die mit einer Brandlastermittlung erhoben wurde, unter Berücksichtigung der stoffspezifischen m-Faktoren (und Kombinationsbeiwerte) und

einer hohen Brandausbreitungsgeschwindigkeit (vgl.) das bemessungsrelevante Brandszenario darstellt.

Anschließend wird die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer $erf t_f$ nach Gl. 7 bestimmt, in Abhängigkeit der äquivalenten Branddauer, der Brandsicherheitsklasse des Bauteils und der brandschutztechnischen Infrastruktur, welche den Brand an der Ausbreitung aktiv behindert wie z.B. Löschanlagen oder Werkfeuerwehren.

$$erf t_f = t_{\ddot{a}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L [min] \quad \text{Gl. 7}$$

Hinter dem Faktor γ verbirgt sich ein Sicherheitskonzept, auf das im Rahmen dieser nicht näher eingegangen wird.

4.2.8 Naturbrandmodelle

Die Bemessung nach dem EC ermöglicht die Verwendung von vereinfachten oder allgemeinen Brandmodellen zur Bestimmung eines bemessungsrelevanten Brandereignisses.

Dabei gibt der EC über den Anhang E dem Nachweisersteller ein Verfahren an die Hand, mit dem er die Brandlastdichte in Abhängigkeit der Nutzung abschätzen kann. Es werden dabei folgende Nutzungsgruppen unterschieden:

- Wohngebäude,
- Bürogebäude,
- Krankenhaus (Zimmer),
- Hotel (Zimmer),
- Bibliothek, Bücherei,
- Schule (Klassenzimmer),
- Verkaufsstätte, Einkaufszentrum,
- Versammlungsstätte (Theater, Kino),
- Transport (öffentlicher Bereich).

Aufgrund der hohen Schwankungen der Brandlastdichte die im Bereich der Industrie vorkommen wird auf eine Angabe der Brandlastdichte in diesem Rahmen verzichtet. Vielmehr ist die Ermittlung der Brandlast im konkreten Fall erforderlich und eine Nachweisführung nach DIN 18230-1 (siehe 4.2.7) zu empfehlen.

Die maximale charakteristische Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max,k}$ wird für brandlastgesteuerte Brände in Abhängigkeit der Nutzungsgruppe flächenbezogen in MW/m² vorgegeben und über die Größe des Brandraumes nach Gl. 8 bestimmt:

$$\dot{Q}_{max,k} = RHR_f \cdot A_f \quad \text{Gl. 8}$$

Für Räume **unter 400 m²** kann die maximal erreichbare charakteristische Wärmefreisetzungsrates für ventilationsgesteuerte Brände abgeschätzt werden. Der kleinere Wert der charakteristischen Wärmefreisetzungsrates bildet zusammen mit einem Teilsicherheitsbeiwert, auf den hier nicht eingegangen wird, die Basis für den Bemessungswert der Wärmefreisetzung.

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrates wird zu Beginn nach Gl. 9 mit einem t²-Verlauf (siehe 4.2.4) beschrieben.

$$\dot{Q}_k = \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad \text{Gl. 9}$$

Die Leistung des Bemessungsbrandes wird anschließend durch den Bemessungswert der maximale Wärmefreisetzungsrates beschränkt (s.o.). Ist durch den Brand 70 Prozent der Brandlast verbraucht, so kann vereinfacht ein linearer Abfall der Wärmefreisetzungsrates angenommen werden.

In Abbildung 13 werden beispielhaft bei einer Nutzung als Versammlungsstätte (Parametern siehe Anhang 2) Kurven von möglicher Bemessungsbränden in Abhängigkeit der Raumgröße aufgezeigt, die brandlastgesteuert angenommen und durch die charakteristische Brandleistung nach Gl. 8 (Teilsicherheitsbeiwert gleich 1) limitiert werden.

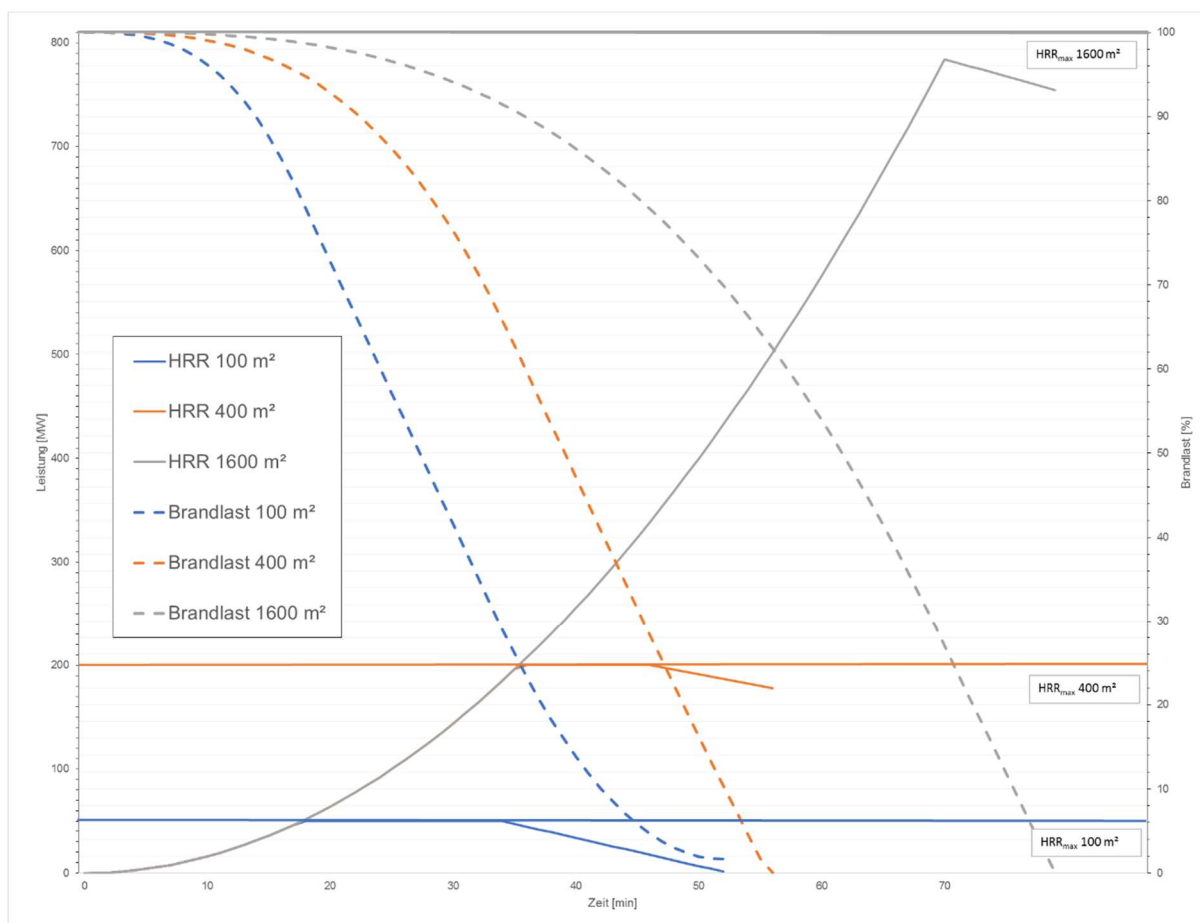


Abbildung 13 Beispielhafte charakteristische Wärmefreisetzungskurven nach DIN 1991-1-2/NA [30] mit Eingabedaten (siehe Anhang 2)

Es sind die beschriebenen Phasen der Brandleistung in den Beispielen der 100 m²- und 400 m²-Halle zu erkennen. Durch die flächenbezogene maximale Wärmefreisetzung und die damit verbundenen hohen maximalen Wärmefreisetzungsraten bei großen Räumen kann es vorkommen, dass wie im Beispiel 1 600 m²-Halle gezeigt, aufgrund der bereits verbrauchten Brandlast die maximale Wärmefreisetzungsraten nicht erreicht wird. Es wird empfohlen, da die Brandverläufe nach Gl. 8 bzw. Gl. 9 für Räume größer als 400 m² auf der sicheren Seite liegen, in diesen Fällen alternative Nachweise z. B. Nachweisverfahren lokaler Brände ([8] Anhang C) zu verwenden [30].

Die gezeigten Verläufe unterstellen dabei, dass die gesamte in der Brandlast gespeicherte Wärme umgesetzt wird und es werden die Ventilationsbedingungen nicht berücksichtigt.

In der Anlage 1.2/1 der MLTB [9] wird abweichend die Vorgabe gemacht, dass die maximal Wärmefreisetzungsraten nach 10 Minuten spätestens erreicht werden muss.

Das bedeutet, dass für die gezeigten Beispiele die maximalen Wärmefreisetzungsraten deutlich schneller erreicht werden.

Werden besondere Räume innerhalb einer speziellen Nutzung wie z.B. Archive in Bürogebäuden betrachtet so wird eine Brandlastermittlung empfohlen.

Wesentliche Eingangsgröße für die Bemessung ist der Bemessungswert für die Brandlastdichte $q_{f,d}$ nach Gl. 8:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot \chi \cdot \gamma_{fi,q} [MJ/m^2]^g \quad \text{Gl. 9}$$

Dabei ist $q_{f,k}$ der charakteristische Wert für die Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche des Brandraumes bzw. Nutzungseinheit, χ die Verbrennungseffektivität, die im Hochbau mit Büro-, Wohn- und vergleichbarer Nutzung pauschal mit 0,7 angenommen werden darf und dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$.

Der charakteristische Wert der Brandlastdichte wird in Abhängigkeit der angestrebten Nutzung definiert. Die im Anhang BB definierten Werte bilden dabei die Regelnutzung ab.

Wird der Regelzustand verlassen wie z.B. bei Lägern oder Archiven, die gesondert betrachtet werden müssen erfordert dies eine Ermittlung der Brandlastdichte im Einzelfall, die sich an die Brandlastermittlung gemäß DIN 18230-1 (4.2.7) anlehnt, mit dem Unterschied, dass statt des brandlastspezifischen Abbrandfaktors m die Verbrennungseffektivität χ verwendet wird.

^g 1 kWh/m² = 1 kJ/m²*3600 sec = 3,6 MJ/m²

Tabelle 4 Verbrennungseffektivität χ nach [30]

$\chi = 0,7$	Für Hochbau mit Büro-, Wohn- und vergleichbarer Nutzung typischen Mischbrandlasten
$\chi = 0,8$	In anderen Fällen auf der sicheren Seite liegend
$\chi = 1,0$	Für Flüssigkeiten und Gase

Die beiden Größen bilden ähnliche Abhängigkeiten ab. Jedoch konnte bisher kein einfacher mathematisch physikalischer Zusammenhang erkannt werden [41].

Das gezeigte Verfahren nach DIN 1991-1-2 bzw. dessen nationalen Anhang ermöglicht die Bestimmung eines bemessungsrelevanten Brandes. Es wird dabei die maximale Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Nutzung, der Fläche des Brandraumes und der Brandlastdichte bestimmt. Die gezeigten Verläufe deuten darauf hin, dass vor allem bei sehr großen Räumen das Verfahren auf der sicheren Seite liegt. In diesen Fällen werden Nachweise sinnvollerweise mit andere Bemessungsansätzen geführt.

Dem Nachweisersteller stehen mehrere Methoden zur Abschätzung eines Brandes mit dessen Brandstärke und –Verlauf zur Verfügung, um mit unterschiedlichen Modellen die Belastung von Bauteilen bzw. die Verrauchung beurteilen zu können.

Der Wahl des Brandszenarios bzw. des Bemessungsbrandes fällt hierbei eine grundlegende Bedeutung zu da dieser Eingabeparameter den vermutlich größten Einfluss auf das Ergebnis hat. Dabei beschränken sich die Angaben für Bemessungsbrände ausschließlich auf die Höhe und den Verlauf der zu erwartenden Brandleistung. Eine Beurteilung toxisch wirkender Produkte ist nur bei bekannten Brandgütern möglich. Eine solche Beurteilung erfordert die Definition eines Brandszenarios welches bestimmend dafür ist, wie sich Brandgüter entzünden und ein Brand in einem bestimmten Fall abläuft.

Das Erstellen von Brandszenarien ermöglicht bei bekannten Eigenschaften der Brandgüter eine detailgenaue Abbildung eines zu erwartenden Brandes. Jedoch besteht die Schwierigkeit unter einer Vielzahl möglicher Brandszenarien das Szenario zu wählen, das mit einer hinreichend hohen Eintrittswahrscheinlichkeit einen hohen Schaden verursacht. Zur Auswahl stehen dem Nachweisersteller die einschlägigen Hinweise und Richtlinien.

5 Ingenieurmethoden

Die Abschätzung der Folgen eines Brandes wie Heißgastemperatur und Verrauchung (siehe 2) kann mit ingenieurmäßigen Methoden durchgeführt werden. Diese können in die Gruppe der

- Zonenmodelle (5.1) oder
- Feldmodelle (5.2)

eingeteilt werden. Beide Modellgruppen verwenden dabei unterschiedliche Modellansätze, die auszugsweise im Weiteren beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Zonenmodelle CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport) in der Version 7 (Ver. 7) und MRFC (Multi-Room-Fire-Code) näher eingegangen.

5.1 Zonenmodelle

Bei einem Brand wird durch die Verbrennung brennbarer Produkte Energie freigesetzt die zum einen zur Bildung von heißen Brandprodukten bzw. Edukten führt. Diese Brandprodukte steigen aufgrund ihrer gegen über der Umgebung höheren Temperatur und damit kleineren Dichte auf. Werden die Rauchgase durch geometrische oder strömungstechnische Einflüsse nicht gestört so steigen die heißen Gase in den Brandphasen vor dem Flashover vgl. 3.1 innerhalb eines auftriebsbehafteten Freistrahles dem sogenannten „Plume“ auf und sammeln sich unterhalb der Decke (**Fall 2**), wie in Abbildung 14 dargestellt.

Diese grundsätzliche und auch vielfach beobachtete Annahme bildet die Grundlage für Zwei-Zonen Modellierung. Hierbei bilden die zwei Zonen, Heißgase unterhalb der Decke und die kalten Gase in Bodennähe welche durch Energie und Massenströme miteinander gekoppelt sind. Die Berechnung dieser Ströme erfolgt über die Energie- und Massenbilanzen.

