

ENTRAUCHUNGSSIMULATION

ANFORDERUNGEN NACH VFDB-LEITFADEN UND VDI 6019 – EIN VERGLEICH

Von Dr.-Ing. Jochen Zehfuß, hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH und Dipl.-Ing. Christian Paschen, insa4 GmbH

Der vfdb-Leitfaden als auch die beiden neuen VDI-Richtlinien stellen eine sinnvolle Arbeitsgrundlage für den Brandschutzingenieur dar. Der folgende Beitrag stellt dar, dass sich beide Regelwerke insbesondere im Themenbereich Entrauchung sehr gut ergänzen. In einem von den Ingenieurbüros hhpberlin und insa4 erarbeiteten Vergleich der Anforderungen für Entrauchungssimulationen nach vfdb-Leitfaden /1/ und VDI 6019 /2/ werden die Angaben beider Regelwerke zu Brandszenarien und Brandverlaufskurven, Modellierung, Plausibilitätskontrolle und Anwendungsgrenzen, Sicherheitskonzept sowie Konkretisierung der Schutzziele tabellarisch gegenüber gestellt.

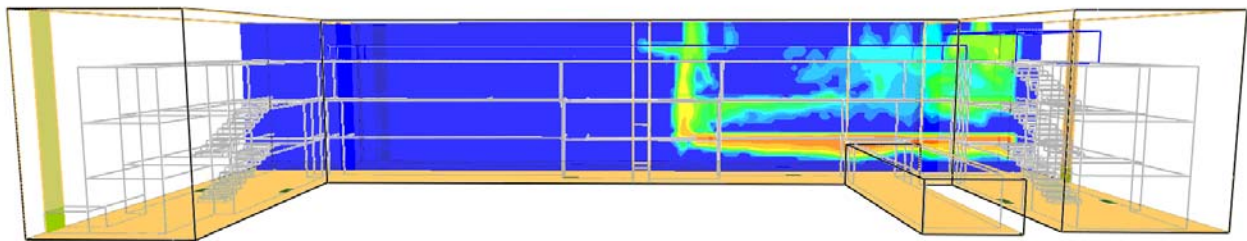


Abb. 1: Je komplexer ein Gebäude ist, umso wichtiger sind ingenieurmäßige Nachweise für Brandsimulationen, Tragwerkssimulationen unter Brandbeanspruchung und Personenstromanalysen.

Der im Mai 2006 in erster Auflage erschienene vfdb-Leitfaden soll die – für die Planung und Bewertung von Brandschutzmaßnahmen erforderlichen – ingenieurmäßigen Nachweise zusammenfassend beschreiben, Anwendungshilfen zur Verfügung stellen und Anwendungsgrenzen aufzeigen. Der Leitfaden behandelt sowohl die ingenieurmäßigen Nachweise für Brandsimulationen, Tragwerkssimulationen unter Brandbeanspruchung und Personenstromanalysen, als auch die ingenieurmäßige Ermittlung aller erforderlichen Eingangsdaten, wie die Erfassung des Gebäudes und seiner Geometrie, von Brandszenarien und Bemessungsbränden sowie der erforderlichen Schutzzielkriterien. Für Brandsimulationen werden im vfdb-Leitfaden die geeigneten mathematischen und physikalischen Modelle vorgestellt und beschrieben. Anhand typischer Anwendungsfälle und Vergleichsrechnungen werden Kriterien für die Modellbewertung vorgestellt.

Der vfdb-Leitfaden deckt über die Brand- bzw. Entrauchungssimulation hinaus, das gesamte Brandschutzingenieurwesen ab.

In den VDI-Richtlinien 6019 Blatt 1 und Blatt 2 (Entwurf) werden Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden beschrieben.

Im Blatt 1 der VDI 6019 werden konkrete Vorgaben für den Ansatz von Brandverlaufskurven (Brandszenarien) formuliert. Dabei werden auch Ereignisse, die Auswirkungen auf den Brandverlauf haben (wie z.B. Sprinklerung) miteinbezogen. In den Anwendungshilfen sind Sprinklerauslö-

sezeitpunkte – in Abhängigkeit von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit, der Auslösetemperatur und dem Trägheitsindex (RTI-Wert) der Sprinkler – tabelliert.

Im Blatt 2 der VDI 6019, das als Entwurf voraussichtlich im Sommer 2007 veröffentlicht wird, werden die unterschiedlichen Berechnungsnachweise sowie die Dimensionierung der Entrauchungsmaßnahmen mit Simulationsmodellen beschrieben. Auch hier werden Hilfen für die Anwendung gegeben und Anwendungsgrenzen der verschiedenen Modelltypen aufgezeigt.

