

**Bewertung von neuen  
Sicherheitsfaktoren zur Ermittlung  
der Brandlastdichte im Zuge der  
Novellierung von EN 1991-1-2 Anhang E**

**T 3374**

T 3374

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0484-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



# Forschungsvorhaben Nr. P 52-5-4.206-2035/19

---

*Bewertung von neuen Sicherheitsfaktoren zur Ermittlung der Brandlastdichte im Zuge der Novellierung von EN 1991-1-2 Anhang E*

**Datum:** 18.11.2019

**Auftraggeber:** Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30 B  
10829 Berlin

**Bericht:** Abschlussbericht

**Bearbeiter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß  
Lukas Gößwein, M. Sc.  
Lisa Sander, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Patrick Meyer, M. Sc.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Anlass und Zielsetzung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Verwendete Unterlagen</b> .....	<b>6</b>
2.1	Fachbücher und Publikationen .....	6
2.2	Normen .....	8
2.3	Programme .....	9
<b>3</b>	<b>Sicherheitskonzept nach EN 1991-1-2 Anhang E</b> .....	<b>10</b>
3.1	Vorbemerkung .....	10
3.2	Neuerungen im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E .....	12
3.3	Bewertungsgrundlagen (Hintergrunddokumente) .....	14
3.4	Berechnung der Sicherheitsfaktoren .....	15
3.5	Überprüfung der Angaben zu den Brandlasten .....	24
3.6	Vergleich zum Sicherheitskonzept DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB.....	31
3.7	Vergleich der Sicherheitskonzepte .....	34
3.8	Auswahl der charakteristischen Brandlastdichte.....	41
<b>4</b>	<b>Systematische Vergleichsrechnungen</b> .....	<b>43</b>
4.1	Vorbemerkung .....	43
4.2	Zusammenstellung der Konfigurationen .....	43
4.3	Berechnung der Brandeinwirkung .....	46
4.4	Vergleichsrechnungen anhand von Praxisbeispielen .....	49
4.4.1	Allgemeines .....	49
4.4.2	Vergleichsrechnung mit den Stahl- und Verbundbauteilen .....	50
4.4.3	Vergleichsrechnung mit den Stahlbetonbauteilen.....	57
4.4.4	Vergleichsrechnung mit den Holzbauteilen.....	63
4.5	Fazit der Vergleichsberechnungen.....	70
<b>5</b>	<b>Gesamtbewertung der Novellierung</b> .....	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>74</b>



## 1 Anlass und Zielsetzung

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragte das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig und das Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover mit der Durchführung des Forschungsvorhabens „*Bewertung von neuen Sicherheitsfaktoren zur Ermittlung der Brandlastdichte im Zuge der Novellierung von EN 1991-1-2 Anhang E*“. Ziel des Forschungsvorhabens ist der Vergleich und die Bewertung des neuen Sicherheitskonzeptes gemäß EN 1991-1-2 Anhang E [1] im Vergleich zum deutschen Sicherheitskonzept gemäß dem Nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31].

In DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] ist aktuell ein Sicherheitskonzept enthalten, das die Berechnung von Brandlastdichten als Bemessungswert ermöglicht. Das in Anhang E beschriebene Verfahren basiert auf den Betrachtungen von Schleich et al. [10] - [12] und findet insbesondere bei der leistungsorientierten Brandschutzbemessung Anwendung. Das Verfahren des Anhangs E in [30] ist wie in den meisten europäischen Ländern auch in Deutschland nicht zugelassen. Dieses Verfahren wird in Deutschland durch Regelungen des Nationalen Anhangs (Anhang BB) ersetzt. Wesentliche Gründe für die Entwicklung eines alternativen deutschen Sicherheitskonzeptes im Nationalen Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] sind die Ableitungen der Sicherheitsfaktoren in Anhang E. Im Verfahren des Anhangs E der DIN EN 1991-1-2 [30] werden zehn Sicherheitsfaktoren für Sicherheitsmaßnahmen (wie beispielsweise Löschmaßnahmen, Feuerwehr, etc.) sowie in Abhängigkeit der Größe und Art der Nutzung bestimmt. Neben der Intransparenz und der Vielzahl der Faktoren erfolgt eine Multiplikation von Sicherheitsfaktoren für Maßnahmen, die nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Dies ist sicherheitstheoretisch und mathematisch nicht korrekt. Weiterhin werden die Sicherheitsfaktoren lediglich für die Berechnung der Brandlastdichte berücksichtigt und nicht bei der Berechnung der Wärme-freisetzungsrates, die insbesondere bei Bauteilen mit geringem Feuerwiderstand maßgeblich ist.

Im Rahmen der Überarbeitung der EN 1991-1-2 [1] wurde in CEN TC 250/SC1/WG4 eine Modifikation des Sicherheitskonzeptes im Anhang E vorgeschlagen, mit dem ähnlich zum deutschen Sicherheitskonzept ein Bezug zu den Zuverlässigkeitsklassen gemäß DIN EN 1990 [28] berücksichtigt werden soll. Hierfür wird ein weiterer Sicherheitsfaktor zur Bestimmung der Bemessungsbrandlastdichte eingeführt. Die Brandlastdichte kann durch eine nutzungsspezifische Brandlastermittlung erfasst oder durch die Berücksichtigung der national festgeschriebenen Brandlastklassifizierung bestimmt werden. Nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] werden Brandlastdichten  $q_{f,k}$  als Mittelwert und 80 %-Quantil in Abhängigkeit verschiedener Nutzungen definiert.



Gemäß DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] kann die Brandlastdichte als Bemessungswert  $q_{f,d}$  unter Berücksichtigung folgender Faktoren ermittelt werden:

- Brandabschnittsgröße,
- Art und Nutzung des betrachteten Raumes,
- Abbrandfaktor der vorliegenden Brandlasten,
- Brandbekämpfungsmaßnahmen z. B. Eingriff der Feuerwehr, brandschutztechnische Gebäudeausstattung (Brandmeldeanlage (BMA), Sprinkler).

Zur Berücksichtigung der Einflüsse werden Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  und  $\delta_n$  definiert, die sich in Abhängigkeit der Nutzung ändern. Die Multiplikation der Sicherheitsfaktoren mit der charakteristischen Brandlastdichte ermöglicht die Berechnung der Bemessungsbrandlastdichte. Sie wird zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate, die einem Bemessungsbrand zu Grunde liegt, angewendet. Zusätzlich sieht die Erweiterung des Anhangs E im Entwurf der EN 1991-1-2 [1] einen weiteren probabilistischen Faktor  $\delta_{Q1}$  vor, der als multiplikativer Faktor auf die charakteristische Wärmefreisetzungsrate  $Q_{f,k}$  angewendet werden soll. Als Vorschlag wird der Faktor  $\delta_{Q1}$  mit 1,0 angesetzt unter der Voraussetzung, dass keine Kenntnisse über die statistische Verteilung der Wärmefreisetzungsrate vorliegen oder keine bauaufsichtliche Vorgabe eines anderen Wertes für  $\delta_{Q1}$  vorliegt.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen die Änderungen und Ergänzungen im Sicherheitskonzept, die künftig im Anhang E zur DIN EN 1991-1-2 [30] ergänzend aufgeführt sein sollen, systematisch untersucht und hinsichtlich der Anwendbarkeit bewertet werden. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Anhangs E zur DIN EN 1991-1-2 [30] besteht darin, dass das bewährte Sicherheitsniveau in Deutschland gewährleistet werden muss, das aktuell durch das Verfahren im Nationalen Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2 [31] festgelegt ist. Diese Überprüfung erfolgt in diesem Forschungsvorhaben. In diesem Zusammenhang wird auch überprüft, ob beispielsweise durch eine national spezifische Festlegung der Sicherheitsbeiwerte die oben beschriebenen Grundprobleme des Sicherheitskonzeptes behoben werden können.

Hierfür soll mithilfe von Vergleichsrechnungen an repräsentativen Bemessungsbeispielen mit dem nationalen Sicherheitskonzept eine Bewertung des Anhangs E vorgenommen werden. Die getroffenen Vereinfachungen und die Bestimmung der Werte der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$ ,  $\delta_n$  und  $\delta_{Q1}$  sollen überprüft und bewertet werden. In dem Zusammenhang sollen die Brandlasten genauer betrachtet werden. Anschließend soll die Zuverlässigkeit und das Sicherheitsniveau des Verfahrens anhand von typischen, praxisnahen Beispielen für verschiedene Nutzungen und Bauteile unter Brandeinwirkung überprüft werden. Die Berechnungen erfolgen sowohl für das



Sicherheitskonzept nach Anhang E des Entwurfes der EN 1991-1-2 [30] sowie nach dem deutschen Nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31].