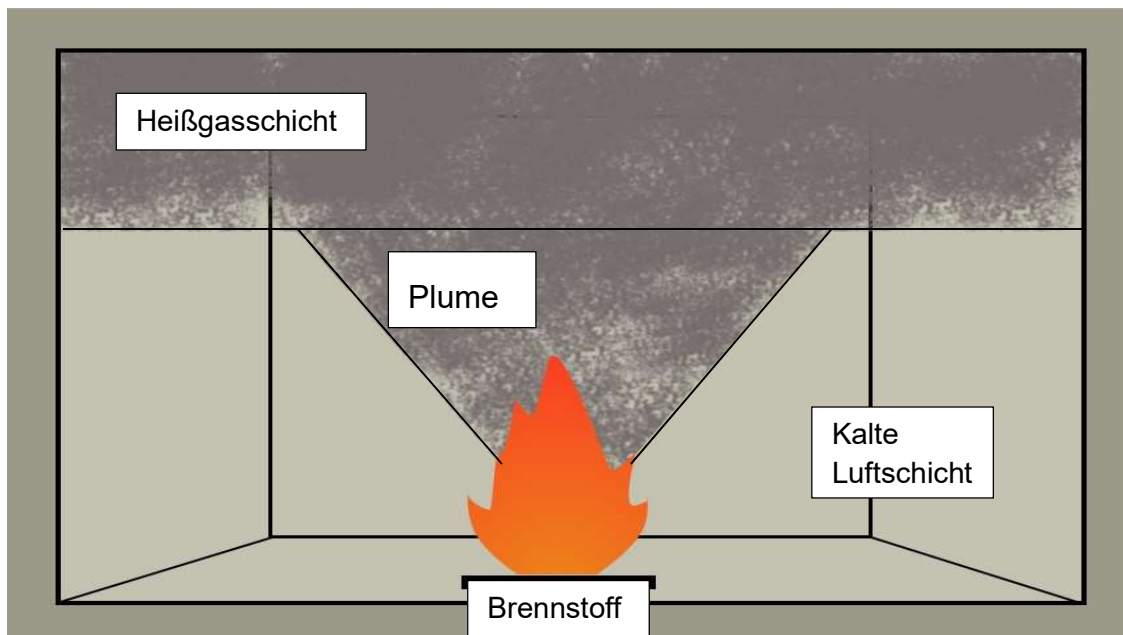


Abbildung 14 Schematische Darstellung Zonenbildung in einem Zwei-Zonenmodell (Fall 2)

Eine zentrale Rolle bei der Ermittlung der aufsteigenden Heißgasmenge und Heißgastemperatur spielt der Plume. In der Zonenmodellierung wird dieser durch sogenannte Plumemodelle (siehe 5.1.2) ermittelt, welche anhand empirischer Daten entwickelt worden sind.

In der frühen Phase eines Brandes werden sich die heißen Gase nicht augenblicklich gleichmäßig im Raum verteilen können, sodass zunächst Rauchgase an die Decke strömen und sich dort in alle Richtungen ausbreiten werden (**Fall 1**). Dieser unterhalb der Decke geführte Heißgasstrom, auch „Ceiling Jet“ genannt kann durch empirische Modelle abgeschätzt werden.

Erreicht ein Brand die Vollbrandphase, so ist in der Regel keine Schichtenbildung zu erkennen und das ganze Volumen ist mit Heißgas gefüllt (**Fall 3**). Zur Abbildung dieses Falles gibt es Einzonenmodelle, welche den Ursprung der Zwei-Zonenmodelle bilden.

Zonenmodelle unterscheiden somit die unterschiedlichen Brandphasen eines Brandes (Fälle 1 bis 3) unter Verwendung fallspezifischer Modelle.

Des Weiteren wird bei einem Brand Energie in Form von Strahlung freigesetzt. Der Anteil der in Form von Strahlung von der freigesetzten Energiemenge abgegeben wird bei den meisten Zonenmodelle als Eingabeparameter berücksichtigt und liegt in der Regel bei ca. 20 Prozent.

5.1.1 Erhaltungsgleichungen

Bei Zonenmodellen werden unter der Annahme der Massen- und Energieerhaltung, die entsprechenden Erhaltungsgleichungen gelöst. Dabei stellt der Raum das betrachtete Kontrollvolumen (vgl. Abbildung 15) dar.

In Mehrraummehrzonenmodellen können große Räume in mehrere virtuelle Räume aufgeteilt werden, für die jeweils die Erhaltungsgleichungen gelöst werden.

Im Folgenden werden die Ansätze, wie sie in [4] für das Mehrraum-Mehrzonenmodell MRFC beschrieben werden erläutert.

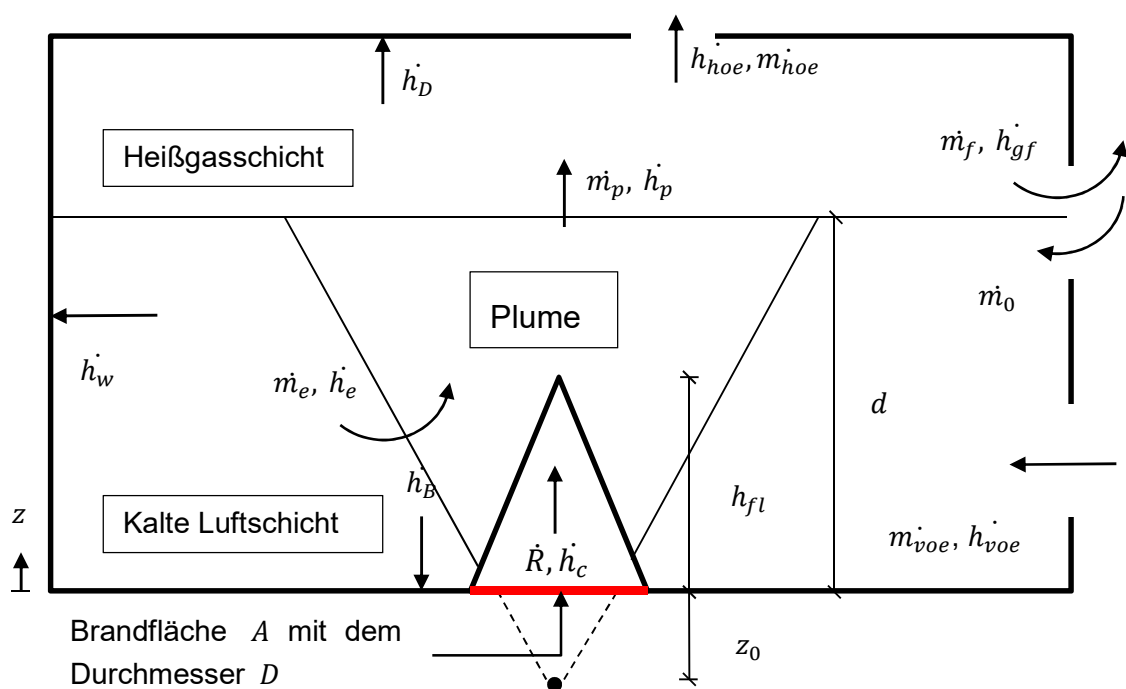


Abbildung 15 Schematische Darstellung der Stoff- und Energieströme in einem Zonenmodell (Fall 2)

Stoffströme: \dot{m}_p Plumemassenstrom in die Heißgasschicht, \dot{m}_{hoe} Massenstrom durch horizontale und \dot{m}_{voe} vertikale Öffnungen, \dot{m}_e in Plume eingesaugter Luftmassenstrom (s. 5.1.2 bzw. Anhang 3) \dot{m}_f Massenstrom durch Fenster

Energieströme: \dot{h}_p Plumeenergiestrom in die Heißgasschicht, \dot{h}_{hoe} Energiestrom durch horizontale und \dot{h}_{voe} vertikale Öffnungen, \dot{h}_e in Plume eingesaugter Energiestrom, Energiestrom an Umgebungswände \dot{h}_w , Böden \dot{h}_B , \dot{h}_c konvektive Brandleistung

Weitere Größen: d Dicke der raucharmen Schicht, \dot{R} Abbrandrate, \dot{h}_{fl} Flammenhöhe, z Koordinatenrichtung, z_0 Abstand Brandoberfläche zu virtuellem Ursprung,

Die Erhaltungsgleichungen werden iterativ gelöst. Die Zeitschrittgröße ist dabei so klein wie möglich zu halten.

Im Weiteren wird auf die in den Zonenmodellen verwendete Modellierung näher eingegangen.

5.1.2 Plume Modellierung

Es existieren mehrere „konkurrierende“ Modelle, welche jeweils unterschiedliche Anwendungsbereiche haben. Eine Zusammenstellung und Bewertung der Formeln ist in [42] aufgeführt und wird im Weiteren aufgegriffen.

Brände auf Oberflächen mit der Bildung von Feuer und Rauch können in unterschiedliche Zonen eingeteilt werden [35], [43]:

- **Flammenzone** im Nahfeld der brennenden Oberfläche mit einer dauerhaften Flammerscheinung
- **Intermittierende Flammenzone** ein Bereich, mit zeitweiser Flammerscheinung und einer annähernd konstanten Strömungsgeschwindigkeit
- **Plumezone**, ist der auftriebsbehaftete Freistrahler der sich durch eine abfallende Geschwindigkeit und Temperatur auszeichnet

McCaffrey zeigte bei der Auswertung zahlreicher Versuchsreihen, dass die auf den Durchmesser D einer Brandquelle normalisierte Flammenhöhe h_{fl} korreliert zur Funktion einer Froude-Zahl \dot{Q}^* die gemäß Gl. 10 definiert ist:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{gD} D^2} \quad \text{Gl. 10}$$

Hier sind \dot{Q} die Gesamtwärmefreistzungsrate des Brandes, $\rho_{\infty}, c_p, T_{\infty}$ die Eigenschaften Dichte, spezifische Wärmekapazität sowie Temperatur der Umgebungsluft bei konstantem Druck, g die Erdbeschleunigung.

In Abhängigkeit von \dot{Q}^* kann bei gegebenem Branddurchmesser D die Flammenhöhe über folgende Gleichung (Gl. 11) bestimmt werden,

$$\frac{h_{fl}}{D} = -1,02 + 3,7 \dot{Q}^{*2/5} \quad \text{Gl. 11}$$

Theoretisch kann die Ausbildung des Plumes über die Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichungen bestimmt werden, jedoch ist eine umfassende analytische Lösung nicht möglich [35].

Um die Beschreibung eines Plumes von punktförmigen Bränden auf flächig verteilte Brandlasten zu erweitern [28], wird auf das Prinzip des virtuellen Ursprunges zurückgegriffen (vgl. Abbildung 15). Es wird ein virtueller Ursprung unterhalb der Brandfläche A im Abstand von z_0 definiert. Anhand von Pool-Bränden ermittelte Heskestad folgende an Gl. 11 angelehnte Korrelation [44],

$$\frac{z_0}{D} = -1,02 + 0,083 \frac{\dot{Q}^{*2/5}}{D} \quad \text{Gl. 12}$$

Neben der Korrelation von Heskestad gibt es weitere Korrelationen aus Gasbrennerexperimente von Cetergen sowie Hasemi und Tokunaga auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Die eingesaugte Masse \dot{m}_e in den Plume wird gemäß der entsprechenden Korrelation bestimmt. In Anhang 3 werden ausgewählte Plumeformeln aufgeführt. Ausführlichere Zusammenstellungen von Plumeformeln sind in [42] bzw. [28] zu finden.

Über weitere empirische Formeln, welche auch zu den Plumeformeln zählen, kann im Plumbereich die lokale, mittlere Temperatur und Geschwindigkeit bestimmt werden.

5.1.3 Ceiling Jet

Der Ceiling Jet beschreibt die an der der Decke entlang laufende Heißgasfront in der frühen Phase eines Brandes, in der sich noch keine stabile Rauchsicht gebildet hat. Über empirische Formeln nach Alpert [45] kann in Abhängigkeit der Brandstärke \dot{Q} , in der Höhe H und im Abstand R die Temperatur, Geschwindigkeit und die Schichtdicke bestimmt werden.

Damit können die relevanten Parameter eines Brandes in der frühen Brandphase (Fall 1) erfasst werden, sowie Aussagen über lokale Temperaturen getätigt werden, die relevante Größen zur Bestimmung des Auslösezeitpunktes von brandschutztechnischen Anlagen wie Brandmelde- oder Löschanlagen sind.

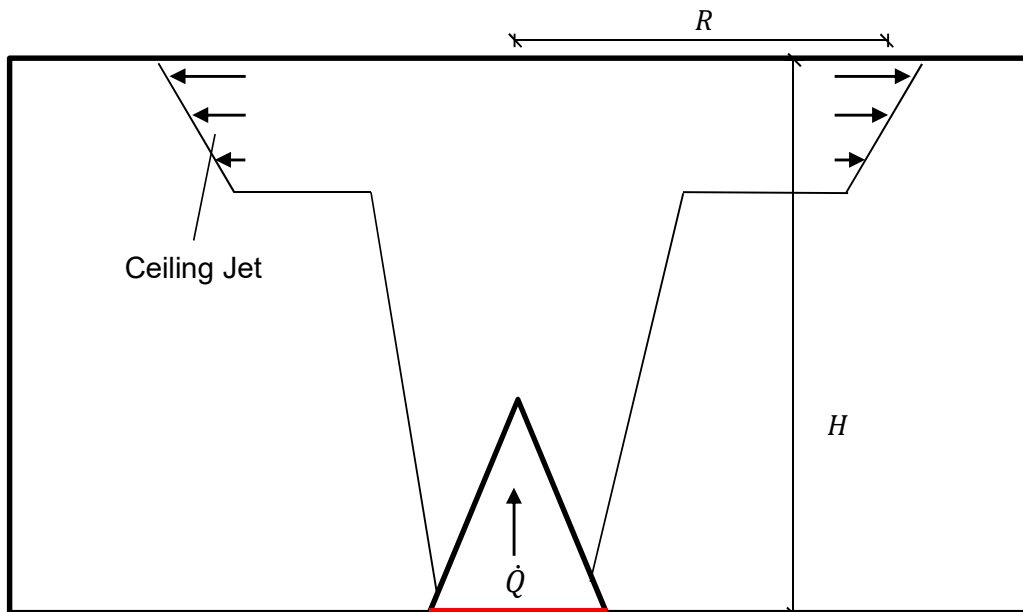


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Ceiling Jets (Fall 1)

5.1.4 Anwendungsgrenzen

Zonenmodelle gehen von einer scharfen Abgrenzung der Heißgasschicht gegenüber der Kaltgasschicht aus. In der Realität ist jedoch eine Übergangsschicht zu erkennen, die ca. zehn Prozent der Raumhöhe oder bei schwachen Auftriebsströmungen sogar noch größer sein kann [46]. Es gibt Modelle, die diesen Effekt berücksichtigen können.