Die VDI-Richtlinie 6019 behandelt ausschließlich ingenieurmäßige Verfahren zur Bemessung der Rauchableitung. Dabei werden jedoch – im Vergleich zum vfdb-Leitfaden – detailliertere Vorgaben hinsichtlich der Modellierung gegeben.

Die Angaben hinsichtlich der Brandverlaufskurven bzw. Bemessungsbrände in der Brandausbreitungsphase sind in beiden Leitlinien deckungsgleich dargestellt. In beiden Fällen werden die, aus der internationalen Literatur bekannten, t^2 -Ansätze für den Anstieg der Energiefreisetzungsrate vorgegeben.

Im vfdb-Leifaden werden – aus der internationalen Literatur zusammengestellt – maximale Energiefreisetzungsrate für gesprinkelte und ungesprinkelte Brandszenarien bei unterschiedlichen Nutzungen und Brandlasten tabelliert. Da die Angaben aus unterschiedlichen Quellen (Richtlinien und Experimenten) stammen, sind sie allerdings nicht immer eindeutig.

Brandentwicklung	α [kW/s ²]	t_g [s]
langsam	0,002931	600
mittel	0,011720	300
schnell	0,046890	150
sehr schnell	0,187600	75

Tabelle 1: Standardwerte für α und t_g nach vfdb-Leitfaden.

In der VDI-Richtlinie 6019 werden keine konkreten Vorgaben zur maximalen Energiefreisetzungsrate bei einem voll entwickelten Brand gegeben.

Die Entwicklung und Erarbeitung des vfdb-Leitfadens und der VDI-Richtlinie 6019 erfolgte zeitlich nahezu gleich, war jedoch weder personell noch inhaltlich aufeinander abgestimmt. Weder im vfdb-Leitfaden noch in den VDI Richtlinien existieren Verweise zum jeweils anderen Regelwerk.

Unterschiede zwischen den beiden Regelwerken sind insbesondere im Bereich der Schutzzieldefinition, insbesondere bei der Festlegung von Grenzwerten wie Mindestsichtweiten und Brandgaskonzentration erkennbar. Darüber hinaus fehlt in der VDI-Richtlinie 6019 ein generelles Sicherheitskonzept. Im vfdb-Leitfaden werden die Grundzüge eines globalen Sicherheitskonzeptes, welches alle Ereignisse mit Einfluss auf den Brandverlauf berücksichtigt, dargestellt.

Vorgehensweise vfdb-Leitfaden

Mit dem vfdb-Leitfaden sollen die für die Planung und Bewertung von Brandschutzmaßnahmen bedeutsamen ingenieurmäßigen Nachweise zusammenfassend beschrieben und ihre sachgerechte Anwendung erläutert werden. Die z. T. uneinheitlichen Vorgehensweisen und Annahmen bei der Anwendung ingenieurmäßiger Nachweise im Rahmen von Brandschutzkonzepten sollen harmonisiert werden.

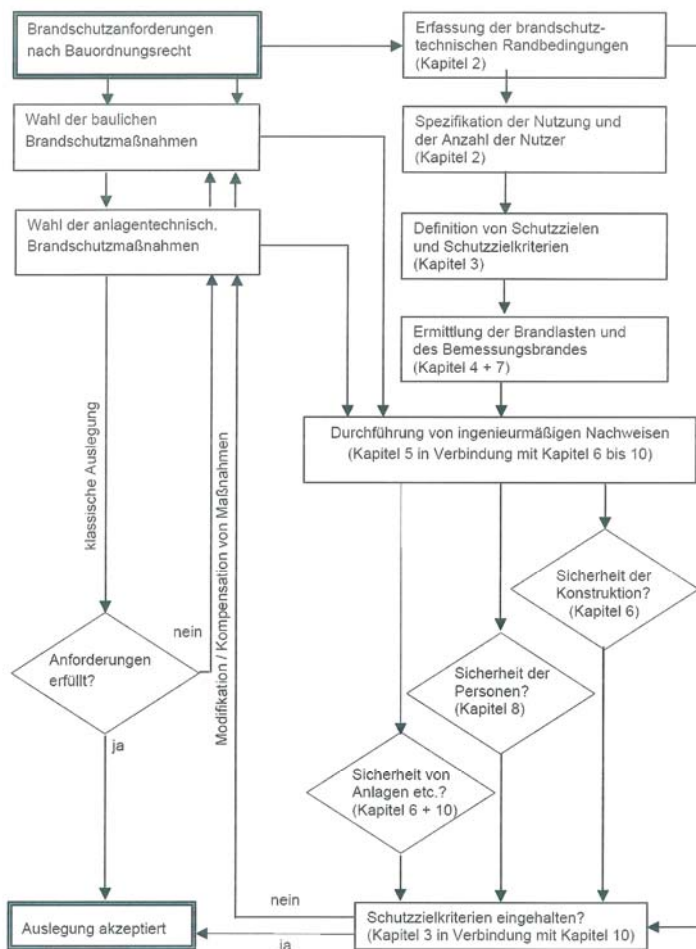


Abb. 2: Vorgehensweise für die Planung und Bewertung von Brandschutzmaßnahmen nach vfdb-Leitfaden.