Zudem werden die Hintergrunddokumente [2] bis [8], auf deren Grundlage die Modifikation des Anhang E erfolgte, gesichtet und geprüft. Die Aufbereitung der Brandlastdichten und die Vergleichsbetrachtungen in Bezug auf das Sicherheitsniveau in Deutschland erlauben eine Aussage über mögliche Unsicherheiten der vorgeschlagenen Sicherheitsfaktoren. Die systematische Überprüfung soll sicherstellen, dass das bisherige Sicherheitsniveau in Deutschland beibehalten wird. Ferner soll die Anwendbarkeit der neuen Ansätze allumfassend bewertet werden.

Der vorliegende Bericht gliedert sich in sechs Kapitel. In Kapitel 1 werden Anlass und Zielsetzung beschrieben, in Kapitel 2 werden die verwendeten Unterlagen aufgelistet. Das Kapitel 3 des Berichts enthält die Ergebnisse des Sichtens und Bewertens der Grundlagen der im Zuge der Novellierung der EN 1991-1-2 Anhang E [30] neu ergänzenden Sicherheitsfaktoren und geänderten Brandlastdichten. Es werden die Ergebnisse der Nachrechnung der neuen Sicherheitsfaktoren gezeigt. Ferner wird ein Vergleich der Sicherheitskonzepte des Entwurfes der EN 1991-1-2 Anhang E [30] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] vorgenommen. Das Kapitel 4 beinhaltet die Vergleichsrechnungen für ausgewählte Bauteile und Nutzungen gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und der DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31]. Eine Gesamtbewertung des Entwurfes der EN 1991-1-2 Anhang E [1] wird auf Basis der Vergleichsberechnungen in Kapitel 5 vorgenommen. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammengefasst und Empfehlungen für die Anwendung des neuen Anhang E gegeben.



## 2 Verwendete Unterlagen

### 2.1 Fachbücher und Publikationen

- [1] New Draft of EN 1991-1-2:CEN-TC250-SC1-WG4\_N0035\_CENTC\_250SC\_1\_N\_1049\_-\_SC1T1\_\_Final\_Draft\_EN\_1991-1-2\_Fire\_Actions\_April\_2018, Stand April 2018.
- [2] SC1.T1\_FIN\_BGD\_EN1991\_1\_2\_Background of Modif AnnexE\_AEAI, Rapport relatif à la note explicative de protection incendie, Evaluation en vue de la détermination de la grandeur des compartiments coupe-feu (unveröffentlicht).
- [3] SC1.T1\_FIN\_BGD\_EN1991\_1\_2\_Background of Modif AnnexE\_AEAI\_2, Brandschutzerläuterung, Bewertung Brandabschnittsgrößen: Sicherheitsnachweis bei industriellen und gewerblichen Nutzungen - Berechnungsverfahren -, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, 2007.
- [4] Klein, J.: Zum Verhalten von Tragwerken bei natürlicher Brandeinwirkung unter Berücksichtigung technischer Maßnahmen. Dissertation. Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, Februar 2009.
- [5] Köhler, J., Klein, J., Fontana, M.: Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie- und Gewerbebauten. Ernst und Sohn Verlag, Bauphysik, Heft 6, S.360-367, Berlin, 2006. DOI: 10.1002/bapi.200610038
- [6] SC1.T1\_FIN\_BGD\_EN1991\_1\_2\_Background of Modif AnnexE\_NFSC - Consequence Classes, Hanus, F., Thauvoye, C.: Exceldatei, Stand 2017 (unveröffentlicht).
- [7] Kumar, S., Kameswara Rao C.V.S: Fire Loads in Office Building. Journal of Structural Engineering, March 1997, 123(3): 365-368.
- [8] SC1.T1\_FIN\_BGD\_EN1991\_1\_2\_NDPs\_Ease\_of\_Use (unveröffentlicht).
- [9] Cajot L.-G., Schleich, J.-B.: Global fire safety concept for buildings, IABSE reports, Rapports AIPC, IVBH Bericht, 1997.
- [10] Schleich, J.-B. et al.: Projekt zur Verbreitung der Forschungsergebnisse: Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand. Research and Technology. 2001.
- [11] Schleich J.-B., Cajot L.-G., et al.: Competitive steel buildings through natural fire safety concept. ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, B-D-EF-I-L-NL-UK & ECCS, 1994-98, Draft Final Report - Parts 1 to 5, July 2000.
- [12] Schleich J.-B., Cajot L.-G., et al.: Valorisation project – Natural fire safety concept. Final report. European Commission EUR 20349 EN, European Communities, 2002.
- [13] Schleich, J.-B. et al.: Natural fire safety concept- Full-scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool. Final Report EUR 20580 EN, European Commission, Technical steel research, Brussels, 2003.





- [14] Hosser, D.; Weilert, A.; Klinzmann, C.; Schnetgöke, R.; Albrecht, C.: Erarbeitung eines Sicherheitskonzepts für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung). Abschlussbericht. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, November 2008.
- [15] Schaumann, P.; Sothmann, J.; Hosser, D.; Albrecht, C.: Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung- Erprobung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau. Abschlussbericht, bauforumstahl e.V. Forschungsvorhaben, 2010.
- [16] Voigt, J.: Beitrag zur Bestimmung der Tragfähigkeit bestehender Stahlbetonbaukonstruktionen auf Grundlage der Systemzuverlässigkeit. Dissertation, Universität Siegen, 2014.
- [17] SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein), BVD (Brand-Verhütungsdienst für Industrie und Gewerbe), VKF (Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen): Brandrisikobewertung Berechnungsverfahren (Kurzform: SIA-Dokumentation 81), 1984.
- [18] Thomas, P. H.: Design Guide - Structural Fire Safety (Workshop CIB W14), 1986.
- [19] Commissie Research Staalconstructies: Brandveiligheid Staalconstructies, Centrum Bouwen in Staal, 1966.
- [20] Baldwin, R., Law, M., Alle, G., Griffiths, L. G.: Survey of fire-loads in modern office buildings - some preliminary results, Fire Research Note No. 808, 1970.
- [21] Nilsson, L.: Brandbelastning i boastadslägenheter (Fire loads in flats), National Swedish Building Research, 1970.
- [22] Forsberg, U., Jörgen, T.: Brandbelastningsstatistik för Skolor och Hotell, Stalbyggnadsinstitutet, Rapport 44:1, 1971.
- [23] Bryl, S.: Brandbelastung im Hochbau, Schweizerische Bauzeitung, 93, Heft 17, 1974.
- [24] Bryl, S.: Brandsicherheit im Stahlbau - Teil III: Brandbelastung in Bürogebäuden, Europäische Konvention für Stahlbau, 1975.
- [25] Petterson, O., Magnusson, S.-E., Thor, J.: Fire Engineering Design of Steel Structures, Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- [26] BSI Standard 96/540493, The use of Fire Safety Engineering in Buildings.
- [27] Schaumann, P., Kleibömer, I.: Brandschutztechnische Bemessung von Stahl- und Verbundkonstruktionen. Stahlbaukalender 2014, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2014, S. 333-411.



## 2.2 Normen

- [28] DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung, Dezember 2010
- [29] DIN EN 1991-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.
- [30] DIN EN 1991-1-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [31] DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Beuth Verlag GmbH, September 2015.
- [32] EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [33] DIN EN 1992-1-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [34] DIN EN 1993-1-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [35] DIN EN 1993-1-2/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [36] DIN EN 1994-1-2: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1994-1-2:2005 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [37] DIN EN 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauteilen - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [38] DIN EN 1995-1-2: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2: 2004 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [39] DS/ EN 1991-1-2 DK NA: 2014, National Annex to Eurocode 1 Actions on structures, Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire, Dansk Standard, 2014.
- [40] DIN 18230: Baulicher Brandschutz im Industriebau- Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. DIN V18230-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995.