Neben der Durchmischung zwischen der Heißgas- und der Kaltgasschicht kann es bei Öffnungen im Deckenbereich zum so genannten „Plugholing“-Effekt kommen. Dabei strömt aus einer dünnen Rauchschicht über Deckenöffnungen Rauchgas in die Umgebung. Neben dem Rauchgas wird zusätzlich kalte Luft aus der Kaltgasschicht mitgerissen und abgeführt, welche zu einer reduzierten Menge abgeführter Heißgase führt [47].

Durch die grundsätzliche Annahme der Schichtbildung von Heißgasschicht und Kaltgasschicht ist eine Beurteilung lokaler Ereignisse nur mit Submodellen möglich. So werden die Temperaturen in den jeweiligen Schichten gemittelt. Lokale Temperaturspitzen z. B. über dem Brand werden in der Regel nicht aufgelöst [47], können aber unter der Annahme mittlerer Temperaturverteilungen im Plume abgeschätzt werden. Ist in dem Modell eine fallabhängige (Fall 1-3, s. oben) Berechnung bei der Phänomene aus der Frühbrandphase berücksichtigt werden wie z.B. der Ceiling-Jet (siehe 5.1.3) können für diese Phase Aussagen über lokale Temperaturen getroffen werden. Eine solche Abschätzung sollte erfolgen, wenn

Aussagen über den Auslösezeitpunkt brandschutztechnischer Anlagen, wie z.B. Brandmelde- oder Löschanlagen getätigt werden sollen.

Es ist darauf zu Achten, dass die in 5.1.2 beschriebenen Formeln in dem jeweils vorgegebenen Anwendungsbereich verwendet werden. Eine Übersicht wichtiger Randbedingungen ist in zusammengestellt.

Tabelle 5 Randbedingungen ausgewählter Plumeformeln nach [28]

McCaffrey	Brände in freier Umgebung
Zukoski	Brände in geschlossenen, hohen Räumen; Flammenspitzen dringen nicht in die Heißgasschicht ein
Thomas und Hinkley	Brände in großen Räumen, Flammenspitze dringt in die Heißgasschicht ein
Heskestad	Brände in geschlossenen Räumen, fernab von Wänden und ohne Ventilationseinflüsse oder Brände im freien ohne Windeinfluss; Runde oder rechteckige Brandquellen $L/B < 2$; Ausreichend Sauerstoffzufuhr

Die genannten Plume-Formeln sind gültig für frei stehende Brände die in ausreichendem Abstand zu Wänden stattfinden. Es ist daher zu prüfen ob Wandeinflüsse zu erwarten sind. Sollen bzw. müssen diese berücksichtigt werden, so gibt es angepasste Formeln, die verwendet werden sollen. Die Abmessungen bzw. das Verhältnis Länge zu Breite des betrachteten Raumes haben somit nach [48] einen Einfluss auf die Rauchausbreitung, -weiterleitung, die Einmischung in den Plume und somit die Höhe der raucharmen Schicht.

Das Modell beschränkt sich, systemimmanent auf die Phänomene innerhalb des Kontrollvolumens also innerhalb von Gebäuden. Im Falle z.B. unterventilierter Brände, bei denen unverbrannte Gase aus dem Brandraum strömen und außerhalb bei ausreichend Sauerstoff verbrennen, können nicht berücksichtigt werden.

Bei der Darstellung großer Räume, werden diese in mehrere „virtuelle“ Räume unterteilt. Bei Strömungen zwischen zwei Räumen wird ein Strömungswiderstand angenommen, welcher in Realität nicht vorhanden ist. Werden so mehrere virtuelle Räume hintereinander angeordnet,

so führt das zu Widerständen die das Ergebnis beeinflussen können [47], [48].

Das Verhältnis Brandgröße zu Raumgröße hat einen Einfluss auf die Rauchschichtstabilität [48]. In [46] wird empfohlen die Wärmefreisetzungsrate nicht über 1 MW/m^3 zu steigern. Bei diesen hohen Wärmefreisetzungsraten ist jedoch davon auszugehen, dass sich keine Schichtbildung einstellt.

5.2 Feldmodelle

An die Stelle experimenteller Untersuchungen treten in den letzten Jahren verstärkt dreidimensionale numerische Simulationen, die aufgrund der rasanten Entwicklung bei der Rechnerleistung und der Weiterentwicklung der mathematischen Modelle detaillierte Untersuchungen ermöglichen. Zur Beschreibung der Strömungs- und Transportphänomene stehen mit kommerziellen CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, die in weiten Bereichen der Strömungstechnik etabliert sind (Automobiltechnik, Luft- und Raumfahrttechnik etc.). Auch in der Prozesstechnik finden sie mittlerweile verbreitet Einsatz zur Berechnung von Strömungen mit komplexen physikalischen Vorgängen wie Turbulenz, Wärme- und Stofftransport, chemischen Reaktionen und Mehrphasigkeit. Sie erleichtern dem Ingenieur die Analyse komplizierter Zusammenhänge, gewähren Einblick in experimentell nicht zugängliche industrielle Prozesse und ermöglichen eine effiziente Auslegung und Optimierung von Apparaten und Verfahren. Dank des raschen Fortschritts in der Computertechnologie stehen heute Rechnerkapazitäten zur Verfügung, um auch komplexe Rechnungen mit komplexen Vorgängen und Geometrien durchzuführen. Experimentelle Untersuchungen sind zwar unbedingt notwendig, um die Ergebnisse der Simulation zu validieren, doch wird aufgrund des enormen Zeitaufwandes beim Versuchsaufbau und der Durchführung gerne auf computergestützte Simulationen zurückgegriffen.

Auch für die Klärung sicherheitsrelevanter Fragestellungen im Bereich des Brandschutzes werden in immer stärkerem Umfang numerische Simulationsprogramme eingesetzt. Diese befassen sich dann mit der Vorhersage der Brand- und Rauchausbreitung in Bauwerken (Fassaden und geschlossene Räume), Verkehrssystemen oder Fahrzeugen. Neben der Strömungssimulation, mit oder ohne detaillierte Auflösung des Brandereignisses gehören auch brandbedingte Temperaturbelastungen an tragenden Bauteilen sowie beim komplexen Verbrennungsprozess entstehende Schadstoffe mit entsprechender Konzentration im Rauchgas. Leistungsfähige numerische CFD-Methoden sind in der Lage, sowohl die räumliche Verteilung als auch den

zeitlichen Verlauf lokaler dreidimensionaler Größen zu berechnen, benötigen jedoch definierte physikalische, sowie numerische Randbedingungen für die jeweilige Problemstellung, um diese dann anhand grundlegender fluiddynamischer Gleichungen zu lösen. Eine weitere verbrennungstechnische Eigenschaft die zusätzlich mathematisch mit Hilfe von Integral- und Differentialgleichungen sowie rein chemisch beschrieben werden soll, ist der komplexe Mischungs- und Verbrennungsprozess, der bei Bränden stattfindende Wärmefreisetzung mit klein- bis großskaliger Turbulenzintensität gekoppelt ist. Die für den Mischungs- und Verbrennungsprozess notwendige Auflösung der Turbulenz (Turbulenzmodellierung) soll mit Skalenunterschiede, die aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Größenordnung der brandinduzierte Strömung (während und nach der Verbrennung) entstehen, verarbeiten können.

Abbildung 3 veranschaulicht die Merkmale eines Brandes einschließlich der dabei wirkenden Wärmetransportmechanismen, sowie die dabei stattfindenden Mischungsprozesse. Um diese zu berücksichtigen, werden ausgehend von den physikalischen Randbedingungen geeignete Modelle und numerischen Methoden benötigt.

Die effiziente und genaue Anwendung, sowie die Entwicklung numerischer Verfahren zur Simulation von Bränden stellen zusätzlich hohe Anforderungen, die unterschiedliche Forschungsgebiete betreffen. Abbildung 17 stellt die Vorgehensweise bei einer Brandsimulation mit Feldmodellen dar. Ausgehend von dem Brandereignis und dessen physikalischen Randbedingungen sind numerische Parameter einzustellen, die miteinander in Wechselwirkung stehen und die Ergebnisse der Brandsimulation stark beeinflussen.

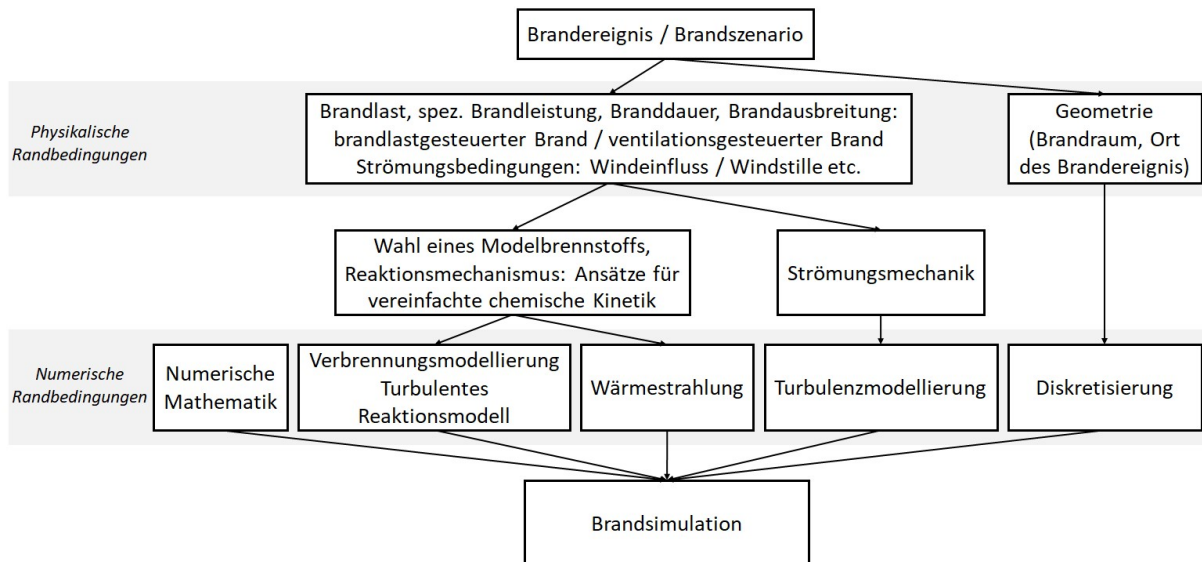


Abbildung 17 Ablaufschema zur Durchführung einer Brandsimulationsrechnung mit Feldmodellen

Zur numerischen Berechnung einer Strömung mit oder ohne Wärmefreisetzung ist es notwendig, die zu untersuchende Geometrie zu diskretisieren. Hierbei wird der kontinuierliche Raum in endlich viele Elemente unterteilt. Ziel der Geometrie-Diskretisierung ist es, ein Rechengitter zu erstellen, mit dessen Hilfe alle notwendigen Details der zu untersuchenden Problemstellung physikalisch sinnvoll und geometrisch angemessen genau aufgelöst werden können.

In diesem Abschnitt werden die für die dreidimensionale numerische Brandsimulation benötigten physikalischen und numerischen Grundlagen und Methoden kurz vorgestellt. Diese beinhalten: die allgemeine Form der Erhaltungsgleichungen (Masse, Impuls, Energie, chemischen Spezies), die Grundlagen von turbulenten Strömungen sowie die Turbulenzmodellierung, die Verbrennungsmodellierung und die Diskretisierungsmethoden. Anschließend werden die drei am weitesten verbreiteten numerischen Berechnungsmethoden kurz erläutert.

5.2.1 Strömungsmechanische Grundgleichungen

Eine grundlegende Rolle für die analytische und numerische Beschreibung von Strömungsphänomenen spielen die fünf Grundgesetze der Strömungsmechanik. Aus den Gleichungen der Massenerhaltung, Energieerhaltung und den drei Gleichungen des Impulstransports in die Raumrichtungen lassen sich weitere vereinfachte Gleichungen zur Berechnung von technisch relevanten Strömungen ableiten. In diesem Kapitel werden die Erhaltungsgleichungen auf Grund ihrer weiteren Verwendung kurz

dargestellt. Auf eine exakte Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet. Detaillierte Herleitungen und Betrachtungen der hier vorgestellten mathematischen und physikalischen Zusammenhänge finden sich z. B. bei Bockhorn [49] und Warnatz et al. [50].

5.2.1.1 Massenbilanz

Die zeitliche Änderung der Masse innerhalb eines infinitesimal kleinen Volumenelements mit raumfesten Koordinaten entspricht der Differenz aus eintretenden und austretenden Massenströmen. Sie beschreibt nach Gl. 13 die Änderung der Dichte in einem Volumenelement und besagt, dass die Divergenz des Geschwindigkeitsvektorfeldes der zeitlichen Änderung der Dichte entspricht:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{Gl. 13}$$

Gleichung 13 ist die instationäre, dreidimensionale Massenbilanz für kompressible Fluide und wird allgemein als Kontinuitätsgleichung bezeichnet. Der erste Term der linken Seite beinhaltet die zeitliche Änderung der Dichte (Masse pro Volumenelement), der zweite ist der konvektive Term. Für stationäre, inkompressible Strömungen fällt die zeitliche Änderung der Dichte weg.

5.2.1.2 Impulsbilanz

Die zeitliche Änderung des Gesamtimpulses eines Massenelements auf Grund von Oberflächen- und Massenkraften wird durch die Gleichung für die Impulserhaltung beschrieben. Dabei muss sich der durch Konvektion in das Volumen transportierte Impulsstrom mit der durch die viskosen Kräfte verursachten Änderung des Impulses und der Druckkraft im Gleichgewicht befinden. Zusätzlich kommen die von außen angreifenden spezifischen Kräfte pro Volumeneinheit f_i wie z. B. die Schwerkraft hinzu. Die Impulsbilanz an einem finiten Volumenelement ergibt somit:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j u_i)}{\partial x_j} = \rho \cdot f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 14}$$

In Gl. 14 ist $\sigma_{i,j}$ der viskose Spannungstensor, der die viskosen Eigenschaften des Fluids beschreibt und für Newton'sche Fluide vereinfacht werden kann.

5.2.1.3 Energiebilanz

Analog zur Massen- und Impulserhaltung besagt die Bilanzierung der Energieströme angewandt auf ein Volumenelement, dass sich die darin enthaltene Gesamtenergie nur durch einen Wärmestrom über die Systemgrenze oder durch Fernwirkung, wie z. B. elektromagnetische Strahlung, nicht aber durch Energieproduktion innerhalb dieses Volumenelements verändern kann. Die Energiebilanz eines Volumenelements, formuliert unter Verwendung der Gesamtenthalpie, lautet:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \dot{\omega}_T - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial t} + \tau_{i,j} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dot{Q} + \rho \cdot \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} (h_i + V_{k,i}), \quad \text{Gl. 15}$$

Hierbei ist der Energiestrom q_i definiert als:

$$q_i = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho \cdot \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i} \quad \text{Gl. 16}$$

Der Energiestrom wird an erster Stelle durch den Wärmediffusionsterm, gemäß dem Fourierschen Wärmeleitungsgesetz bestimmt, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit ist, die im Allgemeinen vom jeweiligen Fluid, dem Druck und der Temperatur abhängt.