Brandszenarien und Brandverlaufskurven sowie Brandphasen sind in Abb. 2 bis 5 und Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Zielsetzung der Brandmodellierung

- Berechnung von Temperaturen zur Beurteilung des Verhaltens von Bauteilen, Baustoffen und Gefährdung von Personen
- Simulation der Rauchausbreitung und Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen

Überblick über verfügbare Brandmodelltypen

- Empirisch belegte Ansätze
- Zonenmodelle
- Feldmodelle (CFD)
- Physikalische Modelle

Vorgehensweise

- Möglichst detaillierte Abbildung von Geometrie, Lage des Brandherds, Art der Ventilation und des Wandaufbaus
- Definition des Quellterms (ggf. Versuchsdaten, s. Brandszenario)
- Thermodynamische Daten erforderlich (Emissionszahl, Wärmeübergangswerte)

Plausibilitätskontrolle / Anwendungsgrenzen

Überprüfung z. B. anhand von Erfahrungen ähnlicher Aufgabenstellungen und des zeitlichen Verlaufs der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate / der Brandverlaufskurve (Abb 3.) von

- Temperaturverteilung,
- Rauchgasschichtentwicklung,
- Massenströmen.

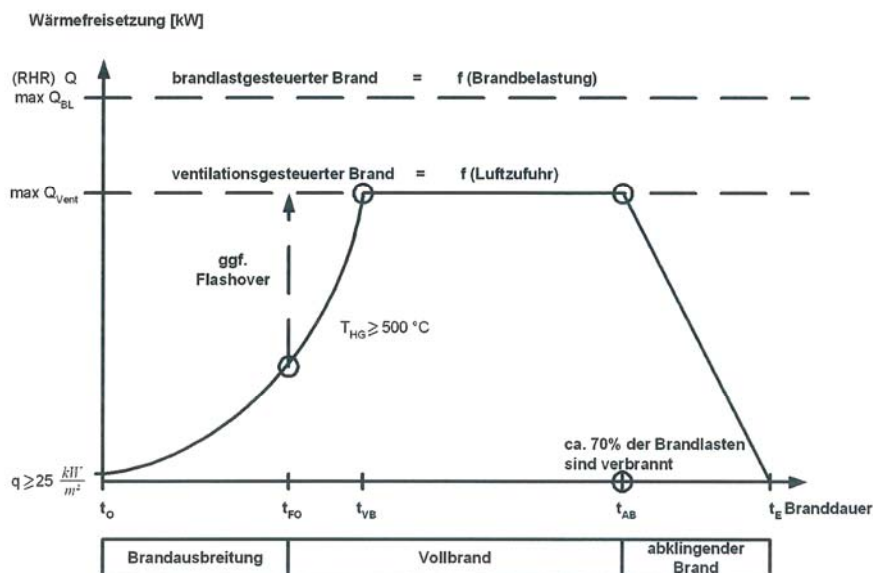


Abb. 3: Brandverlaufskurve / Wärmefreisetzungsrate.

Zusätzlich ist zu prüfen, ob

- die Ergebnisse aus der gewählten Modellanwendung tatsächlich anwendbar sind oder ob zusätzliche Betrachtungen erforderlich sind,
- der Anwendungsbereich des Modells eingehalten ist,
- das Rechenergebnis tatsächlich den ungünstigsten Fall, der für die Auslegung maßgebend ist, beschreibt..

Dokumentation (Nachvollziehbarkeit) der Eckdaten

- Benennung der Nutzung und der vorhandenen Brandlasten,
- Ableitung, bzw. Begründung der daraus folgenden Brandverläufe und deren Darstellung, Angabe von unmittelbar anwendbaren Grundlagen (Normen, Experimente),
- Angaben zur untersuchten Geometrie, Beschreibung ggf. vorgenommener Vereinfachungen,
- Benennung wesentlicher Quelldaten bei Berechnung der,
- Beschreibung und Begründung der untersuchten Szenarien,
- Angabe und Begründung des eingesetzten Simulationsmodells,
- Darstellung der Ergebnisse,
- Konkretisierung der Auslegungsmaßnahmen.