- [41] DIN 1363-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Beuth Verlag GmbH, Oktober 2012.
- [42] prEN 1990: 2019 Eurocode – Basis of structural and geotechnical design, Stand April 2019.

### **2.3 Programme**

- [43] FRANSSEN J.-M.: SAFIR. A Thermal/ Structural Program Modelling Structures under Fire. Engineering Journal, A.I.S.C., Vol 42, No. 3, pp. 143-158, 2015 <http://hdl.handle.net/2268/2928>.
- [44] InfoGraph Software für die Tragwerksplanung: InfoCAD 19.
- [45] Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST); Version 7.2.1.



## 3 Sicherheitskonzept nach EN 1991-1-2 Anhang E

### 3.1 Vorbemerkung

In DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] ist aktuell ein Sicherheitskonzept beschrieben, das die Berechnung von Brandlastendichten als Bemessungswert ermöglicht. Das beschriebene Verfahren basiert auf den Betrachtungen von Schleich [10 - 12]. Das Verfahren ist wie in den meisten europäischen Ländern auch in Deutschland nicht zugelassen und wird durch die nationalen Regelungen (wie den nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2/NA [31]) ersetzt. Wesentliche Gründe für die Entwicklung eines alternativen deutschen Sicherheitskonzepts im Nationalen Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] sind die Ableitungen der Sicherheitsfaktoren in Anhang E. Im Verfahren des Anhang E der DIN EN 1991-1-2 [30] werden zehn Sicherheitsfaktoren für Sicherheitsmaßnahmen (wie beispielsweise Löschmaßnahmen, Feuerwehr, etc.) sowie in Abhängigkeit der Größe und Art der Nutzung bestimmt. Im Folgenden wird das Verfahren in Anhang E zur Berechnung des Bemessungswerts der Brandlastdichten unter Anwendung des Sicherheitskonzeptes gemäß DIN EN 1991-1-2 [30] kurz vorgestellt.

Als Brandlasten werden alle brennbaren Stoffe des Brandraumes, der Nutzungseinheit oder des Gebäudes, die zur gesamten Verbrennungswärme beitragen, bezeichnet. Die charakteristische Brandlast kann gemäß der Angaben der DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] in Abhängigkeit der Menge der brennbaren Stoffe, der Netto-Verbrennungswärme und unter Berücksichtigung der Lagerung (geschützt oder ungeschützt) ermittelt werden. Zur Bestimmung der Brandlasten werden nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] zwei Verfahren beschrieben:

- deterministische Erhebung, individuelle Brandlastermittlung für untersuchte Gebäude bzw. Gebäudenutzungen,
- pauschal aus statistischen Werte aus Daten zur Brandbelastung unterschiedlicher Gebäude bzw. Gebäudenutzungen.

In Bezug auf die Grundfläche eines Brandraumes kann die charakteristische Brandlastdichte  $q_{f,k}$  berechnet werden. Bei der Bestimmung der Brandlastdichten durch Brandlastklassifizierung muss die Art der Nutzung und des Gebäudes berücksichtigt werden. Die Berechnung der charakteristischen Brandlastdichte erfolgt nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] gemäß der folgenden Gleichung:



$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A} \quad (3.1)$$

mit

A Grundfläche des Brandabschnittes, eines Bezugsraumes oder innere Oberfläche

$Q_{f,i,k}$  charakteristische Brandlast

Die Berechnung der charakteristischen Brandlast durch Brandlastklassifizierung erfolgt gemäß DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] wie folgt:

$$Q_{f,i,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i = \sum Q_{f,i,k,i} \quad (3.2)$$

mit

$M_{k,i}$  Menge der brennbaren Stoffe [kg]

$H_{ui}$  Netto-Verbrennungswärme [MJ/kg] nach Tabelle E.3 in [30]

$\psi_i$  Beiwert zur Berücksichtigung geschützter Brandlasten

Die Berechnung des Bemessungswertes der Brandlastdichte  $q_{f,d}$  erfolgt bisher unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  und  $\delta_{ni}$  nach:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad (3.3)$$

mit

$q_{f,d}$  Design-Wert der Brandlastdichte [MJ/m<sup>2</sup>]

$q_{f,k}$  Charakteristischer Wert der Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche [MJ/m<sup>2</sup>]

$m$  Abbrandfaktor [MJ/kg] aus Tabelle E.3 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30]

$\delta_{q1}$  Sicherheitsfaktor, der Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandabschnittsgröße berücksichtigt, aus Tabelle E.1 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30]

$\delta_{q2}$  Sicherheitsfaktor, der Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Art der Nutzung berücksichtigt, aus Tabelle E.1 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30]

$\delta_n$  Sicherheitsfaktoren, die verschiedene aktive Brandbekämpfungsmaßnahmen (z. B. Sprinkler, Branderkennung, automatische Alarmübermittlung, Feuerwehren etc.) berücksichtigen, wobei  $\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{n,i}$  aus Tabelle E.2 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30]



Die Multiplikation der Sicherheitsfaktoren mit der charakteristischen Brandlastdichte ermöglicht somit eine Berechnung der Bemessungsbrandlastdichte. Als charakteristischer Wert der Brandlastdichte  $q_{f,k}$  wird das 80%-Quantil angesetzt. Alternativ zur Brandlastermittlung können die aus statistischen Werten aus Daten zur Brandbelastung unterschiedlicher Gebäude(-nutzungen) angegebenen Mittelwerte und die 80%-Quantile genutzt werden (vgl. Tabelle E.4 in EN 1991-1-2 Anhang E [30]).

Weiterhin kann gemäß den Angaben in E.4 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] die Wärmefreisetzungsrate unter Anwendung der Bemessungsbrandlastdichte rechnerisch bestimmt werden. Die Wärmefreisetzungsrate kann anschließend einem Bemessungsbrand zu Grunde gelegt werden. Zusätzlich sind die maximalen Wärmefreisetzungsraten sowie die Brandausbreitungsgeschwindigkeit für verschiedene Nutzungen angegeben (vgl. Tabelle E.5 in DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30]).

Insgesamt sind die Ableitung der Sicherheitsfaktoren in Anhang E sowie die Intransparenz der zehn Sicherheitsfaktoren wesentliche Kritikpunkte des Verfahrens. Neben der Vielzahl der Faktoren erfolgt eine Multiplikation von Sicherheitsfaktoren für Maßnahmen, die nicht unabhängig voneinander sind. Dies ist sicherheitstheoretisch und mathematisch nicht korrekt. Weiterhin werden die Sicherheitsfaktoren lediglich auf die Brandlastdichte aufgeschlagen und nicht auf die Wärmefreisetzungsrate, die insbesondere bei Bauteilen mit geringem Feuerwiderstand maßgeblich ist.

Das beschriebene Verfahren des Anhangs E der DIN EN 1991-1-2 [30] ist aufgrund der o. g. Kritik in Deutschland nicht zugelassen. Es wird durch das Sicherheitskonzept des Nationalen Anhangs (Anhang BB) der DIN EN 1991-1-2/NA [31] ersetzt.

### **3.2 Neuerungen im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E**

Im Zuge der Novellierung der DIN EN 1991-1-2 [30] sind im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E (Stand April 2018) [1] die folgenden Änderungen vorgenommen worden:

- Ergänzung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$ ,
- Erhöhung und Anpassung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{ni}$ ,
- Anpassung der Brandlastdichten und deren Bezeichnung und
- Ergänzung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{Q1}$ .



Die Ergänzung eines weiteren Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  wurde in Gleichung E.1 zur Berechnung der Bemessungs-Brandlastdichte  $q_{f,d}$  vorgenommen (vgl. Gleichung (3.3)). Der Sicherheitsfaktor  $\delta_{q3}$  wird in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen (RC, reliability classes) nach DIN EN 1990 [28] gewählt. Entsprechend ist eine Tabelle E.3 für die Bestimmung des neuen Sicherheitsfaktors in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen sowie exemplarischen Nutzungen ergänzt worden (Tabelle 3-1). Die möglichen Werte für den Sicherheitsfaktor  $\delta_{q3}$  liegen dabei zwischen 0,83 und 1,19, je nachdem welche Nutzung und zugehörige Zuverlässigkeitsklasse zu Grunde liegt.