Der erste Term auf der linken Seite in Gl. 15 beinhaltet die zeitliche Änderung der Gesamtenthalpie, der zweite entspricht der Transportrate der Enthalpie durch Konvektion. Der erste Term auf der rechten Seite der Gl. 15 beschreibt die bei Verbrennungsvorgängen erzeugte Wärme $\dot{\omega}_T$:

$$\dot{\omega}_T = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^{\circ} \dot{\omega}_k \quad \text{Gl. 17}$$

Hierbei ist $\Delta h_{f,k}^{\circ}$ die Standardbildungsenthalpie der Spezies k und $\dot{\omega}_k$ die dazugehörige Reaktionsrate. In Gleichung 15 ist \dot{Q} der Wärmequellterm, der die Energiezufuhr durch Fernwirkung (z. B. durch elektrische Funken) berücksichtigt und wird getrennt von der Verbrennungswärme ($\dot{\omega}_T$) behandelt. Der zweite Term auf der rechten Seite stellt die Wirkung der Druckkräfte auf die Gesamtenthalpie dar. $\tau_{i,j} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ beschreibt den Energietransport auf Grund von Reibungskräften. Der letzte Term $\rho \cdot \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} (h_i + V_{k,i})$ beinhaltet die Leistung, produziert durch die Volumenkräfte $f_{k,i}$ der Spezies k .

Aus der Thermodynamik folgen die Beziehungen zwischen der Totalenthalpie H , der Gesamtenergie E , der inneren Energie e und der statischen Enthalpie h :

$$H = E + \frac{p}{\rho} = e + \frac{1}{2} \cdot u_i u_i + \frac{p}{\rho} \quad \text{Gl. 18}$$

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad \text{Gl. 19}$$

$$H = h + \frac{1}{2} \cdot u_i u_i \quad \text{Gl. 20}$$

Durch Einsetzen von Gl. 18 bis Gl. 20 und Gl. 16 in Gl. 15 erhält man die Energieerhaltung des Systems, hier dargestellt für die statische Enthalpie h .

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \dot{\omega}_T + \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \tau_{i,j} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(\rho \cdot \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i} \right) + \dot{Q} + \rho \cdot \sum_{k=1}^N Y_k f_{k,i} V_{k,i} . \end{aligned} \quad \text{Gl. 21}$$

5.2.1.4 Bilanz der Elementmassen (Speziesbilanz)

Während einer chemischen Reaktion werden die chemischen Elemente im Gegensatz zu molekularen Verbindungen weder verbraucht noch gebildet. Damit gilt die Massenerhaltung für jedes Element:

$$\frac{\partial(\rho Z_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Z_j)}{\partial x_i} = - \frac{\partial J_i^j}{\partial x_i}, \quad \text{Gl. 22}$$

hierbei sind die Massenbrüche der chemischen Elemente Z_j mit den Speziesmassenbrüchen über die Gleichung

$$Z_j = \sum_{k=1}^{N_k} \nu_k^{(j)} \cdot \frac{W_j}{W_k} \cdot Y_k, \quad \text{Gl. 23}$$

verbunden. In Gl. 23 bezeichnet $\nu_k^{(j)}$ die Anzahl der Atome eines Elements j in der Spezies k ; W_j und W_k sind die jeweiligen Molmassen des Elements j bzw. der Spezies

k . Der in Gl. 22 eingeführte Diffusionsstrom eines Elements j_i^j kann hierbei als gewichteter Diffusionsstrom in Abhängigkeit vom Speziesdiffusionsstrom $j_i^k = -\frac{\mu_l}{Sc_k} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}$ ausgedrückt werden:

$$j_i^j = \sum v_k^{(j)} \cdot \frac{W_j}{W_k} \cdot j_i^k \quad \text{Gl. 24}$$

5.2.2 Newton-Ansatz

Die Diskussion zur Impulsbilanz hat ergeben, dass in der Impulsbilanzgleichung (Gl. 14) ein Term, der so genannte viskose Spannungstensor, auftritt. Dieser kann durch die folgende Spannungsmatrix beschrieben werden:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 25}$$

Gemäß der Symmetrie der Spannungsmatrix gilt $\sigma_{i,j} = \sigma_{j,i}$. Gleichung 14 wird somit auf sechs unabhängige Größen reduziert. Mit dem Newton'schen Schubspannungsansatz erhält man die Verknüpfung aller auf ein Oberflächenelement einwirkenden Scherkräfte mit den Geschwindigkeitsgradienten durch Proportionalitätsfaktoren. Dieser Ansatz stellt eine rheologische Gleichung (ein Materialgesetz) dar, welche die viskosen Eigenschaften eines Fluids und damit den Zähigkeitsspannungstensor beschreibt. Der Newton'sche Ansatz ist gültig für sog. Newton'sche Fluide und lautet:

$$\sigma_{i,j} = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 26}$$

Die Proportionalitätsfaktoren in der oben dargestellten Gleichung sind die Viskosität μ des Gemisches und der so genannte zweite Viskositätskoeffizient λ , der auch Druckzähigkeit genannt wird. Während die dynamische Viskosität μ die lineare Deformationsrate darstellt, berücksichtigt λ die Reibungseffekte, die bei der Expansion eines Fluids auftreten und durch Relaxationseffekte zwischen inneren Freiheitsgraden der Moleküle und der Translationsbewegung hervorgerufen werden [51].

Für Gase ist die folgende Annahme gültig [52]:

$$\lambda = -\frac{2}{3} \cdot \mu, \quad \text{Gl. 27}$$

Unter Verwendung des Newton-Ansatzes kann man die Impulsbilanz (Gl. 14) wie folgt schreiben:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j u_i)}{\partial x_j} = \rho \cdot f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \cdot \left[\Delta u_i + \frac{1}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \nabla u \right] \quad \text{Gl. 28}$$

Die Gleichung 28 ist als Navier-Stokes-Gleichung bekannt. Für inkompressible, stationäre Strömungen gemäß Gl. 13 vereinfacht sich die Gleichung 28:

$$\frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) \quad \text{Gl. 29}$$

5.2.3 Turbulente Strömungen

Ein wichtiges Merkmal der Turbulenz ist die Fluktuation physikalischer Größen in Raum und Zeit, deren Erfassung nur noch mit statistischen Methoden möglich ist [53]. Laut Rotta [54] ist ihr Auftreten kurz als dreidimensional, instationär, mischungsintensiv, drehbehaftet und dissipativ gekennzeichnet.

Eine dimensionslose Größe, die von O. Reynolds eingeführt und nach ihm benannte Kennzahl, ermöglicht die Beschreibung des Übergangs zwischen laminaren und turbulenten Strömungszuständen. Die Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{u_{char} \cdot l_{char}}{\nu}, \quad \text{Gl. 30}$$

in der u_{char} der Betrag einer charakteristischen Geschwindigkeit, l_{char} eine für die Strömung charakteristische Länge (z.B. der Rohrlängendurchmesser) und ν die kinematische Viskosität sind, kann als Verhältnis der destabilisierenden Massenträgheitskräfte zu den dämpfenden und damit stabilisierenden Zähigkeitskräften gedeutet werden.

Durch diese charakteristische Größe können fluiddynamische Strömungssysteme mit ähnlichen geometrischen und kinematischen Randbedingungen klassifiziert werden, und zwar nach dem Wert einer so genannten kritischen Reynoldszahl, bei der ein Strömungsumschlag zu beobachten ist. Ab diesem kritischen Wert Re_{krit} wird die

laminare Strömung instabil und geht bei Vorhandensein äußerer Störungen, was in realen Strömungen der Fall ist, in eine turbulente Strömungsform über. Bei höheren Reynoldszahlen sind die Massenträgheitskräfte dominant; hier ist eine weitere stabilisierende Dämpfung zur Erhaltung der laminaren Strömung nicht mehr möglich. Weiterhin sind turbulente Strömungen selbsterhaltend, da sie ihre Energie aus dem Zusammenspiel der turbulenten Fluktuationsbewegung mit der Scherung der mittleren Strömung beziehen. Für die verschiedenen Strömungssysteme findet man Werte für die kritische Reynoldszahl z. B. für eine Rohrströmung $Re_{krit}=2300$, Freistrahlen $Re_{krit}=6000$ und bei Außenströmungen Re_{krit} zwischen 105 – 106.

Wie schon angedeutet existieren Skalenunterschiede bei einer brandinduzierten Strömung als Folge unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Größenordnungen (von Skalen der Wärmefreisetzung bis zur Skalen einer sich annähernd laminar ausbreitenden Rauchgasschicht). Diese führen zu Unterschieden in der Turbulenzintensität der Strömung und zu einer breiten Verteilung von Reynoldszahlen im Feld.

5.2.3.1 Reynolds-Mittelung

Nach einem Ansatz von O. Reynolds werden die zeitabhängigen Strömungsgrößen in eine zeitlich gemittelte und eine zeitlich fluktuierende Größe aufgespalten, wobei die fluktuierende Größe die Abweichung vom Mittelwert darstellt [55]. Der Reynolds-Ansatz für die turbulente Strömungsgeschwindigkeit lautet:

$$u_i = u_i(x, y, z, t) = \bar{u}_i(x, y, z) + u'_i(x, y, z, t). \quad \text{Gl. 31}$$

Ist die Strömung stationär, so lässt sich der zeitliche Mittelwert folgendermaßen definieren:

$$\bar{u}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i(x, y, z, t) \cdot dt. \quad \text{Gl. 32}$$

Die fluktuierende Größe kann aus der Differenz

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i \quad \text{Gl. 33}$$

ermittelt werden.

Aus der Definition des zeitlichen Mittelwertes lässt sich ableiten, dass die zeitlichen Mittelwerte der Schwankungsgrößen verschwinden, somit gilt für die Geschwindigkeitsschwankungen:

$$\overline{u'_i} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_0^{\Delta t} u'_i(t) \cdot dt \equiv 0. \quad \text{Gl. 34}$$

5.2.3.2 Reynolds-Gleichungen

Wird die Reynolds-Mittelung in die Navier-Stokes-Erhaltungsgleichungen (Gl. 28) eingesetzt, so resultieren die so genannten Reynolds-gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (engl.: Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations: RANS).

Die gemittelte Massenerhaltungsgleichung lautet in dieser Form:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho \cdot u_j} + \overline{\rho' \cdot u'_j}) = 0. \quad \text{Gl. 35}$$

Die Impulserhaltungsgleichung in Kartesischen Koordinaten lautet:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \overline{u_j u_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial(\rho \cdot \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2}. \quad \text{Gl. 36}$$

Die Terme $\overline{u'_i u'_j}$ in Gl. 36 beinhalten die Effekte der Turbulenz auf das mittlere Strömungsfeld und rühren von der Nichtlinearität der Impulsgleichung her. Werden sie mit $-\rho$ erweitert, ergibt sich ein Spannungstensor mit neun Elementen ($i, j = 1, \dots, 3$). Dieser wird als Reynolds'scher Spannungstensor bezeichnet und kann auch als turbulenter Spannungstensor interpretiert werden. Für den Fall $i = j$ ergeben sich die so genannten Reynolds'schen Normalspannungen und für $i \neq j$ die Reynoldsschen Schubspannungen:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xr} & \tau_{x\varphi} \\ \vdots & \tau_{rr} & \tau_{r\varphi} \\ \vdots & \vdots & \tau_{\varphi\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u' u'} & -\rho \overline{u' v'} & -\rho \overline{u' w'} \\ \vdots & -\rho \overline{v' v'} & -\rho \overline{v' w'} \\ \vdots & \vdots & -\rho \overline{w' w'} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 37}$$

Die Reynolds-gemittelte Energiebilanzgleichung lautet:

$$\frac{\partial(\overline{\rho h})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\rho u_i h})}{\partial x_i} = \overline{\dot{\omega}_T} + \frac{D\overline{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}} - \overline{\rho u_i' h'} \right) + \overline{\tau_{i,j}} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho \cdot \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i}} \right) \quad \text{Gl. 38}$$

In dieser Gleichung ist:

$$\frac{D\overline{p}}{Dt} = \frac{\partial \overline{p}}{\partial t} + \overline{u_i \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i}}. \quad \text{Gl. 39}$$

5.2.4 Turbulenzmodelle

Es ist möglich, durch geeignete Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen auch Gleichungen für $\overline{u_i' u_j'}$ herzuleiten. Allerdings enthalten diese ihrerseits Terme höherer Ordnung wie $\overline{u_i' u_j' u_k}$. Man erhält ein nicht geschlossenes System mit mehr Unbekannten als Gleichungen. Zur Berechnung und damit zur Schließung des Gleichungssystems werden Approximationen oder geeignete Ansätze in Form phänomenologischer Modelle benötigt. Diese so genannten Turbulenzmodelle folgen experimentellen Ergebnissen und sind in der Regel für einen bestimmten Strömungsfall anwendbar. Je nach Anzahl der Transportdifferentialgleichungen, die für die Lösung der Turbulenzgrößen in einem Turbulenzmodell notwendig sind, unterscheidet man zwischen Null-, Ein- und Zwei-Gleichungsmodellen.

5.2.4.1 Die Boussinesq-Hypothese

Die Boussinesq-Hypothese [56] zählt als Grundlage der so genannten Wirbelviskositätsmodelle, die sich auf die Modellierung einer Austauschgröße, hier der Wirbelviskosität ν_t , beschränken. Basis der Boussinesq-Theorie ist die Annahme, dass analog zu den viskosen Spannungen auch die turbulenten Spannungen proportional zu den Gradienten der zeitlich mittleren Scherraten sind:

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \cdot \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot k \cdot \delta_{ij} \quad \text{Gl. 40}$$

Die Wirbelviskosität ist keine stoffabhängige Größe, wie die kinematische Zähigkeit ν , sondern eine von Ort und Zeit abhängige Größe, die sich mit den geometrischen Abmessungen und der mittleren Geschwindigkeit ändert. Die Boussinesq-Hypothese

schlägt somit eine Lösung für die Korrelationsterme $\overline{u'_i u'_j}$ vor, jedoch beinhaltet diese Lösung eine Größe, die selbst zu modellieren ist. Dies wird in den folgenden Abschnitt beschrieben.