Sicherheitskonzept

In der Praxis werden Ingenieurmethoden ohne Sicherheitskonzept deterministisch angewendet. Dabei werden folgende Einflüsse vernachlässigt:

- Streuung der Modellgrößen,
- Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen,
- Unsicherheiten der verwendeten Modelle.

Für unterschiedliche Zielversagenswahrscheinlichkeiten p lassen sich schutzzielbezogen Risikoklassen definieren:

- Risikoklasse 1 (geringes Risiko): Sekundärtragwerk $p = 10^{-5}$
- Risikoklasse 2 (mittleres Risiko): Haupttragwerk $p = 10^{-6}$
- Risikoklasse 3 (erhöhtes Risiko): Personenschutz $p = 10^{-7}$

Durch Sicherheitsbeiwerte lässt sich der Brandverlauf in Abhängigkeit von Funktion und Ausfall der anlagentechnischen und abwehrenden Komponenten festlegen (Abb. 4).

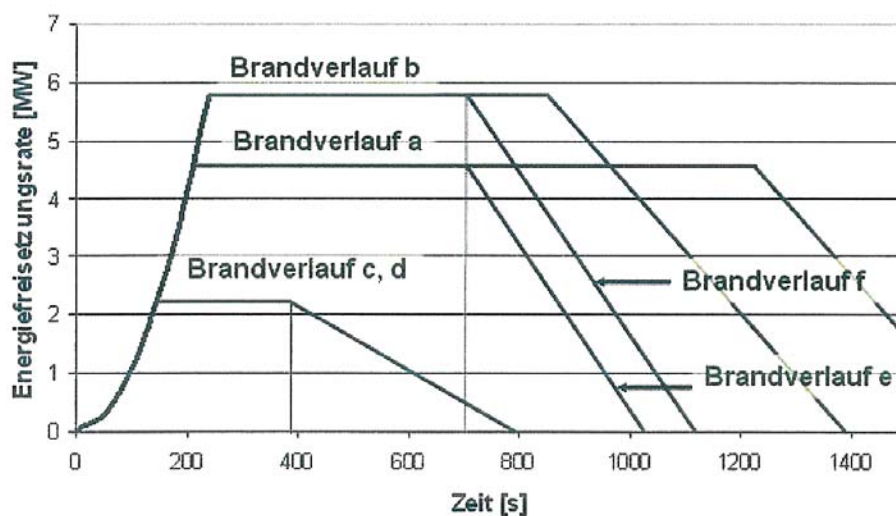


Abb. 4: Sicherheitsbeiwerte für den Brandverlauf in Abhängigkeit von Funktion und Ausfall der anlagentechnischen und abwehrenden Komponenten nach vfdb-Leitfaden.

Konkretisierung der Schutzziele

Für eine mittlere Aufenthaltsdauer von ca. 15 min (Rettungsfrist) gelten u. a. folgende quantitativen Schutzziele (Grenzwerte) (Abb.5):

- CO-Konzentration 200 ppm
- CO₂-Konzentration 2 Vol%
- Wärmestrahlung 2,0 kW/m²
- Gastemperatur 50°C
- Sichtweite 10-20 m.

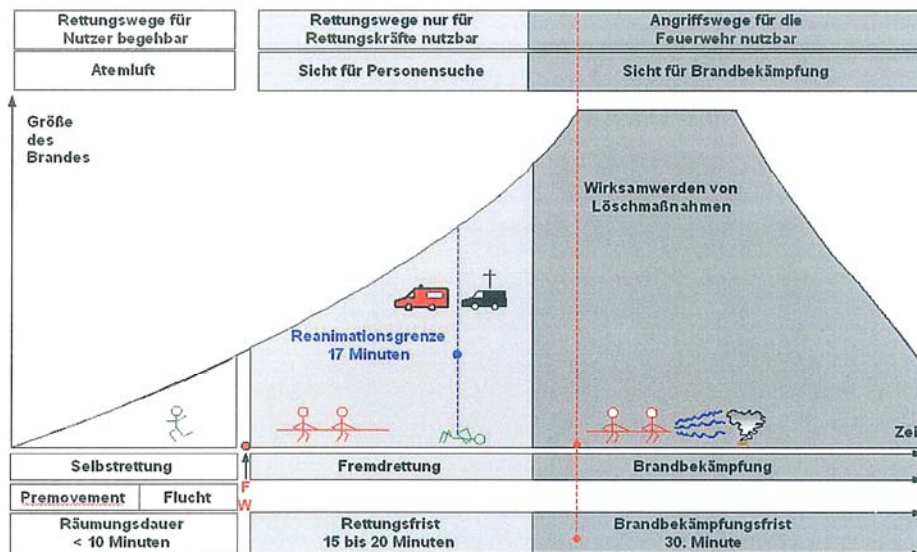


Abb. 5: Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege und Bedingungen für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall nach vfdb-Leitfaden.