*Tabelle 3-1: Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen nach [1]*

Zuverlässigkeits- klasse	$\delta_{q3}$	Beispiele Nutzung
RC 3	1,19	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Ausfallrisiken (z.B. Konzertsaal)
RC 2	1,0	Wohn- und Geschäftshäuser, öffentliche Gebäude mit mittleren Ausfallrisiken (z.B. ein Bürogebäude)
RC 1	0,83	Landwirtschaftliche Gebäude, Gebäude, in die normalerweise keine Personen eintreten (z.B. Lagerhallen, Gewächshäuser).

Die Teil-Sicherheitsfaktoren  $\delta_{ni}$  in Tabelle E.2 zur Bestimmung von  $\delta_n$  werden neu nummeriert. Die Werte zur „Automatische Branderkennung und Alarm“ sowie zur „Feuerwehr“ werden jeweils in  $\delta_{n3}$  bzw.  $\delta_{n5}$  zusammengefasst. So gibt es im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] die Faktoren  $\delta_{n1}$  bis  $\delta_{n8}$  anstatt wie bisher bis  $\delta_{n10}$ .

Zusätzlich ist der Sicherheitsfaktor  $\delta_{n3}$  in Tabelle E.2 [1], der zur Berücksichtigung von vorbeugenden Brandschutzmaßnahmen zur Brandbekämpfung angesetzt werden kann, von 0,87 auf 0,90 erhöht worden. Bei Vorhandensein einer automatischen Branderkennung und Alarmierung durch Wärmemelder soll gemäß der Änderung künftig  $\delta_{n3} = 0,90$  angesetzt werden. Bei gleichzeitiger Detektion von Wärme und Rauch soll  $\delta_{n3} = 0,73$  angesetzt werden. In der aktuellen Fassung des Anhangs E der DIN EN 1991-1-2 [30] wird für diesen Fall keine explizite Angabe gemacht. Die Berechnung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  und  $\delta_{n3}$  erfolgte auf Basis probabilistischer Berechnungen, die im Hintergrunddokument [6] dokumentiert sind und deren Ansätze mit eigenen Berechnungen in Kapitel 3.4 überprüft wurden.



Des Weiteren wurden in Abschnitt E.2.5 im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] einige charakteristische Brandlastdichten ergänzt und Bezeichnungen der Nutzungen redaktionell überarbeitet. Für eine Büronutzung wird unterschieden in ein Büro mit einem maximalen Flächenanteil von 30 % an einem Archiv und einem Großraumbüro, welches ein „papierloses Büro“ ist. Die nutzungsbedingten Brandlastdichten eines Büros mit einem maximalen Flächenanteil von 30 % an einem Archiv von  $q = 744 \text{ MJ/m}^2$  (Mittelwert) und des „papierlosen Büros“  $q = 206 \text{ MJ/m}^2$  (Mittelwert) wurden ergänzt. Weiterhin wurden für die ergänzten Nutzungen die 80%-Quantile der Brandlastdichten angegeben. Entsprechend erfolgte eine Anpassung für die Nutzungen der Kategorie Büro auch für die Wärmefreisetzungsrate in Tabelle E.6 des Abschnitts E.4. Für die unterschiedlichen Kategorien der Büronutzung werden die gleichen Werte für die maximale Wärmefreisetzungsrate  $RHR_f$  von  $250 \text{ kW/m}^2$  und eine mittlere Brandausbreitung von  $t_\alpha = 300 \text{ s}$  zugrunde gelegt. Die Überprüfung der neuen Angaben zu den Brandlasten erfolgt in Kapitel 3.5.

Zusätzlich ist im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] eine Ergänzung zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate vorgenommen worden. Als Alternative zur Tabelle E.6 kann zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate ein Entwurf auf Grundlage probabilistischer Methoden verwendet werden. Solche prozeduralen Festlegungen gehören nach jüngerer Auffassung deutscher Normungsinstitute nicht in eine Design-Norm. Dazu ist ein weiterer Sicherheitsfaktor  $\delta_{Q1}$ , der auf die Wärmefreisetzungsrate aufgeschlagen wird, vorgesehen. Der Sicherheitsfaktor  $\delta_{Q1}$  ist ein Wahrscheinlichkeitsfaktor, der auf die Wärmefreisetzungsrate angewendet werden soll. Ohne eine statistische Verteilung der Wärmefreisetzungsrate und ohne eine ausdrückliche Genehmigung der zuständigen Behörden wird  $\delta_{Q1} = 1,0$  empfohlen. Es werden keine weiteren Angaben gemacht, sodass die Ergänzung in der Praxis voraussichtlich zu keiner Änderung führen wird.

### **3.3 Bewertungsgrundlagen (Hintergrunddokumente)**

Als Hintergrunddokumente zur Bewertung des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] werden sieben Dokumente zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Hintergrunddokumente gesichtet und die getroffenen Ansätze, die als Grundlage für die Ergänzungen im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] dienen, überprüft sowie bewertet. Im Folgenden werden die vorhandenen Hintergrunddokumente zum Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] aufgelistet:





1. Rapport relatif (Hintergrundbericht) á la note explicative de protection incendie, „Evaluation en vue de la détermination de la grandeur des compartiments coupe-feu“ [3]
2. Evaluation en vue de la détermination de la grandeur des compartiments coupe-feu, Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF), vom 19.12.2007 [3]
3. Zum Verhalten von Tragwerken bei natürlicher Brandeinwirkung unter Berücksichtigung technischer Massnahmen, Dissertation von Jochen Klein, Februar 2009 [4]
4. Die Erhebung von Brandlasten in 95 Industrie- und Gewerbebauten von Jochen Köhler, Jochen Klein und Mario Fontana, 2006 [5]
5. Tabellarische Zusammenstellung von probabilistischen Berechnung zur Bestimmung von Sicherheitsfaktoren gemäß Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [6]
6. Fire loads in office buildings von Sunil Kumar und C. V. S. Kameswara Rao, 1997 [7]
7. Dokument mit Informationen zu Änderungsvorschlägen zur EN 1991-1-2 Anhang E (Ausschnitt des Systematic Reviews) [8]

Die Hintergrunddokumente bilden die Grundlage für die Überprüfung der Änderungen der Sicherheitsfaktoren und Brandlastdichten der DIN EN 1991-1-2 [30]. Die Hintergrunddokumente basieren hauptsächlich auf den Daten umfangreicher Brandlasterhebung in Industrie- und Gewerbebetrieben in der Schweiz. Diese Untersuchungen wurden im Auftrag des Verbandes der Kantonalen Feuerwehrversicherungen (VKF) im Zeitraum Juli bis Dezember 2005 durchgeführt, um Brandlastarten und -mengen in verschiedenen Industrie- und Handwerksbetrieben in der Schweiz zu ermitteln. Im Kapitel 3.5 werden die Brandlastdichten der Entwurfsfassung der derzeitigen Fassung der DIN EN 1991-1-2 [30] miteinander verglichen und die Grundlagen für die Brandlastdichten werden dargestellt.

### 3.4 Berechnung der Sicherheitsfaktoren

Anhand des Hintergrunddokuments [6], das die probabilistischen Berechnungen der verschiedenen Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_{q3}$  und  $\delta_n$  zeigt, werden die Änderungen und Ergänzungen der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  und  $\delta_{n3}$  nachvollzogen und bewertet.

Für die probabilistische Berechnungen der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_{q3}$  und  $\delta_n$  wurde unterstellt, dass die Verteilungsfunktionen der streuenden Größen einer Gumbel Typ 1 Verteilung unterliegen. Gemäß Schleich et al. [10] ist für die damals untersuchten Brandlasten und untersuchten Nutzungen von Klein [4] und Köhler et al. [5] eine gute Übereinstimmung der Brandlastendaten mit der Gumbel Typ 1 Verteilung festgestellt worden, sodass die Annahme plausible ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in [4] und [5] eine Brandlasterhebung und -statistik lediglich für Industrienutzungen (Lagerung und Produktion) durchgeführt wurde.