5.2.4.2 Die Prandtl'sche Mischungsweg-Hypothese

Zur Berechnung der Wirbelviskosität ist deren Abhängigkeit von den die Strömung beschreibenden Variablen zu klären. Eine Methode stellt dabei die Prandtl'sche Mischungsweg-Hypothese [57] dar. Sie zählt zu den Nullgleichungsmodellen, da keine Transportgleichungen verwendet werden, sondern nur algebraische Zusammenhänge:

$$\nu_t = l_t \cdot u' = l_t^2 \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|. \quad \text{Gl. 41}$$

Prandtl nutzt dabei dimensionanalytische Ergebnisse und definiert die Wirbelviskosität als Produkt einer charakteristischen Mischungslänge l_t und einer charakteristischen gemittelten Geschwindigkeit. Die Mischungslänge ist experimentell zu bestimmen und stellt allgemein diejenige Strecke dar, die von einem Turbulenzballen zurückgelegt werden muss, um seine ursprüngliche Form zu verlieren und damit nicht mehr von seiner neuen Umgebung unterscheidbar zu sein.

5.2.4.3 Das Standard $k - \varepsilon$ Turbulenzmodell

Das Standard $k - \varepsilon$ Turbulenzmodell nach Launder und Spalding [58] ist eines der meistverwendeten Turbulenzmodelle. Es ist für viele Anwendungen verifiziert worden und zeigt im Falle isotroper Turbulenz eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen. Es zeichnet sich durch numerische Robustheit aus, da neben der Ermittlung des diffusiven Impulstransports zusätzlich die zweite Ableitung der mittleren Geschwindigkeit gebildet wird, um die Wirbelviskosität zu berechnen.

Das Standard $k - \varepsilon$ Turbulenzmodell beruht, wie alle algebraischen Modelle, auf der Boussinesq Hypothese (Gl. 40) und gehört zu den so genannten Zweigleichungsmodellen. Wie bereits erwähnt, hängt die Wirbelviskosität ν_t von der Turbulenzstruktur ab. Im $k - \varepsilon$ Modell sind die kinetische Energie k

$$k = \frac{1}{2} \cdot u_{RMS}^2, \quad \text{Gl. 42}$$

mit

$$u'_{RMS} = \sqrt{\sum_j \overline{u_j'^2}} \quad \text{Gl. 43}$$

und deren Dissipationsrate ε

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{2}{3}}}{l_t} \quad \text{Gl. 44}$$

die die Turbulenz repräsentierenden Größen. Für diese werden halbempirische, skalare Transportgleichungen formuliert, eine für die kinetische Energie k (Gl. 45) und eine für ε (Gl. 46):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(k \cdot \overline{u_j})}{\partial x_j}}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{P_k}_{\text{Produktion}} - \varepsilon \quad \text{Gl. 45}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\varepsilon \cdot \overline{u_j})}{\partial x_j}}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{c_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P_k}_{\substack{\text{Prod. durc turb.} \\ \text{Wirbelfadenstreckung}} - \underbrace{c_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}}_{\text{visk. Vermischung}} \quad \text{Gl. 46}$$

Darin sind $c_{\varepsilon 1}$ und $c_{\varepsilon 2}$ empirische Konstanten, σ_k und σ_ε die turbulenten Prandtl/Schmidt-Zahlen, die den diffusiven Transport der turbulenten Größen beschreiben und ebenfalls empirisch zu ermitteln sind. P_k ist die Produktion von turbulenter kinetischer Energie auf Grund der Scherdeformation im kompressiblen Fluid.

$$P_k = \tau_{i,j} \cdot \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \nu_t \cdot \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 47}$$

Die beiden obigen Transportgleichungen werden über P_k verknüpft. Die Schließbedingung zur Berechnung der Wirbelviskosität ν_t ist:

$$\nu_t = c_\mu \cdot l_t \cdot u'_{RMS}, \quad \text{Gl. 48}$$

Mit Gl. (32):

$$\nu_t = c_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad \text{Gl. 49}$$

c_μ ist ein dimensionsloser Faktor, der in vielen Strömungen als konstant angenommen wird und durch Experimenten bestimmbar ist.

Durch Einsetzen von Gl. 49 in die Boussinesq-Hypothese (Gl. 40) ist nun eine Berechnung der Elemente des Reynolds'schen Spannungstensors möglich. Zusammen mit den Bewegungsgleichungen und der Kontinuitätsgleichung ergibt sich damit ein geschlossenes Gleichungssystem.

5.2.5 Verbrennungsmodellierung (Reaktionsmodell)

Um die turbulenten Verbrennungsprozesse in einer Brandsimulation zu berechnen, muss die Interaktion zwischen turbulenter Mischung und chemischer Reaktion modelliert werden. Während ein Turbulenzmodell die Transportterme nicht reagierender skalarer Größen bestimmt, erfolgt die Schließung des turbulent-diffusiven Speziestransports und der zeitlich mittleren Reaktionsquellterme durch ein Verbrennungsmodell.

Turbulente Verbrennungs- bzw. Reaktionsmodelle, die die Interaktion von turbulentem Strömungsfeld und chemischer Reaktion beschreiben, basieren auf charakteristischen Zeit- und Längenskalen, d. h. auf Schwankungsintensitäten und Längenmaßen der turbulenten Strömung sowie der relevanten chemischen Zeitmaße.

Für die genaue Beschreibung der Verbrennungsreaktion sind Informationen über die chemische Reaktionskinetik des jeweiligen Brennstoffs notwendig. Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen umfasst diese umfangreichen Reaktionsmechanismen mit mehrere Komponentengleichungen (zum Teil mehrere tausend Elementarreaktionen [59]). Für die Modellierung der Verbrennung bedeutet dies jeweils eine Transportgleichung für jede Gaskomponente. Die Verwendung detaillierter Chemie ist aufgrund der Rechenkapazitäten meistens nicht möglich, aber auch nicht unbedingt notwendig. Deswegen werden die Reaktionsmechanismen in einem ersten Schritt reduziert und bzgl. der Wiedergabe der Temperatur und Brenngeschwindigkeit optimiert. Ziel ist, alle wichtigen Merkmale der Verbrennungsreaktion mit vertretbarem Zeitaufwand und Ressourcen wiederzugeben. Im Gegensatz zu einer Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in einer Gasturbine oder einem Verbrennungsmotor ist der Brennstoff oder das Brandgut bei Bränden nicht klar definierbar. D. h., meist hat der Brennstoff eine heterogene Zusammensetzung, bei komplexer geometrischer Struktur. Z. B. sind an einem Gebäudebrand weitaus mehrere Verbundwerkstoffe beteiligt, deren Reaktionsmechanismen, einschließlich Zwischenreaktionen, gar nicht

ausreichend bekannt sind [60]. Zusätzlich erfordert die detaillierte Modellierung der Verbrennung fester, brennbarer Stoffe eine Berücksichtigung von Zersetzungs- und Pyrolyseprozessen sowie der brandinduzierten Auftriebsströmung wärmestrahrender Ascheteilchen in Abhängigkeit vom lokalen Umgebungszustand. Dies führt zu einer notwendigen, starken Vereinfachung des gesamten Verbrennungsprozesses bei einer Brandsimulation und wird meist durch

- die Vorgabe einer an das Brandszenario gebundenen zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrates,
- das Einströmen eines Brandtracers mit realitätsnaher Brandtemperatur,
- die Modellierung mit Hilfe einer einzigen, irreversiblen Brutto- oder Globalreaktion für die *Brennstoff + Oxidator → Produkte* gilt,
- die Modellierung unter Anwendung von reduzierten Reaktionsmechanismen eines repräsentativen Kohlenwasserstoffs als Brennstoff für die Oxidation,
- die Modellierung mit Hilfe von Tabellierungstechniken (Entkoppelung der chemischen Kinetik von der Strömungsmechanik)

erreicht. Bei den ersten zwei Methoden wird der Verbrennungsprozess, der eigentlicher Antrieb der brandinduzierten Strömung ist, nicht direkt aufgelöst. Dies führt zur Vernachlässigung der Mischungsbedingungen (der Brand ist eine nicht-vorgemischte Flamme) sowie des Sauerstoffverbrauchs (Ventilationsbedingungen) und nicht zuletzt der Wechselwirkung zwischen Chemie und Turbulenz (Beschleunigung/Stabilisierung der Flamme/des Brandes).

Im Folgenden werden nur die für eine Brandsimulation relevanten Verbrennungsmodelle kurz vorgestellt.

5.2.5.1 Brutto-Reaktionen

An Stelle detaillierter chemischer Kinetik tritt eine einzige, irreversible Brutto- oder Globalreaktion, für die *Brennstoff + Oxidator → Produkte* gilt. Brennstoff und Oxidator können somit nie gleichzeitig an einem Ort vorkommen. Da dieser Ansatz auf Zwischenprodukte verzichtet, ist damit weder der Verbrennungsablauf noch die Schadstoffbildung berechenbar. Bezüglich einer Brandsimulation ist diese Approximation zum nicht-vorgemischtem Verbrennungsprozess sehr ungenau und teilweise falsch (wie an der Grenzschicht Brand - kalte Strömung). Denn bei einem Brand sind weitere Prozesse, wie die turbulente Mischung, die eine Brandbeschleunigung und Stabilisierung als Folge der Rückführung und turbulente Diffusion von heißen, aktiven

Spezies in der Hauptreaktionszone mit sich bringt, ein nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor auf die lokale Brandentwicklung / Verbrennungsreaktion, ebenso die Brenngeschwindigkeit und Flammenhöhe. Des Weiteren ist die Annahme eines vollständigen Ausbrandes bei den meisten Bränden falsch.

5.2.5.2 Eddy-Dissipation-Modell

Das Eddy-Dissipation-Modell nach Magnussen et. al. [61] zählt zu den Verbrennungsmodellen, die auf der Annahme sehr schneller oder unendlich schneller Chemie basieren. Bei sehr schneller Chemie wird der Stofftransport zum geschwindigkeitsbestimmenden Vorgang, so dass die Mischung auf molekularer Ebene (und damit die Dissipationsrate) die Geschwindigkeit des Verbrennungsablaufs steuert. Entsprechend geht bei diesem Modell die mittlere Reaktionsrate aus den mittleren Konzentrationen und Turbulenzvariablen (z.B. k und ε) hervor [61]. Das Eddy-Dissipation-Concept lässt sich auch mit endlichen Reaktionsraten (finite-rate chemistry) nutzen.

5.2.5.3 Finite-Rate-Chemistry

Bei diesem Modell werden die chemischen Quellterme, also die Umwandlungsraten, mit Hilfe von druck- und temperaturabhängigen Geschwindigkeitskoeffizienten der einzelnen Reaktionen des im Solver implementierten, reduzierten Reaktionsmechanismus berechnet. Dabei wird die globale Reaktionsrate wie folgt berechnet:

$$R_k = F_k \prod_{I=A,B,\dots}^{N_C} [I]^{r_{kl}} \quad \text{Gl. 50}$$

Hier ist $[I]$ die molare Konzentration der Komponente I und F_k die Geschwindigkeitskonstante, die mit einer Arrhenius-Abhängigkeit (Gl. 51) definiert ist. r repräsentiert die Reaktionsordnung der Komponente I in die Elementarreaktion k .

$$F_k = A_k T^{\beta_k} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad \text{Gl. 51}$$

In obiger Gleichung sind:

- A_k : Präexponentieller oder Frequenzfaktor
- R : Universelle Gaskonstante $[8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}]$.
- β_k : Dimensionsloser Temperaturexponent

- E_k : Aktivierungsenergie [$J\ mo^{-1}$]
- T : Absolute Temperatur [K]

Da dieses Modell direkt zur numerischen Auflösung der Flammenfront eines Brandes führt, wird eine lokale Verfeinerung des Rechengitters im Bereich der Wärme-freisetzungsreaktion benötigt. Diese führt zu hohen Rechenkapazitäten und auch Rechenzeiten. In den letzten 30 Jahren gab es eine rasante Entwicklung der Rechenkapazitäten bzgl. Prozessorleitung, Speicher und Größe. Daher ist es heutzutage möglich, deutlich aufwendigere Geometrien und komplizierte Vorgänge in einem ausgewogenen Verhältnis von Rechenzeit und Ressourcen numerisch abzubilden.

5.2.5.4 Chemisches Gleichgewicht

Im Sonderfall unendlich schneller Chemie befindet sich das Gas im chemischen Gleichgewicht. Unabhängig von der Zahl chemischer Komponenten folgt dessen Zusammensetzung dann aus der Elementzusammensetzung und zwei thermodynamischen Zustandsgrößen (z. B. Druck und Temperatur). In einem homogenen Reaktor ist die Elementzusammensetzung durch den Ausgangszustand definiert. In offenen Systemen lässt sie sich (bei geeigneten Voraussetzungen) über den Mischungsbruch charakterisieren. An Stelle zahlreicher Komponentengleichungen ist dann neben Impuls-, Energie und Kontinuitäts oder Druckgleichung nur die Gleichung zum Mischungsbruch zu lösen. Das macht die Ermittlung der Gaszusammensetzung rechnerisch sehr effizient.

5.2.5.5 Tabellierungstechniken: Flamelet-Ansatz

Bei vielen Brandsituationen und Brandszenarien ist weder die Annahme unendlich schneller Chemie gerechtfertigt noch lässt sich der Verbrennungsablauf mit Bruttoreaktionen beschreiben. In diesem Fall ist es am besten, mit detaillierter Chemie zu arbeiten. Darunter versteht man die Verwendung mehr oder weniger großer Reaktionsmechanismen, denen Elementarreaktionen zu Grunde liegen. Um den hohen Rechenaufwand dieses Ansatzes zu reduzieren, bieten sich neben der Reduzierung des jeweiligen Reaktionsmechanismus auch Tabellierungstechniken an. Im günstigsten Fall führt das zu einer Entkoppelung der chemischen Kinetik von der Strömungsmechanik, was den numerischen Strömungslöser vom Steifigkeitsproblem der Verbrennung befreit. Zu den wichtigsten Methoden die auf einer Tabellierung von Daten beruhen, zählt der Flamelet-Ansatz.

Denn das am weitesten verbreitete Modell zur Simulation turbulenter Verbrennungen ist der Flamelet-Ansatz [62], der in wesentlichen Teilen auf Peters [63], [64] zurückgeht. Bei dieser Methode wird eine turbulente Flamme als Ensemble zahlreicher laminarer, eindimensionaler „Flämmchen“ (Flamelets) approximiert. Die thermochemischen Eigenschaften dieser Flamelets werden vorausberechnet und in niedrigdimensionalen Tabellen abgelegt. Bei nicht-vorgemischter Verbrennung dient als Basisproblem meist eine Gegenstromdiffusionsflamme, die unter Vereinfachungen eindimensional berechnet werden kann. Den strömungsmechanischen Einfluss auf die Flamme charakterisiert die Streckungsrate bzw. die skalare Dissipationsrate. Im einfachsten Fall wird der thermochemische Zustand eines Flamelets als Funktion von Mischungsbruch und Streckungsrate tabelliert. Die Übertragbarkeit der eindimensionalen, laminaren Modellprobleme auf die turbulente Verbrennung gilt bei „dünnen Flammen“ als gesichert (Flammendicke $<$ Kolmogorov-Länge). Liegt für den gewünschten Brennstoff und die gegebenen Parameter eine Flamelet-Tabelle vor, so sind bei der Simulation zusätzlich zu den Strömungsgleichungen nur die Transportgleichungen des Mischungsbruchs und seiner Varianz zu lösen. Aus diesen Werten ergibt sich durch Tabellenzugriff ein vollständiges Bild des thermochemischen Zustands.