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandlast MJ/m ²	Heizwert MJ/kg ¹¹	Brandentwicklung	Q = f(A) kW/m ² ¹²	Q _{max} MW ¹³	Quelle
Wohnraum		780 / 948	19,5	300	300 ¹¹	4 - 6	[4.62]
Büroraum	ohne Sprinkler	420 / 511	20,5	300	250	2,25	[4.44]
Krankenzimmer	2 Betten	230 / 280	22,5	300	250	ca. 4	[4.62]
Hotelzimmer	2 Betten, Möbel aus Holzspantafeln	310 / 377		300 [4.7]	250 [4.4]	2,5	[4.4]
Klassenzimmer - Schule	Möbel aus Holz, Sitze aus Formsperrholz	285 / 347	18,2	300	150 ¹¹	3,5	[4.62]
Zuschauersaal	Theater / Kino	300 / 365		450 ¹¹	250 ¹¹		
Hörsaal	Sitze aus Formsperrholz, Kleidung und Taschen	140	25	1.200	230		[4.62]
Eingangshalle	Empfangstresen, Möbel mit geringer Polsterung	400	19,2	450	240		[4.62]
Bücherei	mit Metallregalen	1.500 / 1.824	18,4	450 ¹³	200 ¹¹ - 500		
Einkaufszentrum	nicht spezifiziert	600 / 730	19 - 23	150 - 300 ¹¹	250 - 500 [4.62]	6,0	
Drogeriemarkt	geringe Anteile brennbarer Flüssigkeiten	760	28 - 32	200	300	15,0	[4.62]

Tabelle 2: Kennwerte für Quellterme verschiedener Nutzungen (Auszug) nach vfdb-Leitfaden.

Vorgehensweise VDI 6019

Mit Hilfe der beiden Richtlinien VDI 6019 Blatt 1 und Blatt 2 (Entwurf) ist es zukünftig möglich, speziell Entrauchungssysteme mit Brandschutzingenieurmethoden einheitlich zu bemessen. Blatt 1 behandelt die Bemessung von Brandverlaufskurven, Blatt 2 die Bemessung mit Ingenieurverfahren.

Brandszenarien und Brandverlaufskurven sind in Abb. 6 bis 9 und Tabelle 3 und 4 dargestellt.

Zielsetzung der Brandmodellierung

In der zukünftigen Richtlinie VDI 6019 Blatt 2 Entwurf werden folgende Ingenieurmethoden zur Bemessung von Entrauchungssystemen behandelt:

- Analytisches Verfahren (Handkalkulationsverfahren)
- Zonenmodelle
- CFD-basierte Brandsimulationsmodelle
- Modellversuche im verkleinerten Maßstab.

Brandphase	Wärmefreisetzungsrate	Brandfläche	Zeitintervall
Phase 1: Brandentstehungsphase	$\dot{Q}(\tau_1) = 0,333 \cdot \tau_1$ $\dot{Q}(\tau_1) = 100 \text{ kW}$	$A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$ $A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$	$0 \leq \tau_1 \leq 300 \text{ s}$ $300 \text{ s} < \tau_1 \leq \tau_i$ $i = 4, 5$ $\tau_1 = t$
Phase 2: Fortentwickelter Brand	$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q}_l \cdot (A(\tau_2))$	$A(\tau_2) = (v \cdot \tau_2)^2$	$0 < \tau_2 \leq t_i$ $i = 3, 4, 5$ $\tau_2 = t$
Phase 3: Konstante Brandphase	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.}$	$A(\tau_3) = A(t_3) = \text{const.}$	$t_3 < \tau_3 \leq t_i$ $i = 4, 5$ $\tau_3 = t - t_3$
Phase 4a: Kontrollierter Brand durch Sprinklerauslösung	$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot e^{-0,0025 \cdot (\tau_4)}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Phase 4b: Kontrollierter Brand durch Aktivierung einer anderen automatischen Löschanlage	$\dot{Q}(\tau_5) = \dot{Q}(t_5) = \text{const.}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Phase 5: Abklingender Brand durch manuelle Brandbekämpfung	–	–	t_5

Tabelle 3: Grundlagen der Bemessung nach VDI 6019.