Im Allgemeinen wird das Versagen für den Brandfall definiert als

$$p_f = p_{f,fi} \cdot p_{fi} \leq p_t \quad (3.4)$$

mit

- $p_{f,fi}$  Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall
- $p_{fi}$  Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes
- $p_t$  Zielversagenswahrscheinlichkeit

Gemäß DIN EN 1990 [28] kann die Zielversagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen gewählt werden. Die Zielversagenswahrscheinlichkeit  $p_t$  kann gemäß Schleich et al. [10] zu  $7,23 \cdot 10^{-5}$  angesetzt werden, was einem Sicherheitsindex von  $\beta = 3,8$  entspricht. Im Rahmen der probabilistischen Berechnungen in [6] wurde eine Zielversagenswahrscheinlichkeit  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  (Zuverlässigkeitsklasse RC 2) angenommen. Der Sicherheitsindex im Brandfall  $\beta_{fi,i}$  wurde gemäß Schleich et al. [10] wie folgt berechnet:

$$\beta_{fi,i} = \phi^{-1} \cdot \left( \frac{p_t}{p_{fi}} \right) = \phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right) \quad (3.5)$$

mit

- $\phi^{-1}$  Umkehrfunktion der kumulativen Standardnormalverteilung
- $p_{fi}$  Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes
- $p_t$  Zielversagenswahrscheinlichkeit

Neben der Festlegung der Zielversagenswahrscheinlichkeit und der Berechnung des Sicherheitsindex, wurden die Sicherheitsfaktoren  $\gamma_{qf}$  berechnet. Dazu wurde eine Gumbel Verteilung Typ 1 für den Bezugsraum 50 Jahre unterstellt und ein Variationskoeffizient  $V_{qf} = 0,30$  aus Erfahrungswerten angenommen. Der Bemessungswert der Gumbel Verteilung wird nach DIN EN 1990 [28] berechnet. Der Sicherheitsfaktor wurde gemäß Schleich et al. [10] mit einem 80%-Quantil und einem Sicherheitsfaktor für die Modellunsicherheit von 1,05 bestimmt zu:

$$\gamma_{qf} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot V_{qf} \cdot [0,577 + \ln(-\ln \phi(0,9 \cdot \beta_{fi,i}))] \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot V_{qf} \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} \quad (3.6)$$

mit

- $q_{f,d}$  Design-Wert der Brandlastdichte [MJ/m<sup>2</sup>]
- $q_{f,k}$  charakteristischer Wert der Brandlastdichte [MJ/m<sup>2</sup>]
- $V_{qf}$  Variationskoeffizient
- $\beta_{fi,i}$  Sicherheitsindex im Brandfall



### Sicherheitsfaktoren $\delta_{q1}$

In Analogie zu den probabilistischen Berechnungen nach Schleich et al. [10] wurden die Berechnung von  $\delta_{q1}$ , Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandraumgröße  $A_f$ , vorgenommen. Für die Brandraumgrößen wurden Flächen von 25 m<sup>2</sup>, 250 m<sup>2</sup>, 2.500 m<sup>2</sup>, 5.000 m<sup>2</sup> und 10.000 m<sup>2</sup> untersucht. Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall wurde für die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes in Büronutzungen, Schulen oder Hotels  $5 \cdot 10^{-7}$  nach [40] und eine Nutzungsdauer bzw. Bezugszeitraum von 50 Jahren, wie sie auch in DIN EN 1990 [28] gemäß der Zuverlässigkeitsklassen RC 2 definiert ist, angesetzt. Entsprechend konnte  $p_{fi} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot A_f \cdot 50$  Jahre berechnet und  $p_{f,fi}$  wie folgt bestimmt werden:

$$p_{f,fi} = \frac{p_t}{p_{fi}} = \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{(5 \cdot 10^{-7} \cdot A_f \cdot 50 \text{ Jahre})} \quad (3.7)$$

Für eine Brandraumgröße von 25 m<sup>2</sup> ergibt sich folglich eine Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall von

$$p_{f,fi} = \frac{p_t}{p_{fi}} = \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{(5 \cdot 10^{-7} \cdot 25 \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ Jahre})} = \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 0,116 \quad (3.8)$$

Daraus folgend ergibt sich ein Sicherheitsindex von  $\beta_{fi,i} = \Phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{6,25 \cdot 10^{-4}} \right) = -1,197$ , der rechnerisch einen Sicherheitsfaktor  $\gamma_{qf} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right)^{0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln \Phi(0,9 \cdot 1,197))]} \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right)^{0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)]} \right\}} = 1,128$  ergibt.

Die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$  ergeben sich dann in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors 1,128 samt einem Sicherheitszuschlag von 10%. Bei der Berechnung kann nicht nachvollzogen werden, weshalb  $\delta_{q1}$  in Abhängigkeit von  $A_f = 25$  m<sup>2</sup> gesetzt wird. Insgesamt sind die Berechnungen jedoch plausibel. Die Nachrechnung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q1}$  zeigt Tabelle 3-2. Die Nachrechnung weicht um max. -0,04 von den Angaben des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q1}$  vom Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] ab.

Tabelle 3-2: Nachrechnung Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$  sowie  $\delta_{q1}^{-1}$  nach Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]

$A_f$	$p/p_{fi}$	$\beta_{fi}$	$\gamma_{qf}$	$\gamma_{fi}$	$\delta_{q1}$	$\delta_{q1}$ (Entwurf EN 1991-1-2 [1])
25 (Ref.)	0,116	-1,197	1,128	1,000	1,10	1,10
250	0,0116	-2,271	1,530	1,357	1,49	1,50
2.500	0,00116	-3,047	1,917	1,699	1,87	1,90
5.000	0,0006	-3,249	2,032	1,801	1,98	2,00
10.000	0,0003	-3,442	2,148	1,903	2,09	2,13



### Sicherheitsfaktoren $\delta_{q2}$

Die Berechnung vom Sicherheitsfaktor  $\delta_{q2}$ , der die Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Nutzung berücksichtigt, erfolgt in Analogie zur Berechnung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q1}$ . Als Referenzgebäude wurde jedoch ein Hotel mit einer Brandraumgröße  $A_f = 2.500 \text{ m}^2$  mit  $\gamma_{gf} = 1,917$  (Tabelle 3-2) angesetzt. Zusätzlich wurden die Nutzungen Museum, Motorfabrik, Chemielabor und Feuerwerk/Lack-Industrie betrachtet. Als Vereinfachung wird die Wahrscheinlichkeit eines Brandes  $p_f = 5 \cdot 10^{-7}$  ins Verhältnis zu verschiedenen Nutzungen gesetzt. Die Verhältnismäßigkeit wurde von Cajot et al. [9] übernommen, wobei die Brandentstehung in niedrig (0,10), normal (1,0), durchschnittlich (10), hoch (100) und sehr hoch (1.000) eingestuft wurde. Die Zielversagenswahrscheinlichkeit  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  wurde weiterhin angewendet, wodurch sich beispielsweise für die Nutzung Museum (Brandentstehung in niedrig 0,10) eine Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall wie folgt berechnet:

$$p_{f,fi} = (7,23 \cdot 10^{-5}) / (0,10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) \cdot 2500 \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ Jahre}) = 0,0116 \quad (3.9)$$

Daraus folgend ergibt sich ein Sicherheitsindex von  $\beta_{fi,i} = \Phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{6,25 \cdot 10^{-3}} \right) = -2,271$ , der rech-

$$\text{nerisch einen Sicherheitsfaktor } \gamma_{qf} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right)^{0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln \Phi(0,9 \cdot 2,271))]} \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right)^{0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)]} \right\}} = 1,530 \text{ ergibt.}$$

Die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q2}$  ergeben sich dann in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors 1,917 des Referenzgebäudes (Hotel) ohne Sicherheitszuschlag. Bei der Berechnung kann nicht nachvollzogen werden kann, weshalb für  $\delta_{q2}$  kein Sicherheitszuschlag von 10 % und als Referenzgebäude eine Brandraumgröße von 2.500 m<sup>2</sup> statt zuvor 25 m<sup>2</sup> gesetzt wird. Insgesamt sind die Berechnungen jedoch plausibel. Die Nachrechnung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q2}$  zeigt Tabelle 3-3. Die Nachrechnung weicht max. um -0,06 von den Angaben des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q2}$  vom Entwurf zur EN 1991-1-2 Anhang E [1] ab.