5.2.6 Strahlungsmodellierung

Bei Bränden wird ein signifikanter Anteil der freigesetzten Reaktionswärme durch Wärmestrahlung übertragen. Dieser Wärmetransport ist nicht an die Strömungsprozesse und an die Anwesenheit von Materie gekoppelt. Daher ist die Modellierung der Wärmestrahlung ein wesentlicher Aspekt der Brandsimulation. Die Wärmestrahlung bei Bränden kann nur unter starken Vereinfachungen, d. h. bei vertretbarer Rechenzeit und Ressourcen, approximiert werden.

Zur theoretischen Beschreibung von Emission, Transport und Absorption der Strahlungsenergie gibt es zwei sich ergänzende Ansätze: die klassische Theorie der elektromagnetischen Wellen und die Quantentheorie der Photonen. Für den Energiestrom in Form von Strahlung sind die Unterschiede der vierten Potenz der thermodynamischen (absoluten) Körpertemperatur, zwischen welchen Energie durch Strahlung ausgetauscht wird, maßgebend. Im Allgemeinen wird dieser Energietransport (Energiestrom) mathematisch durch eine

Strahlungstransportgleichung beschrieben und lautet für ein strahlungsaktives Medium an einer Position im Raum \vec{r} in Richtung \vec{s} :

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a_{str} + \sigma_{stg})I(\vec{r}, \vec{s}) = a_{str} n_{str}^2 \frac{\sigma_{str} T^4}{\pi} + \frac{\sigma_{stg}}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}_{stg}) \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}_{stg}) d\Omega_{stg} \quad \text{Gl. 52}$$

Die Strahlungstransportgleichung beschreibt die Änderung der Intensität entlang der Strahlungsausbreitungsrichtung. Diese wird durch Absorption und Ausstreuung verringert und durch Emission und Einstreuung von Strahlungsenergie erhöht.

In Gl. (52) bezeichnet I die Strahlungsintensität, \vec{r} die Position des Bilanzvolumens im Raum, \vec{s} die Ausbreitungsrichtung der Strahlung, \vec{s}_{stg} die Ausbreitungsrichtung der gestreuten Strahlung, s die Weglänge, a_{str} den Absorptionskoeffizienten, n_{str} den Brechungsindex, σ_{stg} den Streukoeffizienten, σ_{str} die Stefan-Boltzman-Konstante ($5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$), T die thermodynamische Temperatur des Mediums im Bilanzvolumen, Φ die Phasenfunktion und Ω_{stg} den Raumwinkel der ausgestreuten Strahlung. $(a_{str} + \sigma_{stg})s$ ist die optische Dicke des Mediums. Die Phasenfunktion $\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}_{stg})$ ist eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Sie beschreibt, wie viel Strahlungsenergie aus welcher Richtung in die Strahlungsrichtung \vec{s} eingestreut wird. Das Integral der Phasenfunktion ist auf eins normiert:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}_{stg}) d\Omega_{stg} = 1 \quad \text{Gl. 53}$$

Der Streukoeffizient σ_{stg} kann oft als Konstante behandelt werden, während der Absorptionskoeffizient a_{str} in der Regel eine Funktion der lokalen Konzentration von H_2O und CO_2 (sowie aller weiteren mehratomigen Moleküle, welche in der Lage sind Strahlung zu absorbieren, wie beispielsweise CO), der repräsentativen Schichtdicke und des Totaldrucks ist. Als repräsentative Schichtdicke wird beispielsweise in einer Feuerung der Brennkammerdurchmesser herangezogen.

Aufgrund der Komplexität der mathematischen Beziehungen zur Beschreibung des Energietransports durch Strahlung lässt sich eine analytische Lösung nur bei sehr einfachen Geometrien und stark vereinfachten Annahmen zu den Eigenschaften des strahlungsaktiven Mediums realisieren. Bei Bränden kann die Wärmestrahlung aufgrund der Inhomogenität und meist unbekanntem und komplexer Struktur des Brandguts nur mittels numerischer Methoden / Modelle berechnet werden. Die Methoden zur Ermittlung des Energietransports durch Strahlung lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- statistische Methoden
- Zonen-Methoden
- differentielle Methoden

Die meist angewandten numerischen Modelle sind:

- P-1 radiation model
- Discrete transfer radiation model (DTRM)
- Monte-Carlo radiation model
- Discrete ordinates (DO) radiation model

Einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Strahlungsmodellierung ist in Siegel [65] und Modest [66] zu finden.

5.2.7 Diskretisierungsmethoden

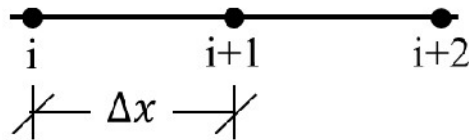
Zur Lösung der strömungscharakterisierenden Gleichungen gibt es für technisch relevante Strömungsprobleme keine analytischen Methoden, da die Nichtlinearität des gekoppelten Differentialgleichungssystems nur für sehr einfache Anwendungen, wie z. B. die Couette-Strömung und die Hagen-Poiseuille-Strömung, eine analytische Lösung erlaubt. Folglich werden numerische Näherungsverfahren benutzt, bei denen die Diskretisierung der Transportgleichungen im Vordergrund steht. Diskretisierung bedeutet dabei die Anwendung der kontinuierlich formulierten Differentialgleichung auf die diskreten Orte eines Rechengitters. Ziel ist, ein lineares Gleichungssystem zu erhalten und dieses numerisch zu lösen. Mit Hilfe unterschiedlicher Diskretisierungsverfahren werden die differentiellen Transportgleichungen in ein System algebraischer Gleichungen überführt. Dabei können verschiedene numerische Verfahren angewendet werden wie z. B. die Finite Elemente Methode, Finite Differenzen Methode und Finite Volumen Methode. Die Gemeinsamkeit all dieser Methoden liegt darin, dass

das Strömungsgebiet mit einem Rechengitter überzogen wird und die Verteilung der jeweils zu transportierenden Größe an diskreten Punkten berechnet wird.

Im Weiteren wird lediglich auf die FDM und die FVM eingegangen, da diese Verfahren in den durchgeführten Berechnungen verwendet wurden.

5.2.7.1 Finite Differenzen Methode (FDM)

Bei der Methode der Finiten Differenzen („Differenzenverfahren“) werden die Ableitungen in den Transportgleichungen Massenbilanz (Gl. 13), Impulsbilanz (Gl. 14) und Speziestransport (Gl. 22) durch Approximationen aus der Taylor-Reihenentwicklung ersetzt. So gilt beispielsweise für ein Rechengitter mit konstanten Abständen (äquidistantes Rechengitter) zwischen den einzelnen Rechenpunkten in der x-Richtung:



$$\Phi_i = \Phi_{i+1} - \Delta x \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{i+1} + \frac{1}{2} \Delta x^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right)_{i+1} - \dots \quad \text{Gl. 54}$$

$$\Phi_{i+2} = \Phi_{i+1} + \Delta x \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{i+1} - \frac{1}{2} \Delta x^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right)_{i+1} + \dots \quad \text{Gl. 55}$$

Aus Umformungen und Kombinationen dieser Reihenansätze können bei Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung die verschiedenen Terme in Differentialgleichungen angenähert werden. Aus Gl. 54 können so beispielsweise die sogenannten „Rückwärtsdifferenzen“ abgeleitet werden:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{i+1} = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta x} + O(\Delta x^1). \quad \text{Gl. 56}$$

In Gleichung 56 bedeutet $O(\Delta x^1)$, dass die Approximationsfehler mit der ersten Ordnung des Abstandes Δx zwischen zwei benachbarten Rechenpunkten wachsen.

Aus der Differenz (55)-(54) folgen die sogenannten Zentraldifferenzen:

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{i+1} = \frac{\Phi_{i+2} - \Phi_i}{2\Delta x} + O(\Delta x^2). \quad \text{Gl. 57}$$

Und aus (55)+(54) folgt:

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_{i+1} = \frac{\Phi_i + \Phi_{i+2} - 2\Phi_{i+1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2). \quad \text{Gl. 58}$$

Natürlich sind auch andere Kombinationen zur Approximation der einzelnen Terme denkbar.

Durch die Finiten Differenzen werden also die Ableitungen in den differentiellen Transportgleichungen an diskreten Punkten mit Differenzenformeln approximiert. Als Diskretisierungsfehler werden die Abweichungen der auf einem endlichen Rechengitter erzielten Werte zu denen des unendlich feinen Rechengitters (exakte, analytische Lösung) bezeichnet. Die Verringerung der Diskretisierungsfehler wird bei der FD-Methode durch Berücksichtigung von Termen höherer Ordnung in der Entwicklung der Taylor-Reihe erreicht.

5.2.7.2 Finite Volumen Methode (FVM)

Die Finite Volumen Methode ist eine der am weitesten verbreiteten Diskretisierungsmethoden. Ihre Anwendung beruht auf einer hohen Flexibilität bei der Gittererzeugung, relativ geringem Rechenaufwand und einer genauen Erfassung der Strömungen. Wichtig für diese Methode ist die Anfertigung eines speziell für den zu untersuchenden Strömungsfall angefertigten Rechengitters. Schon der Name dieser Methode deutet darauf hin, dass die Transportgleichungen über einzelne Kontrollvolumen integriert werden. Eine endliche Anzahl von dreidimensionalen, sich nicht überlappenden Rechenzellen erstreckt sich über das gesamte Rechenfeld. Man nutzt dieses, um die Lage der einzelnen Kontrollvolumina durch die Zellknoten des Rechengitters und den in der Zellmitte liegenden Punkt zu definieren. Dieser wird als Integrationspunkt eingesetzt.

Ausgangspunkt dieser Methode ist die Integration der differentiellen Form der Transportgleichungen über jedes einzelne Kontrollvolumen hinweg. Nach Integration und mit Hilfe des Gauss'schen Theorems lautet die neue Form der drei Grundgleichungen – Massenbilanz (Gl. 13), Impulsbilanz (Gl. 14) und Speziestransport (Gl. 22):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dv + \int_A \rho u_j dn_j = 0 \quad \text{Gl. 59}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dv + \int_A \rho u_i u_j dn_j \\ = - \int_A p dn_i + \int_A \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{u_i} dv \end{aligned} \quad \text{Gl. 60}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dv + \int_A \rho \phi u_j dn_j = - \int_A p dn_i + \int_A \delta_\phi \cdot \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dv. \quad \text{Gl. 61}$$

In den Gleichungen (59), (60), (61) werden die über das Kontrollvolumen V integrierten Transportgleichungen nach der Anwendung des Gauss'schen Integralsatzes in Integrale für eine Oberfläche A , die dieses Kontrollvolumen umhüllt, umgeformt. In den oben dargestellten Gleichungen beinhalten die Oberflächenintegrale die Flüsse der Erhaltungsgrößen, wohingegen die Volumenintegrale die Änderung der Quell-/Senkterme darstellen. In den Termen für Konvektion und Diffusion stellt dn_j die differentielle kartesische Komponente eines nach außen gerichteten Oberflächennormalvektors dar. Nach dem Integrationsschritt folgt die Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen, dabei werden die Ableitungen durch Differenzenquotienten zwischen den Integrationspunkten ersetzt. Die Lage der Integrationspunkte und der Knotenpunkte des Rechengitters für ein Kontrollvolumen in der Finite Volumen Methode sind in Abbildung 18 dargestellt.

Für jeden Knotenpunkt wird ein Kontrollvolumen definiert und durch 24 vierseitige Oberflächen begrenzt. Zwischen acht Oktanten mit insgesamt 18 Integrationspunkten werden die Nettoflüsse der jeweiligen Strömungsgröße mit Hilfe der diskretisierten Erhaltungsgleichungen berechnet.

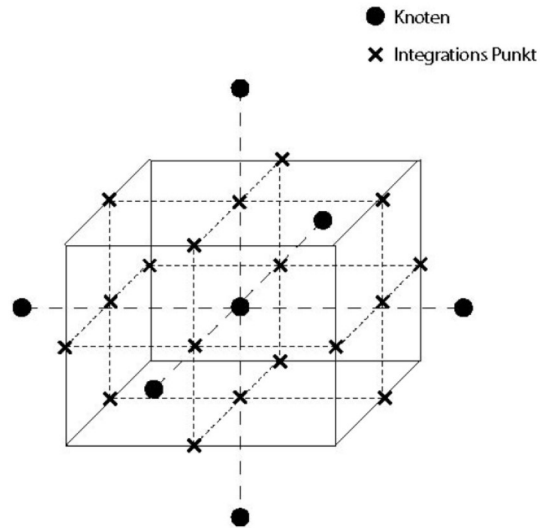


Abbildung 18: Kontrollvolumina, Knoten und Integrationspunkte in der Finite Volumen Methode

Die diskrete Form der Integralgleichungen lautet:

$$\rho V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j) = 0 \quad \text{Gl. 62}$$

$$\rho V \left(\frac{u_i - u_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip}^0 (u_j)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} \quad \text{Gl. 63}$$

$$+ \sum_{ip} \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right) + \bar{S}_{u_i} V$$

$$\rho V \left(\frac{\phi - \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip}^0 \phi_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} \quad \text{Gl. 64}$$

$$+ \sum_{ip} \left(\delta_\phi \cdot \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \bar{S}_\phi V$$

In den oben dargestellten Gleichungen ist V das Volumen jedes Kontrollvolumens; der Index ip steht für den jeweiligen Integrationspunkt, Δt ist der Zeitschritt und mit dem Index 0 werden die Größen des vorangegangenen Zeitschritts bezeichnet. Der Zeitterm wird mit einer einfachen Rückwärts-Euler-Näherung erster Ordnung

diskretisiert, im Gegensatz dazu werden die Quell-/Senkterme als Mittelwerte im Kontrollvolumen dargestellt.

Die Form der gewählten Diskretisierung bzw. der Kontrollvolumen und des damit verbundenen Netzes kann unterschiedlich sein. Es werden strukturierte und unstrukturierte Gitter voneinander unterschieden.