Vorgehensweise

Für die einzelnen Methoden werden Randbedingungen und Anwendungsgrenzen formuliert. Darüber hinaus werden Empfehlungen bei der Anwendung komplexer Rechenverfahren an die Hand gegeben.

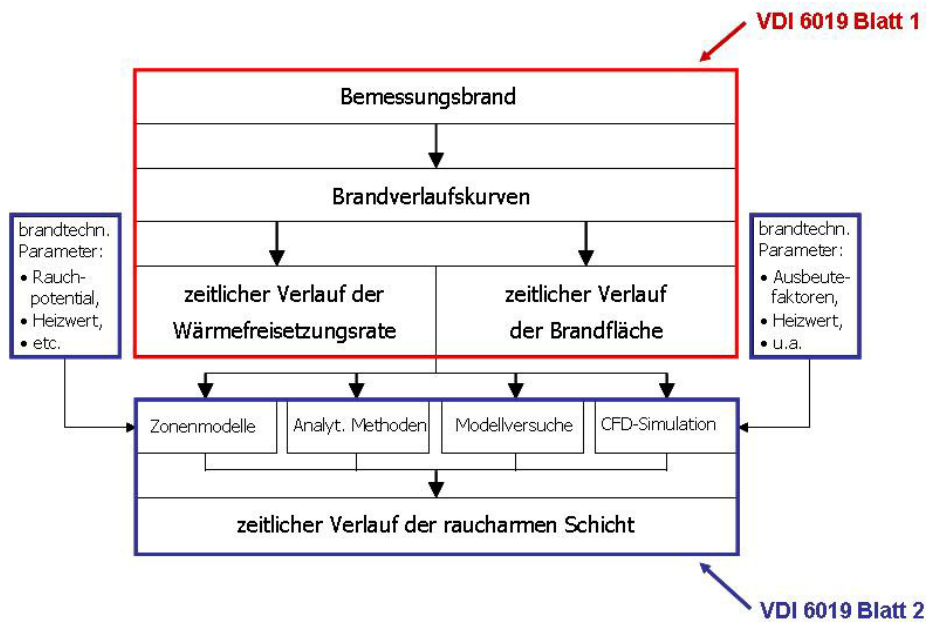


Abb. 6: Vorgehensweise für die Planung und Bewertung von Brandschutzmaßnahmen nach VDI 6019.

Plausibilitätskontrolle / Anwendungsgrenzen

Handkalkulationsverfahren

Für Entrauchungssysteme in geometrisch einfachen Räumen (z. B. Industriehallen, Eingangshallen) kann das Handkalkulationsverfahren als vereinfachtes Bemessungsverfahren zur Anwendung kommen.

Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,0047 \text{ kW/s}^2$							
Ansprech-Klasse		Schnell	Spezial		Standard A		
Trägheitsindex in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$		$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$	
Höhe: 3,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	125	140	150	165	175
		68	145	155	170	185	195
		79	165	175	185	200	215
		93	185	195	205	220	235
		141	245	255	270	285	300
		182	295	305	315	335	350
Höhe: 4,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	145	155	165	180	190
		68	165	175	185	200	215
		79	185	195	205	220	235
		93	210	220	230	245	360
		141	285	290	305	320	330
		182	340	350	360	375	390
Höhe: 6,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	175	185	195	300	220
		68	205	210	225	235	250
		79	230	240	250	265	275
		93	260	270	280	295	305
		141	355	365	375	390	400
		182	430	440	450	460	475
Höhe: 8,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	210	220	230	240	255
		68	245	250	260	275	285
		79	275	285	295	305	320
		93	315	320	330	345	255
		141	435	440	450	450	475
		182	525	535	540	555	565
Höhe: 10,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	245	250	260	275	285
		68	285	295	300	315	325
		79	325	330	340	355	365
		93	370	380	385	400	410
		141	515	520	530	540	550
		182	625	630	640	650	660

Tabelle 4: Sprinklerauslösezeiten t_4 (beispielhaft für $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$) nach VDI 6019.

Zonenmodelle

Voraussetzungen für risikogerechte Dimensionierung der Entrauchungsanlage mit Zonenmodellen (u. a.):

- Raumgeometrie muss ausreichende Ähnlichkeit aufweisen
- Plume muss ungestört aufsteigen können
- Ausbildung von Heißgas- und Kaltgasschicht muss möglich sein
- Windeinflüsse wirken nicht negativ

In einem vorgefertigten Formular, welches dem Entrauchungskonzept beizufügen ist, werden die relevanten Randbedingungen der Simulation sowie spezifische Teilmodelle (z.B. Plume-Modell) eingetragen.