Tabelle 3-3: Nachrechnung Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q2}$  sowie  $\delta_{q2}$  nach Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]

Nutzung	$p_{fi}$	$p/p_{fi}$	$\beta_{fi}$	$\gamma_{qf}$	$\gamma_{fi}$	$\delta_{q2}$	$\delta_{q2}$ (Entwurf EN 1991-1-2 [1])
Museum	$0,10 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$	0,0116	-2,271	1,530	0,799	0,79	0,78
Hotel (Ref.)	$1 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$	0,00116	-3,047	1,917	1,00	1,00	1,00
Motorfabrik	$10 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$	0,000116	-3,682	2,299	1,200	1,20	1,22
Chemielabor	$100 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$	1,16E-05	-4,232	2,680	1,398	1,40	1,44
Lackindustrie	$1.000 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$	1,16E-06	-4,724	3,061	1,597	1,60	1,66



### Sicherheitsfaktoren $\delta_{q3}$

Zur Berechnung des neuen Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  zur Berücksichtigung des Einflusses der Zuverlässigkeitsklassen gemäß DIN EN 1990 [28] sind die gleichen probabilistischen Ansätze verwendet worden. Die Konzepte der Zuverlässigkeitsklasse und der Schadensfolgeklasse werden in DIN EN 1990 [28] definiert. Hinsichtlich der Behandlung der Zuverlässigkeit sollte die Auswahl entweder auf der geforderten Schadensfolgeklasse (CC, consequence class) oder der geforderten Zuverlässigkeitsklasse (RC, reliability class) oder auf beiden beruhen. Die Schadensfolgeklassen und Zuverlässigkeitsklassen sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

*Tabelle 3-4 Zuverlässigkeitsklassen und Zuverlässigkeitsziele nach DIN EN 1990 [28]*

Zuverlässigkeitsklasse	Mindestwert für $\beta$ (Bezugszeitraum 1 Jahr)	Mindestwert für $\beta$ (Bezugszeitraum 50 Jahre)
RC 1	4,2	3,3
RC 2	4,7	3,8
RC 3	5,2	4,3

*Tabelle 3-5 Schadensfolgeklassen (CC, consequence class) nach DIN EN 1990 [28]*

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC3	<b>Hohe Folgen</b> für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (Bsp. eine Konzerthalle)
CC2	<b>Mittlere Folgen</b> für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (Bsp. ein Bürogebäude)
CC1	<b>Niedrige Folgen</b> für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (Bsp. Scheunen, Gewächshäuser)

Im aktuellen Entwurf der prEN 1990 [42] werden neben den drei Zuverlässigkeitsklassen, die Erweiterung der Schadensfolgeklassen (CC, consequence classes) von drei auf fünf



CC0 – CC4 diskutiert. Die Zuverlässigkeitsklassen können direkt mit den Schadensfolgeklassen verknüpft werden. Bei Änderung der DIN EN 1990 müsste eine entsprechende Anpassung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  vorgenommen werden.

Für die Schadensfolgeklasse CC2 ist der Zielwert der zu erreichenden Zuverlässigkeit  $\beta = 4,7$ . Andererseits kann der charakteristische Wert als Modalwert der Verteilung (hier Gumbel Verteilung Typ 1) definiert werden. Hierbei ist die Zuverlässigkeitsberechnungen auf einen Zeitraum von 50 Jahren zu beziehen, als Zielwert gilt dann  $\beta = 3,8$  [16].

Von den Schadensfolgeklassen und Zuverlässigkeitsklassen nach DIN EN 1990 [28] abgeleitete Zielversagenswahrscheinlichkeiten und Zuverlässigkeitsindex werden auf den Brandfall übertragen, weshalb  $\beta_{fi,i}$  aus Tabelle 3-4 entnommen sowie  $p_t$  daraus berechnet werden kann (vgl. Gleichungen (3.10)).

Die Wahrscheinlichkeit eines Brandes  $p_{fi}$  wurde weiterhin gemäß [40] zu  $5 \cdot 10^{-7}$  angenommen. Als Brandraumgröße wurde eine Fläche von  $A_f = 2.500 \text{ m}^2$  aus Cajot et al. [9] berücksichtigt. Der Sicherheitsfaktor wurde in Bezug auf Zuverlässigkeitsklasse CC2 ( $\beta = 3,8$ ) gewählt. Die entsprechende Zielversagenswahrscheinlichkeit ergibt sich rechnerisch zu:

$$p_t = \phi(-\beta) = \phi(-3,8) = 7,23 \cdot 10^{-5} \quad (3.10)$$

mit

- $p_t$  Zielversagenswahrscheinlichkeit
- $\phi$  Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung
- $\beta$  Zuverlässigkeitsindex

Die Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall errechnet sich dabei wie folgt:

$$p_{f,fi} = (7,23 \cdot 10^{-5}) / [(5 \cdot 10^{-7}) \cdot 2.500 \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ Jahre}] = 0,00116 \quad (3.11)$$

Daraus folgend ergibt sich ein Sicherheitsindex von  $\beta_{fi,i} = \phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{6,25 \cdot 10^{-1}} \right) = -3,047$ , der rechnerisch einen Sicherheitsfaktor  $\gamma_{qf} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln \phi(0,9 \cdot 3,047))] \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} = 1,917$  ergibt.

Die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen RC 1, RC 2 und RC 3 ergeben sich dann in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktor 1,917 ohne Sicherheitszuschlag. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsklasse RC2 dienen entsprechend als Referenz. Die Berechnun-



gen der neuen Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  sind plausibel. Die Nachrechnung der neuen Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  zeigt Tabelle 3-6. Die Nachrechnung weicht max. um  $\pm 0,01$  von den Angaben des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  vom Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] ab.

*Tabelle 3-6: Nachrechnung Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  sowie  $\delta_{q3}$  nach Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]*

Zuverlässigkeitsklassen	$\beta$	$p_t$	$p/p_{fi}$	$\beta_{fi}$	$V_{qf}$	$\gamma_{fi}$	$\delta_{q3}$	$\delta_{q3}$ (Entwurf EN 1991-1-2 [1])
RC 1	3,3	4,834E-04	7,680E-03	-2,424	1,600	0,835	0,835	0,83
RC 2	3,8	7,235E-05	1,157E-03	-3,047	1,917	1,000	1,000	1,00
RC 3	4,3	8,540E-06	1,360E-04	-3,641	2,272	1,186	1,186	1,19

### Sicherheitsfaktoren $\delta_{ni}$

Die Berechnung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  und  $\delta_{q3}$  erfolgte zweifach in Analogie zu den bereits dargestellten probabilistischen Berechnungen und nach Schleich et al. [9], [10], wobei zusätzlich die Faktoren  $\delta_{ni}$ , zur Berücksichtigung der abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen, berechnet werden. Die Versagenswahrscheinlichkeiten für die Anlagentechnik und Berücksichtigung der Feuerwehren basiert auf den Angaben aus Schleich et al. [10]. Für die probabilistischen Berechnungen, insbesondere die Sicherheitsfaktoren wurden ebenfalls eine Varianz von  $V_{qf} = 0,30$  sowie der 80%-Quantil angesetzt, jedoch wird von 55 Jahren statt 50 Jahren Nutzungsdauer und einer Wahrscheinlichkeit eines Brandes von  $p_f = 4 \cdot 10^{-7}$  anstatt  $5 \cdot 10^{-7}$  ausgegangen. Die Abweichungen werden nicht begründet und können somit nicht nachvollzogen werden. Als Referenzbrandlastdichte wurde  $600 \text{ MJ/m}^2$  angesetzt, was im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] Tabelle E. 5 einer Nutzung „commercial area“ entspricht. Eine Begründung für diese Annahme ist nicht gegeben. Ferner wird zur Berechnung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  und  $\delta_{ni}$  als Referenzfläche  $A_f = 1.000 \text{ m}^2$  anstatt  $A_f = 2.500 \text{ m}^2$  wie bei der ersten Berechnungen, die sich an den probabilistischen Berechnungen nach Schleich et al. [9], [10] orientiert, angesetzt. Lediglich für die Bestimmung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$ , in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen wurde wiederum  $A_f = 2.500 \text{ m}^2$  angesetzt. Eine Begründung wird nicht gegeben. Die Berechnung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_{q3}$  kann z. T. nachvollzogen werden und wurde auf Plausibilität geprüft. Aufgrund der leichten Änderungen der Nutzungsdauer von 55 Jahren und der Wahrscheinlichkeiten eines Brandes von  $p_f = 4 \cdot 10^{-7}$  ergeben sich rechnerisch kleinere Abweichungen für die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_{q3}$ .