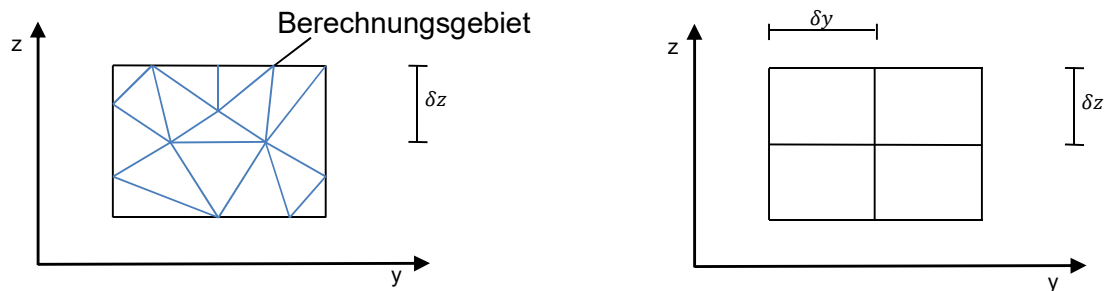


Abbildung 19: links: unstrukturiertes Netz rechts: strukturiertes Netz

Strukturierte Gitter haben den Vorteil, dass die Berechnungen mit solchen Gittern sehr stabil und sehr genau sind. Unstrukturierte Gitter bieten den Vorteil, dass diese beliebige und damit auch sehr komplexe Geometrien abbilden können. Auch hinsichtlich einer lokalen Verfeinerung des Netzes ist das unstrukturierte Gitter gut einsetzbar (s. Abbildung 20).

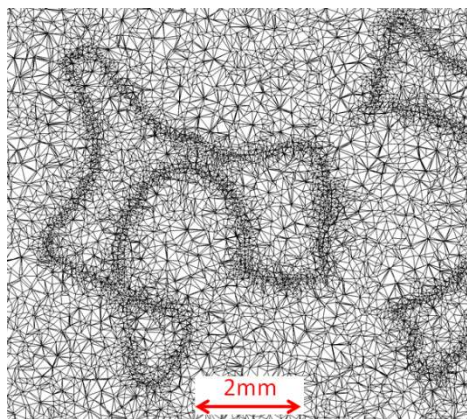


Abbildung 20: Ausschnitt eines unstrukturierten Gitters, incl. Verfeinerung in Nähe zu festen Wänden.

5.2.8 Numerischen Berechnungsmethoden

5.2.8.1 Reynold-Averaged-Navier-Stokes-Equations (RANS)

Wie oben schon erläutert, stellen die RANS-Berechnungsmethoden eine Methode zur Berechnung der Navier-Stokes Gleichungen (in diesem Fall Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen) dar, mit dem Ziel, turbulente Strömungen mit einem vertretbaren Aufwand numerisch zu lösen.

5.2.8.2 Large-Eddy - Simulation (LES)

In der Grobstruktur- oder Large-Eddy-Simulation (LES), welche standardmäßig z. B. im Fire Dynamics Simulator (FDS) verwendet wird, werden die Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichungen räumlich gefiltert gelöst. Die LES löst damit alle Turbulenzelemente auf, die größer als die räumliche Filterweite Δ_F sind. In der Regel wird die Filterweite auf die Größe des verwendeten Netzes gesetzt, damit die Wirkung kleiner, nicht aufgelöster Wirbel bzw. innerhalb einer Zelle (vgl. Abbildung 21) auf die makroskopischen Größen der Strömung muss durch ein entsprechendes Modell berücksichtigt werden. Diese Modelle werden auch Subgrid-Scale-Turbulenzmodelle genannt [67].

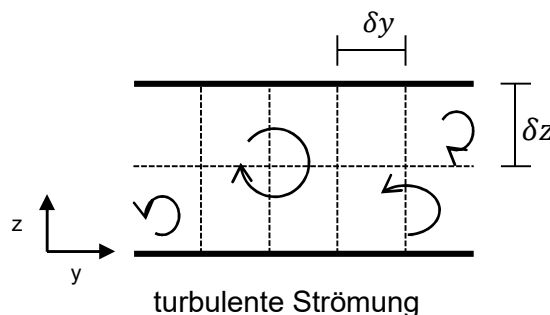


Abbildung 21 Stromlinien bzw. Wirbel unterschiedlicher Größe einer turbulenten Rohrströmung mit schematischer Darstellung eines Gitternetzes mit den Gitterweiten δy und δz

5.2.8.3 Direkte Numerische Simulation (DNS)

Bei der direkten numerischen Simulation (DNS, [68]) werden die Navier-Stokes-Gleichungen direkt gelöst. Dies erfordert jedoch einen sehr hohen Rechenaufwand, da selbst kleinste Längenskalen aufzulösen sind. Zudem sind die Zeitschritte bei einer direkten Simulation umgekehrt proportional zum Quadrat der Stützstellenabstände zu reduzieren. Die Rechenzeit einer DNS steigt etwa in der vierten Potenz der

Reynoldszahl [59]. Für die meisten praktischen Anwendungen, unter anderem auch im Bereich des Brandschutzes, sind diese direkten Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen noch nicht möglich. Selbst wenn die DNS technischer Systeme möglich wäre, so ist man in der Praxis meist nicht an lokalen Strukturen, sondern an globalen Ergebnissen, wie z. B. zeitlich gemittelten Temperaturen oder Rauchgaszusammensetzungen, interessiert. Damit solche Aussagen getroffen werden könnten, müssten zahlreiche direkte numerische Simulationen für verschiedene Eingangsparameter durchgeführt werden. Denn die lokalen Strukturen turbulenter, brandinduzierter Strömungen hängen stark von Anfangs- und Randbedingungen ab.

5.2.9 Anwendungsgrenzen

Die Genauigkeit der Lösung von Feldmodellen hängt wesentlich von der Kombination/Anwendung numerischer Modelle (Turbulenz-, Verbrennungs-, Strahlungsmodell etc.) und von der zeitlichen und räumlichen Diskretisierung der Berechnungs-umgebung ab. Wichtig bei der Turbulenzmodellierung ist z. B. die ausreichend genaue Auflösung der bei Bränden induzierte klein- bis großskalige Turbulenz. Dies ermöglicht eine genaue Vorhersage der Einströmbedingungen, der Grenzschichten zur festen Oberflächen, der Rauchschichtausbreitung aber in erster Linie der komplexen Mischungs- und Diffusionsprozesse in der Brand- bzw. Flammenzone. Die Verwendung von angemessenen Verbrennungsmodellen spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Auflösung der Wärmefreisetzung. Die meistens repräsentative Auflösung der chemischen Prozesse bei Bränden ist gekoppelt mit der Auflösung der Zeitskalen dieser Prozesse, die einen Bereich von mehreren Größenordnungen überdecken (10^{-10} s bis mehr als 1 s [50]). Die physikalischen Prozesse (Zeitskalen für Strömung, Transport und Turbulenz) hingegen überdecken einen viel kleineren Bereich (10^{-2} – 10^{-4} s [50]). Die ausreichend detaillierte Darstellung der Verbrennungsprozesse benötigt somit deutlich geringere Zeitskalen der numerischen Rechnung, was höhere Rechenleistungen und Rechenzeiten erfordert.

Die Genauigkeit der Lösung von Feldmodellen hängt zusätzlich von der räumlichen Diskretisierung ab. Je detaillierter also je kleiner die Kontrollvolumina gewählt werden, desto besser nähert sich die Berechnung dem realen Ergebnis an. Dabei müssen vor allem räumliche Bereiche mit hohen Dichte-, Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten höher aufgelöst werden. Diese können im Falle eines Brandes Öffnungen und das direkte Umfeld eines Brandes sein.

Kleinere Kontrollvolumina führen umgekehrt in Abhängigkeit der lokalen Geschwindigkeit bei gleicher Genauigkeit zu kleineren Zeitschritten.

Wie bei Zonenmodellen beschränkt sich die Abbildung eines Brandes auf das innere der Berechnungsdomain (Rechengitter) und somit auf die Außengrenzen der gewählten Kontrollvolumina. Im Allgemeinen sollte, um die Strömung an Öffnungen möglichst genau auflösen zu können das Rechengitter über den Brandraum hinaus ausgedehnt werden. Auch im Falle eines unterventilierten Brandes bei dem es zur Verbrennung außerhalb des Brandraumes kommt kann bei ausreichender Ausdehnung des Rechenggebietes aufgelöst werden. Weiter besteht die Schwierigkeit, dass im Bereich von Öffnungen im Verhältnis sehr hohe Geschwindigkeits- und Dichtegradienten auftreten. Dies erfordert eine sehr hohe Auflösung von Zellen im Bereich der Öffnung und darüber hinaus. Bei äquidistanten Gittern sind solche lokalen Gitterverfeinerungen schwierig möglich.

6 Zusammenfassung

Es wurden die Methoden zur Abschätzung von Bränden (siehe 4 und 5), die brandrelevanten Phänomene (siehe 3) sowie deren planerischer Kontext im baurechtlichen Verfahren (siehe 2) grundsätzlich beschrieben. Die bekannten Anwendungsgrenzen der Modelle wurden zusammengestellt.

Bei der Anwendung der aufgezeigten Modelle werden Gleichungen iterativ gelöst. Dabei ist der Zeitschritt eine wesentliche Größe um die Berechnungsdauer auf Computersystemen zu steuern. Es besteht hierbei die Schwierigkeit Zeitschrittgrößen zu finden, die zum einen die physikalischen Vorgänge ausreichend genau abbildet und gleichzeitig bei einer gegebenen Rechnerleistung in absehbarer Zeit Lösungen produziert. Hier haben Zonenmodelle aufgrund ihrer geringen Anzahl an Gleichungen und Kontrollvolumina einen Vorteil. Die Berechnungen mit Feldmodellen sind hingegen etwas aufwendiger und können sich vor allem bei großen Volumina sehr zeitintensiv gestalten.

Aufgrund der hohen Komplexität der Verbrennungsvorgänge insbesondere fester Brennstoffe ist derzeit die detaillierte Modellierung der Verbrennung nicht möglich. Vielmehr werden für Brennstoffe typische (Schadstoff-) Bildungsraten verwendet, wie sie beispielsweise in [7] vorgeschlagen werden. Jedoch ist im Einzelfall zu prüfen wie die Werte bestimmt wurden und ob diese für die angestrebte Berechnung Gültigkeit besitzen.

Geometrien, die von der Standard-Geometrie eines rechteckigen Raumes mit parallelen Wänden und Decken abweicht ist zu prüfen in wie weit Zonen- wie Feldmodelle anwendbar sind. Zonenmodelle gehen von dieser Standardgeometrie grundsätzlich aus, so dass die reale Geometrie nur als Raum mit äquivalentem Volumen angenähert werden kann. Es ist dabei fraglich ob die realen Bedingungen z.B. die Einflüsse auf den Plume oder die Strömungsbedingungen an Öffnungen und Wärmeübergangsbedingungen an Wände damit abgebildet werden können. Im Zweifel sollte ein Feldmodell zu Beurteilung (zusätzlich) herangezogen werden. Feldmodelle können je nach Diskretisierungsverfahren Geometrien unterschiedlich gut annähern.

7 Fazit und Ausblick

In den folgenden Teilen des Forschungsberichtes wird eine vergleichende Betrachtung der Bemessungsbrände für ausgewählte Beispiele durchgeführt werden. Dabei soll untersucht werden wie einzelne brandrelevante Parameter das Ergebnis beeinflussen. Die Streuung der Ergebnisse wird den Sicherheitskonzepten der bekannten Verfahren des EC bzw. der DIN 18230 gegenübergestellt und bewertet.

Die Beispiele sollen auch als Grundlage dafür dienen die Einflüsse der Modellierungsgrundsätze wie Gitterauflösung und den Anwendungsbereich für Plume-Formeln näher zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bauministerkonferenz, „Musterbauordnung (MBO) Fassung November 2002 letzte Änderung 13.05.2016,“ 2002.
- [2] Europäische Kommission, „Grundlagendokument Nr. 2: Brandschutz,“ in *Mitteilung der Kommission über die Grundlagendokumente der Richtlinie des Rates 89/106/EWG*, 1994, pp. 23-74.
- [3] Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, „Bekanntmachung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft im Einvernehmen mit dem Az.: 45-2601.1/45 Ministerium für Verkehr und Infrastruktur über die Liste der Technischen Baubestimmungen (LTB),“ 14. November 2014.
- [4] U. Schneider, T. Hegger, U. Max, F. Mehl, U. Seifert und K.-D. Wathling, *Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz*, Renningen: expert verlag, 2007.
- [5] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, Institut für technische Sicherheit, Sicherheitsinstitut, „VdS 2827:2000-05 Bemessungsbrände für Brandsimulationen und brandschutzkonzepte,“ VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, 2000.
- [6] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 4102-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe und Bauteile,“ Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [7] Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes,“ Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Altenberge, Braunschweig, 2013.

- [8] Normenausschuss Bauwesen, „DIN EN 1991-1-2 Einwirkungen auf Tragwerke-Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [9] „Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen Fassung September 2014,“ Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2014.
- [10] J. Zehfuß, „Anwendung des Naturbrandverfahrens im Rahmen von Eurocode-Brandschutznachweisen,“ in *Tagungsband Braunschweiger Brandschutztag*, Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 2014, pp. 111-128.
- [11] Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU, „Muster-Richtlinie über den baulichen brandschutz im Industriebau (MIndBauRL),“ Stand März 2000.
- [12] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz, „Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (MIndBauRL),“ Februar 2014.
- [13] Normenausschuss Bauwesen und Feuerwehrwesen, „DIN 18230-1 Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2010.
- [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] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, „Az.: 6-2600.0-3/30 Begründung und Erläuterung zur Versammlungsstättenverordnung vom 28. April 2004,“ 2004.

- [17] G. Famers und J. Messerer, „Rettung von Personen" und "wirksame Löscharbeiten" - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung,“ Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht, 2008.
- [18] VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, „VDI 6019 Blatt 1 Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden-Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit,“ Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Mai 2006.
- [19] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, „VDI 6019 Blatt 2 Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden-Ingenieurmethoden,“ Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Juli 2009.
- [20] Normenausschuss Feuerwehrwesen , „DIN 14011 Begriffe aus dem Feuerwehrwesen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [21] K. Langeheinecke, P. Jany und G. Thieleke, Thermodynamik für Ingenieure, Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2012.
- [22] Verein Deutscher Ingenieure , VDI Wärmeatlas, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- [23] U. Schneider, T. Hegger, U. Max, F. Mehl, U. Seifert und K.-D. Wathling, Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz, Renningen: expert Verlag, 2007.
- [24] Normenausschuss Bauwesen, „DIN SPEC 18230-4 Baulicher Brandschutz im Industriebau Teil 4: Brandsimulation,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2015.
- [25] A. Haksever und E. Hagen, Natürlicher brand, seine Einflußparameter in kleinen und großen Brandräumen, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 1988.