CFD-basierte Brandsimulationsmodelle

Aufgrund der Komplexität und der unterschiedlichen Softwareprodukte (Brandsimulationsmodelle, Universal-Produkte) sind Vorgaben von Anwendungsgrenzen schwierig. Es werden Empfehlungen in Bezug auf die max. Zellengröße gemacht, die Verwendung geeigneter Turbulenzmodelle ist Pflicht. Auf die Anwendung verschiedener Methoden zur Brandherdmodellierung wird hingewiesen. Randbedingungen und Teilmodelle sind ebenfalls in einem Formular zu dokumentieren.

Sicherheitskonzept

In VDI 6019 ist kein transparentes Sicherheitskonzept implementiert, für spezielle Entrauchungssysteme sind gesonderte Szenarien zu untersuchen (z.B. niedrigenergetischer Brand), bei der Aufstellung von Brandverlaufskurven sind konservative Parameter anzusetzen.

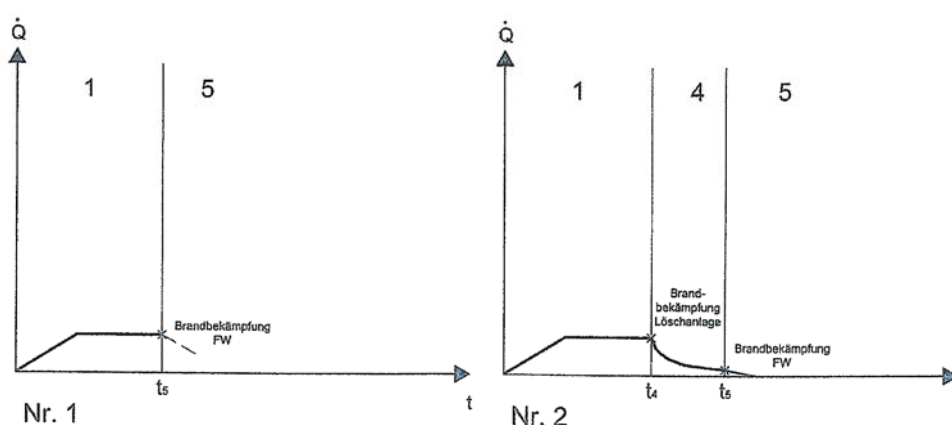


Abb. 7: Niederenergetische Brände – max. Gesamt-Wärmefreisetzungsrate: 100 kW nach $t = 5$ min.

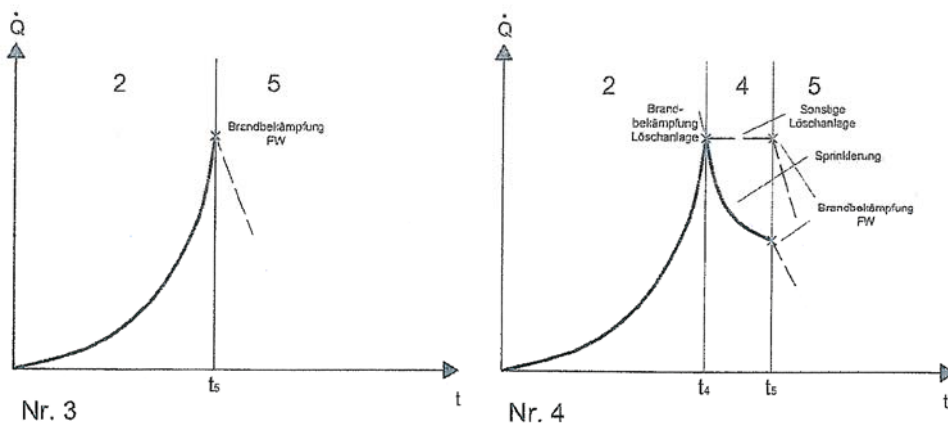


Abb. 8: Hochenergetische Brände mit und ohne Löschanlage.