Für die Berechnung von  $\delta_{ni}$  wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten für anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen nach Schleich et al. [10] Tabelle 5.6 angesetzt (vgl. Tabelle 3-7).

*Tabelle 3-7: Versagenswahrscheinlichkeiten für anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen aus Schleich et al. [10]*

Maßnahmen	Versagenswahrscheinlichkeit $p_f$
Sprinkler	0,02
Sprinkler mit einfacher Versorgung	0,01
Sprinkler mit zweifacher Versorgung	0,005
Wärmemelder	0,25
Rauchwarnmelder	0,0625

Die Nachrechnungen werden im Folgenden beispielhaft für den Sicherheitsfaktor  $\delta_{n1}$  gezeigt. Gemäß Tabelle 3-7 ergibt sich für eine Sprinkleranlage eine Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_f = 0,02$ . Wenn die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes von  $p_f = 4 \cdot 10^{-7}$  auf einer Brandraumfläche  $A_f = 1.000 \text{ m}^2$  mit einer Sprinkleranlage mit einer Zielversagenswahrscheinlichkeit von  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  in einem Zeitraum von 55 Jahren zugrunde gelegt wird, ergibt sich rechnerisch eine Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall von:

$$p_{f,fi} = (7,23 \cdot 10^{-5}) / [(0,02 \cdot (4 \cdot 10^{-7}) \cdot 1.000 \text{ m}^2 \cdot 55 \text{ Jahre})] = 0,164 \quad (3.12)$$

Daraus folgend ergibt sich ein Sicherheitsindex von  $\beta_{fi,i} = \Phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{4,40 \cdot 10^{-4}} \right) = 0,976$ , der rechnerisch einen Sicherheitsfaktor  $\gamma_{qf} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln \Phi(0,9 \cdot 0,976))] \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} = 1,06$  ergibt. Der

Sicherheitsfaktor  $\delta_{n1}$  wird berechnet, indem der Sicherheitsfaktor ins Verhältnis zu einer Nutzung ohne Anlagentechnik gesetzt wird. Für die Referenz ohne Anlagentechnik ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall von:

$$p_{f,fi} = (7,23 \cdot 10^{-5}) / [(4 \cdot 10^{-7}) \cdot 1.000 \text{ m}^2 \cdot 55 \text{ Jahre}] = 0,003 \quad (3.13)$$





Daraus folgend ergibt sich ein Sicherheitsindex von  $\beta_{fi,i} = \phi^{-1} \cdot \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{2,20 \cdot 10^{-2}} \right) = 2,718$ , der rechnerisch einen Sicherheitsfaktor  $\gamma_{qf} = 1,05 \cdot \frac{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln \phi(0,9 \cdot 2,718))] \right\}}{\left\{ 1 - \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \cdot 0,30 \cdot [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} = 1,74$  ergibt. Entsprechend berechnet sich der Sicherheitsfaktor  $\delta_{n1}$  zu  $1,06/1,74 = 0,609$ . Für die Berechnung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{n2}$  wird als Referenz die probabilistische Berechnung mit Sprinkler verwendet. Die Ergebnisse der Nachrechnung zeigt Tabelle 3-8. Die probabilistischen Berechnungen für die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{n1}$ ,  $\delta_{n2}$ ,  $\delta_{n4}$  und  $\delta_{n5}$  konnten rechnerisch nachvollzogen werden. Die Nutzungsdauer wurde jedoch auf 55 Jahre statt 50 Jahre erhöht, was nicht nachvollzogen werden kann.

Tabelle 3-8: Nachrechnung Sicherheitsfaktoren  $\delta_{ni}$  sowie  $\delta_{ni}$  nach Entwurf der EN 1991-1-2 [1]

Maßnahme	$p_f$	$p_{fi}$	$p/p_{fi}$	$\beta_{fi}$	$\gamma_{qf}$	$\gamma_{fi} = \delta_{ni}$	$\delta_{ni}$ ( Entwurf EN 1991-1-2 [1])
Referenz	1,0	0,022	0,003	2,716	1,74	1,000	
Mit Sprinkler	0,02	4,4E-04	0,0164	0,976	1,06	0,609	$\delta_{n1} = 0,61$
Kein unabhängige Wasserzufuhr	1,0	0,022	0,003	2,716	1,74	1,000	$\delta_{n2} = 1,00$
mit einfacher Versorgung	0,01	2,2E-4	0,3286	0,443	0,92	0,868	$\delta_{n2} = 0,87$
mit zweifacher Versorgung	0,005	1,1E-4	0,6573	-0,406	0,74	0,698	$\delta_{n2} = 0,70$
Wärmemelder	0,25	0,0055	0,0131	2,222	1,51	0,868	$\delta_{n3} = 0,90$
Rauchwarnmelder	0,0625	1,38E-03	0,0526	1,620	1,27	0,730	$\delta_{n3} = 0,73$
Wärme- und Rauchmeldung	0,0156 25	3,44E-04	0,2103	0,805	1,01	0,580	$\delta_{n3} = 0,73$
automatische Alarmierung	0,25	0,0055	0,0131	2,222	1,51	0,868	$\delta_{n4} = 0,87$
Werkfeuerwehr	0,02	4,4E-04	0,1643	0,976	1,06	0,609	$\delta_{n5} = 0,61$
Externe Feuerwehr	0,1	0,0022	0,0329	1,840	1,35	0,776	$\delta_{n5} = 0,78$

Lediglich die Nachrechnungen von  $\delta_{n3}$  weichen von den Berechnungen in [6] ab. Eine Erhöhung von  $\delta_{n3}$  (heat detection, Wärmemelder) von 0,87 auf 0,9 und  $\delta_{n3}$  (heat and smoke detection,



Wärme- und Rauchmeldung) von 0,73 (Nachrechnung 0,58,  $\Delta$  -0,15) kann nicht nachvollzogen werden. Eine Begründung für die Erhöhung von  $\delta_{n3}$  (heat detection, Wärmemelder) ist nicht gegeben, weder rechnerisch noch argumentativ. Ebenso fehlt die Nachvollziehbarkeit für  $\delta_{n6}$ ,  $\delta_{n7}$  und  $\delta_{n8}$  (sichere Rettungswege, Feuerlöscheinrichtungen und Rauch-/Wärmeabzugsanlagen), da Versagenswahrscheinlichkeiten nicht angegeben oder verwendete Literaturstellen nicht benannt sind. Folglich ist für diese Sicherheitsfaktoren eine Nachrechnung nicht möglich.

Im Gesamten zeigt die Nachrechnung der Sicherheitsfaktoren, dass die probabilistischen Berechnungen z. T. unzureichend dokumentiert sind und die Nachvollziehbarkeit somit nicht gewährleistet ist. Es werden für die probabilistischen Berechnungen unterschiedliche Brandraumgrößen  $A_f = 25 \text{ m}^2$ ,  $1.000 \text{ m}^2$  oder  $2.500 \text{ m}^2$  als Bezugsgrößen gewählt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Brand wird zu  $p_f = 4 \cdot 10^{-7}$  und  $p_f = 5 \cdot 10^{-7}$  angenommen, die dem grundlegenden Dokument [40] entnommen wurden. Zusätzlich wird die Bezugsdauer von 50 Jahren zum Teil unbegründet auf 55 Jahre erhöht, die Zielversagenswahrscheinlichkeit jedoch nicht angepasst. Für die probabilistischen Berechnungen fehlen im Wesentlichen die Literaturstellen, aus denen die Berechnungsdaten ausgelesen und das Vorgehen abgeleitet wurde. Ebenso wurde die gewählte Vorgehensweise nicht dokumentiert, was eine Nachrechnung und Beurteilung z. T. erschwert. Die Kritik, dass die einzelnen Maßnahmen für die Sicherheitsfaktoren nicht unabhängig voneinander sind und dennoch multipliziert werden, wurde mit der Ergänzung der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{q3}$  und Änderungen von  $\delta_{n3}$  nicht behoben. Weiterhin bleiben einige Annahmen unbegründet und nicht nachvollziehbar. Die Intransparenz der Sicherheitsfaktoren bleibt auch durch die Änderungen und Ergänzungen in [1] weiterhin bestehen.