- [26] J. Kunkelmann, „Flashover/ Backdraft Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen,“ Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Karlsruhe, 2003.
- [27] J. Wiese, „Brandszenarien bei Sonderbauten,“ in *VFDB Fachtagung 1999*, Verein zur Förderung des deutschen Brandschutzes, 1999, pp. 73-103.
- [28] P. Frey, Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden, Liestal CH: Basellandschaftliche Gebäudeversicherung, 2015.
- [29] Normausschuss Bauwesen, „DIN 4102-2 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen-Bauteile Begriffe, Anforderungen und Prüfungen,“ Beuth Verlag, Berlin, September 1977.
- [30] 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.
- [31] U. Schneider, Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz, Düsseldorf: Werner-Verlag, 2002.
- [32] C. Menzel, I. Dinkov und D. Schelb, „Untersuchung zum Handrückentest der Feuerwehr,“ *BRANDSchutz/ Deutsche Feuerwehr-Zeitung*, 01/ 2017.
- [33] K. Kordina, R. Jeschar, R. Bechtold, K.-P. Ehlert und J. Wesche, „Schriftenreihe "Bau- und Wohnforschung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau - Brandversuche Lehrte,“ Der Bundesminister für Raumordnung, bauwesen und Städtebau, Bonn-Bad Godesberg, 1978.
- [34] D. D. Evans, „Ceiling Jet Flows,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy, National Fire Protection Association, 2. Auflage, 1995, pp. 2-33 - 2-39.

- [35] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, West Sussex: John Wiley & Sons, 2. Auflage, 1998.
- [36] U. Max, „Berechnungsgrundlagen mit Beispielen für die Auslegung von Rauchabzugsanlagen,“ Ingenieurbüro für Brandsicherheit AGB, Bruchsal, 2012.
- [37] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 18230-1 Baulicher Brandschutz im Industriebau-Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer,“ Beuth Verlag, Berlin, September 2010.
- [38] W. Becker, F. Mehl, H. Harald, W. Schaub, K. Halfkann, U. Schneider, U. Max und J. Wiese, „Beuth Kommentare-Baulicher Brandschutz im Industriebau,“ Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [39] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 18230-2 Baulicher Brandschutz im Industriebau- Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung Werte für den Abbrandfaktor m,“ Beuth Verlag, Berlin, Januar 1999.
- [40] Normenausschuss Bauwesen, „DIN 18230-3 Baulicher Brandschutz im Industriebau- Rechenwerte,“ Beuth Verlag, Berlin, August 2002.
- [41] C. Knaust und C. Kusche, „Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.
- [42] D. Brein, „Literaturübersicht- Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln),“ Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, 2001.
- [43] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB, Technische Universität Wien, „Technisches Referenzbuch Multi Room Fire Code (MRFC),“ Bruchsal, Wien, August 2010.

- [44] G. Heskestad, „Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4. Auflage*, Quincy, National Fire Protection Association, 2008, pp. 2-1 - 2-20.
- [45] R. Alpert, „Ceiling Jet Flows,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy, National Fire Protection Association, 2008, pp. 2-21 bis 2-36.
- [46] U.S. Nuclear Regulatory Commission und Electric Power Research Institute, „NUREG-1824 Supplement 1, Verification and Validation of selected Fire models for Nuclear Power Plant Application-Final Report,“ U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 2016.
- [47] D. Brein, „Präsentation: Anwendungsgrenzen bei der Berechnung der Rauchausbreitung- Kriterien, Bewertung und Umsetzung von Rechenergebnissen,“ 2013.
- [48] C. Feist, „Master-Thesis Anwendungsgrenzen von ingenieurmethode des Brandschutzes,“ Karlsruhe, 2013.
- [49] H. Bockhorn, *Grundlagen der Verbrennungstechnik II*, Karlsruhe, 2001.
- [50] U. M. u. R. W. D. J. Warnatz, *Verbrennung – Physikalisch – Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*, Springer Verlag, 1996.
- [51] F. Williams, *Combustion Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
- [52] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, New York: McGraw-Hill, 1979.
- [53] J. O. Hinze, *Turbulence*, New York: McGraw-Hill, 1975.
- [54] J. C. Rotta, *Turbulente Strömungen*, Stuttgart: Springer-Verlag, 1972.

- [55] O. Reynolds, On the dynamical theory in incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, Londn: Harrison and Sons, 1894.
- [56] J. Boussinesq, Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section, Paris: Gauthier-Villars et fils, 1897.
- [57] K. O. u. K. W. L. Prandtl, Führer durch die Strömungslehre, Braunschweig: Vieweg, 1969.
- [58] D. B. S. B. E. Launder, Lectures in Mathematical Models of Turbulence, London, England: Academic Press, 1972.
- [59] J. Warnatz, U. Maas und R. Dibble, Verbrennung-Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- [60] N. A. Fouad, Bauphysik-Kalender 2015: Simulations- und Berechnungsverfahren, John Wiley & Sons, 2015.
- [61] B. M. Hjertager, „On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion,“ in *16th Symposium (International) on Combustion*, 1976.
- [62] F. A. Williams, „Recent Advances in Theoretical Descriptions of Turbulent Diffusion Flames,“ in *Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows*, Boston, MA, Springer, 1975, pp. 189-208.
- [63] N. Peters, „The Premixed Turbulent Flame in the Limit of a Large Activation Energy,“ *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Bd. 7, pp. 25-38, 1982.
- [64] N. Peters, Turbulent Combustion, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- [65] R. S. a. J. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [66] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, Academic Press, 2003.
- [67] R. Schwarze, CFD-Modellierung Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen, 2013: Springer Vieweg Verlag.
- [68] W. C. Reynolds, „The potential and limitations of direct and large eddy simulation.,“ in *Whither turbulence? Turbulence at crossroads. Lecture notes in physics.*, New York, Springer, 1989, p. 313.
- [69] R. Peacock, K. B. McGrattan, G. P. Forney und P. A. Reneke, „CFAST-Consolidated Fire and Smoke Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide,“ National Institute of Standards and Technology, August 2017.
- [70] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt, Fire Dynamics Simulator User's Guide, National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [71] K. McGrattan, R. McDermot, C. Weinschenk, K. Overholt, S. Hostikka und J. Floyd, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [72] K. McGrattan, R. McDermott, K. Overholt, S. Hostikka und J. Floyd, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, Nationale Insitute of Standards and Technology, 2014.
- [73] K. Wallasch und B. Stock, Brandsimulationen mit FDS, Books on Demand, 2008.
- [74] W. Bohl und W. Elmendorf, Technische Strömungslehre, Würzburg: Vogel Bucherverlag, 2008.

-
- [75] FDS-USERGROUP, FDS-Leitfaden Beta-Version 04. März 2014, 2014.
- [76] A. Tewarson, „Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy, National Fire Protection Association, 2002, pp. 3-82 - 3-160.
- [77] J. Zierep und K. Bühler, Grundzüge der Strömungslehre, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [78] S. Lechler, Numerische Strömungsberechnung, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [79] S. Knaust, „Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden, Diss. TU Wien,“ Berlin, 2009.
- [80] S. B. Pope, Turbulent Flows, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [81] S. Bussenius, Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer, 1996.
- [82] H. Oertel jr. und E. Laurien, Numerische Strömungsmechanik, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.

Anhang

- ANHANG 1. AUSZUG ANLAGE MUSTER-LISTE DER TECHNISCHEN
BAUBESTIMMUNGEN ZU NATURBRANDVERFAHREN 80**
- ANHANG 2. EINGABEDATEN FÜR BRANDLASTGESTEUERTE,
CHARAKTERISTISCHE WÄRMEFREISETZUNGSKURVEN NACH DIN 199112/NA
82**
- ANHANG 3. AUSGEWÄHLTE PLUMEFORMELN NACH [28] BZW. [42] 83**

Anhang 1. Auszug Anlage Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen zu Naturbrandverfahren

1	Das Ergebnis der Bemessung des Feuerwiderstands (Brandeinwirkung und Nachweis) tragender oder aussteifen-der Bauteile auf der Grundlage von Naturbrandmodellen (Abschnitt 3.3 DIN EN 1991-1-2:2010-12) bedarf einer Abweichung nach § 67 Abs. 1 MBO; es kann auch im Rahmen des § 51 MBO zugelassen werden.
2	Für den Nachweis der Standsicherheit (§10 Abs. 1 MBauVorIV ⁸) sind die für die Beurteilung der Brandeinwirkungen erforderlichen Unterlagen, insbesondere für die Ermittlung der thermischen Einwirkungen und die bemessungsrelevanten Brandszenarien einschließlich der entsprechenden Bemessungsbrände, als zusätzliche Bauvorlage (§ 1 Abs. 4 MBauVorIV) vorzulegen. Die erforderlichen Unterlagen müssen vollständig, nachvollziehbar und prüfbar sein; die thermischen Einwirkungen sind raumbezogen zu ermitteln und zu dokumentieren. Die Eingangsparameter sind repräsentativ und konservativ zu wählen; dabei sind auch Brandeinwirkungen von außen und spezifische Nutzungszustände zu berücksichtigen (z. B. Fahrzeuge in Ausstellungshallen im Rahmen der Auf- und Abbauphase von Messeständen).
3	Für den Nachweis des Brandschutzes (§11 MBauVorIV) ist in den Bauvorlagen auch darzustellen, wie die nach Naturbrandmodellen bemessenen Bauteile des Tragwerks mit den erforderlichen (klassifizierten) raumabschließenden Bauteilen (wie Brand- und Trennwände, Decken, Wände notwendiger Treppenträume und Flure) zu einem geeigneten Brandschutzkonzept zusammengeführt werden sollen. Dazu gehören auch Aussagen zu den Anschlüssen brandschutztechnisch unterschiedlich bemessener Bauteile. Die Anforderungen der MBO, der Muster-Sonderbauverordnungen und Muster-Richtlinien an raumabschließende Bauteile bleiben unberührt.
4	Die Feuerwiderstandsfähigkeit des Tragwerks ist für die Durchführung wirksamer Löscharbeiten von wesentlicher Bedeutung. Vor der Entscheidung über die Abweichung/Erleichterung ist die zuständige Brandschutzdienststelle im Hinblick auf die Belange des abwehrenden Brand-schutzes zu hören; § 19 M-PPVO ⁹ bleibt unberührt.

⁸ MBauVorIV: Muster Bauvorlage-Verordnung

⁹ M-PPVO: Muster-Verordnung über die Prüferingenieure und Prüfsachverständigen

5	<p>Die zulässige Art der Nutzung des Bauvorhabens (z. B. Bürogebäude) wird durch die – gewählten und durch die Baugenehmigung festgelegten – Eingangsparameter für die Ermittlung der Brandbeanspruchung (raumbezogen) konkretisiert und begrenzt. Es sind daher geeignete Maßnahmen festzulegen, die die Einhaltung dieser Nutzungsbeschränkung sicherstellen. Dazu kommen insbesondere die Bestellung eines Brandschutzbeauftragten für die diesbezügliche Überwachung des laufenden Betriebs sowie eine Überprüfung der Brandlastannahmen innerhalb des ersten Jahres nach Aufnahme der Nutzung und wiederkehrende Überprüfungen (z. B. in Abständen von 3 - 5 Jahren) durch einen Prüflingenieur/ Prüfsachverständigen für Brandschutz* in Betracht. Die Nutzungsbeschränkung und die zu ihrer Einhaltung vorgesehenen Maßnahmen sind durch entsprechende Nebenbestimmungen in der Baugenehmigung festzulegen. In der Baugenehmigung ist darauf hinzuweisen, dass Änderungen des genehmigten Nutzungskonzepts, die zu einer höheren Brandbeanspruchung führen (z. B. veränderte Brandlasten), eine Überprüfung der Standsicherheit und gegebenenfalls die Beantragung und Erteilung einer neuen Baugenehmigung erforderlich machen.</p>
---	---

Anhang 2. Eingabedaten für brandlastgesteuerte, charakteristische Wärmefreisetzungskurven nach DIN 199112/NA

Nutzung Versammlungsstätte	<p>Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrates RHR_f: 0,5 MW/m²</p> <p>Brandlastdichte $q_{f,d}$: 417 MJ/m² bzw. ca. 115,8 kWh/m² (90 Prozent Quantil)</p> <p>t_α: 150 sec bzw. α: 0,00666</p> <p>Heizwert Brandlast H_u 13,46 MJ/kg</p>
Fläche 100 m ²	<p>A_f: 100 m²</p> <p>$\dot{Q}_{max,k}$: 50 MW</p>
Fläche 400 m ²	<p>A_f: 400 m²</p> <p>$\dot{Q}_{max,k}$: 200 MW</p>
Fläche 1600 m ²	<p>A_f: 1600 m²</p> <p>$\dot{Q}_{max,k}$: 800 MW</p>

Anhang 3. Ausgewählte Plumeformeln nach [28] bzw. [42]

	Flammenzone		Intermittierende Flammenzone bzw. Flammenspitze		Plume-Zone	
McCaffrey	$\frac{z}{Q_c^{0,4}} \leq 0,08$	$\dot{m}_e = 0,011 \cdot Q \cdot \left(\frac{z}{Q_c^{0,4}}\right)^{0,566}$	$\frac{z}{Q_c^{0,4}} \leq 0,2$	$\dot{m}_e = 0,0025 \cdot Q \cdot \left(\frac{z}{Q_c^{0,4}}\right)^{0,892247}$	$\frac{z}{Q_c^{0,4}} \geq 0,2$	$\dot{m}_e = 0,124 \cdot Q \cdot \left(\frac{z}{Q_c^{0,4}}\right)^{1,895}$
Zukoski mit virtuellem Ursprung	-	-	-	-	$z > h_{fl}$ $D \leq z/10$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3}$
Zukoski ohne virtuellem Ursprung					$L < 3 \cdot B$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot z^{5/3}$
Heskestad [44]	$z < h_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,0058 \dot{Q}_c \frac{z}{h_{fl}}$	$z = h_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,0058 \dot{Q}_c$	$z > h_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} \cdot \left[1 + 0,027 \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}\right]$

Hinweis: In CFAST (Ver. 7) wird die Korrelationen von Heskestad [69]. In der Vorgängerversion wurde McCaffrey verwendet. MRFC bietet die Auswahlmöglichkeit zwischen McCaffrey, Thomas und Hinkley, Zukoski, Heskestad, Cetergen Cox und Chitty [43].

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 Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.idf.sachsen-anhalt.de/>

eingesehen werden.