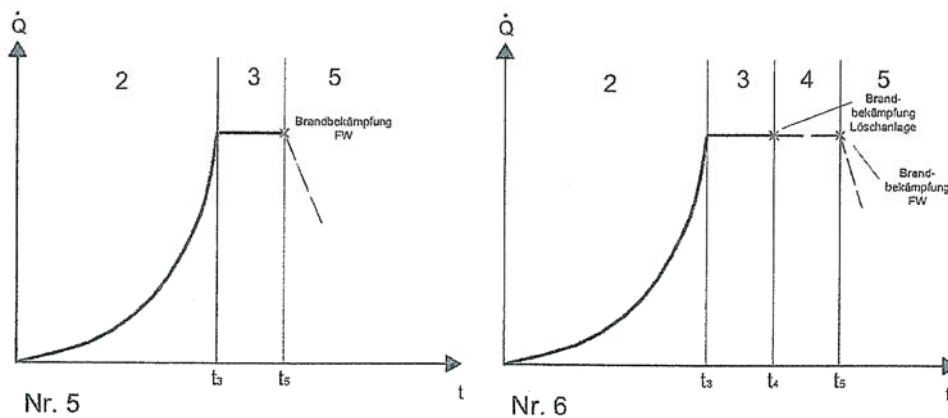


Abb. 9: Hochenergetische Brände mit Plateau; mit und ohne Löschanlage.

Konkretisierung der Schutzziele

Bei der Bemessung von Entrauchungssystemen wurden folgende Grenzkriterien bei der Beschreibung der raucharmen Schicht definiert, die es einzuhalten gilt:

- operative Temperatur (Lufttemperatur und Strahlungseinfluss) < 70°C
- ausreichende Sichtweite, die das Erkennen von Rettungszeichen ermöglicht
- Sichtweite muss mindestens der vorhandenen Rettungsweglänge entsprechen

Auf die Vorgabe von Grenzwerten oder Verfahren zur Bestimmung der Fluchtunfähigkeit (z.B. ISO/TC 13571) in Folge von narkotisch und reizend wirkenden Rauchgaskomponenten wurde verzichtet, da i.d.R. bei großen Räumen das Kriterium der Mindestsichtweite zuerst greift.

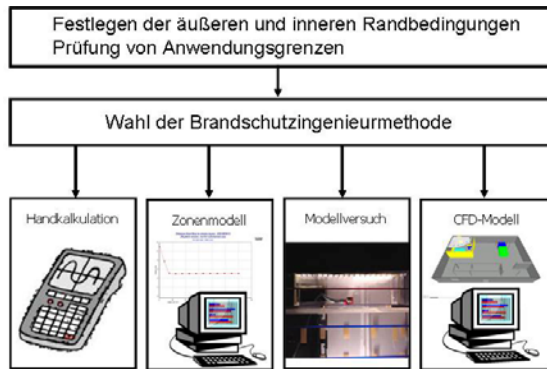


Abb. 10: Vorgehensweise nach VDI 6019.

Fazit

Der vfdb-Leitfaden umfasst das gesamte Brandschutzingenieurwesen mit seinen unterschiedlichen Ingenieurverfahren (Entrauchung, Entfluchtung, Tragwerksbemessung für den Brandfall, Brandsimulation). Dabei werden zu den jeweiligen Themenbereichen Rahmenbedingungen und Hilfestellungen in Form von allgemeinen Lösungsansätzen diskutiert. Das Thema Entrauchung wird sehr detailliert durch die beiden neuen VDI-Richtlinien VDI 6019 Blatt 1 und Blatt 2 Entwurf behandelt. Die Grundlagen für die Ermittlung von Brandverlaufskurven basieren auf denselben Grundlagen, wobei in VDI 6019 Blatt 1 die Sprinklerwirkung auf die Brandverlaufphase intensiv beschrieben ist.

Unterschiede zwischen den beiden Leitlinien sind erkennbar im Bereich der Schutzzieldefinition, speziell bei der Festlegung von Grenzwerten wie Mindestsichtweiten und Rußkonzentrationen. Darüber hinaus fehlt ein allgemeines Sicherheitskonzept. Im vfdb-Leitfaden werden die Grundzüge eines globalen Sicherheitskonzeptes, welches alle Ereignisse mit Einfluss auf den Brandverlauf berücksichtigt, dargestellt.

Prinzipiell ist festzustellen, dass sowohl der vfdb-Leitfaden als auch die beiden neuen VDI-Richtlinien eine sinnvolle Arbeitsgrundlage für den Brandschutzingenieur darstellen, die sich insbesondere im Themenbereich Entrauchung sehr gut ergänzen.

Literatur

/1/ Hosser, D. (Hrsg.): vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. vfdb TB 04/01, 1. Auflage Mai 2006

/2/ VDI Richtlinie 6019. Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Blatt 1, Mai 2006 und Blatt 2 (Entwurf)

/3/ Paschen, C.: Zur Bemessung von Entrauchungssystemen in Gebäuden – Anwendung der Richtlinien VDI 6019 Blatt 1 und 2 (Entwurf), VDI Berichte 1909, S. 91-106, VDI Verlag Düsseldorf, 2006