Zusätzlich ist anhand der Berechnungen in [6] erkennbar, dass für den neuen Sicherheitsfaktor  $\delta_{Q1}$  keine Berechnungen oder Erläuterungen vorliegen, sodass die Ergänzung nicht bewertet werden kann. Die Kritik, dass kein Sicherheitsfaktor auf die Wärmefreisetzungsraten aufgeschlagen wird, wurde mit der Ergänzung versucht entgegenzuwirken. Aufgrund der Empfehlung  $\delta_{Q1} = 1,0$  zu setzen, ergibt sich jedoch keine Änderung für die praktische Anwendung.

### **3.5 Überprüfung der Angaben zu den Brandlasten**

Im Zuge der Novellierung der DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] werden neben den etablierten Nutzungskategorien zwei neue Nutzungskategorien eingeführt. Die neu eingeführten Nutzungskategorien differenzieren die Brandlast in Bürogebäuden in Büroräume mit einer geringeren und höheren Brandlastdichte (Tabelle 3-9). Die Nutzungskategorie Büro mit geringer Brandlast soll ein papierloses Großraumbüro darstellen. Hingegen soll die Nutzungskategorie Büro mit hoher Brandlast ein Büroraum mit maximal 30 % Archivfläche repräsentieren. Im Entwurf der



EN 1991-1-2 Anhang E [1] werden für diese Nutzungskategorien neue Mittelwerte und Quantilwerte für die Brandlastdichte definiert (Tabelle 3-9). Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte und der Quantilwerte der Brandlasten findet sich in Tabelle 3-9. Neben der Differenzierung der Brandlastdichte für die Nutzungskategorie Büro werden im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] keine Änderungen bzw. Anpassungen der Brandlastdichten vorgenommen.

*Tabelle 3-9: Mittelwerte und Quantilwerte der Brandlastdichten für verschiedene Nutzungskategorien gemäß DIN EN 1991-1-2 [30], DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] (grau hinterlegt) und der Entwurfsfassung von EN 1991-1-2 Anhang E [1]*

Nutzungskategorie	Mittelwert der Brandlast $q_{k,j}$ in [MJ/m <sup>2</sup> ]		80%-Quantil der Brandlast $q_{k,j}$ in [MJ/m <sup>2</sup> ]		90%-Quantil der Brandlast $q_{k,j}$ in [MJ/m <sup>2</sup> ]
	EN 1991-1-2, Version 2010 bzw. 2015 [30], [31]	Entwurfsfassung EN 1991-1-2 [1]	EN 1991-1-2, Version 2010 [30]	Entwurfsfassung EN 1991-1-2 [1]	DIN EN 1991-1-2/NA, Version 2015 [31]
Wohnung	780		948		1085
Krankenhaus (Zimmer)	230		280		320
Hotel (Zimmer)	310		377		431
Bücherei, Archiv	1500		1824		2087
<i>Büro mit hoher Brandlastdichte</i>	/	744	/	905	/
Büro	420		511		584
<i>Büro mit geringer Brandlastdichte</i>	/	206	/	250	/
Schule (Zimmer)	285		347		397

*Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite*



Einkaufszentrum	600	730	835
Versammlungs- stätte (Kino, The- ater)	300	365	417
Verkehr	100	122	139

Die derzeitige Fassung DIN EN 1991-1-2 [30] und der Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang [1] unterscheiden sich vom deutschen Nationalen Anhang zur DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31] im Quantilwert für die Brandlastdichte der entsprechenden Nutzungskategorie. Im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] wird für die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate, welche sich aus der Brandlastdichte und der Fläche des Brandes ermittelt, der 80 %-Quantilwert für die Brandlastdichte angesetzt. Hingegen wird im deutschen Nationalen Anhang zur DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31] der 90 %-Quantilwert der Brandlastdichte für die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate zu Grunde gelegt. Die Grundlage der Berechnung der Quantilwerte für die Brandlastdichte bildet eine Extremwertverteilung (Gumbelverteilung). Allein durch diese Differenzierung der Quantilwerte unterscheidet sich die daraus resultierende Wärmefreisetzungsrate, welche die Grundlage für Berechnungen der thermischen Einwirkungen mit Naturbrandmodellen sind.

Abgeleitet wurden die Brandlastdichten zur Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate von Schleich et. al (1999 bzw. 2001) [10], [11] im Rahmen der Entwicklung bzw. Herleitung der DIN EN 1991-1-2 [30]. Im Wesentlichen basieren die derzeitigen Angaben zu den Brandlastdichten auf der SIA-Dokumentation 81 (1984) [17], der umfangreichen Zusammenstellung von Thomas (1986) [18] und dem BSI Standard (1996) [26].

Die SIA-Dokumentation 81 (1984) [17] wurde durch die Schweizer Gesellschaft für Ingenieure und Architekten (SIA) erarbeitet zur Bewertung bzw. Abschätzung der Brandgefährdung und des Brandrisikos in unterschiedlich genutzten Gebäuden. Zur Beurteilung dieser Faktoren war eine Datenerhebung zu den Brandlasten usw. verschiedener Nutzungskategorien erforderlich. Diese Datenerhebung zu den Brandlastdichten von unterschiedlich genutzten Räume in verschiedenen Gebäudetypen wurde in der SIA-Dokumentation 81 [17] zusammengefasst. Auf eine detaillierte Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Beilage 1 der SIA-Dokumentation 81 [17] verwiesen, in der detailliert die Brandlastdichten usw. für verschiedene Nutzungen dargestellt sind.



In Thomas (1986) [18] werden die Datenerhebungen von der Commissie Research Staalconstructies (1966) [19], Nilson (1970) [21], Forsberg, et al. (1971) [22], Bryl (1974 und 1975) [23], [24] und Petterson et al. (1976) [25] von Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungen und die Brandlastdichten der betrachteten Raumsituation tabellarisch zusammengefasst und verglichen. Die Datenerhebungen in den Gebäuden mit unterschiedlicher Nutzung umfassen die Nutzungskategorien Bürogebäude, Krankenhäuser, Wohnungen, Hotels, Schulen usw. Diese umfassende Zusammenstellung der Datenerhebung von Thomas (1986) [18] und der SIA-Dokumentation 81 (1984) [17] bildet die wesentliche Datenbasis respektive Grundlage für die Mittelwerte der Brandlastdichten der DIN EN 1991-1-2 [30], [31].

In dem niederländischen Bericht „Commissie Research Staalconstructies“ (1966) [19] werden Messungen der Brandlastdichten in Schulen und Hotels dargestellt. Insgesamt wurden rund 300 Messungen in Schulbauten und rund 50 Messungen in Krankenhäusern durchgeführt. Diese Messungen ergaben eine durchschnittliche Brandlast von  $217 \text{ MJ/m}^2$  ( $52 \text{ Mcal/m}^2$ ) für Schulbauten und  $234 \text{ MJ/m}^2$  ( $56 \text{ Mcal/m}^2$ ) für Krankenhäuser.

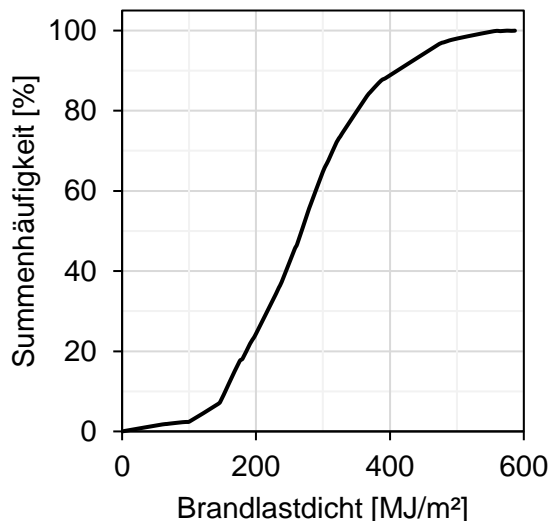
Nilson [21] führte 1970 eine Datenerhebung zu Brandlasten in Wohnungen durch. Bei dieser Datenerhebung zu den Brandlasten wurden Wohnungen in Stockholm und Umgebung betrachtet. Anhand dieser Datenerhebung zu den Brandlasten in Wohnungen wurde für Wohnungen mit zwei Räumen eine Brandlastdichte von  $780 \text{ MJ/m}^2$  und für Wohnungen mit drei Räumen eine Brandlastdichte von  $720 \text{ MJ/m}^2$  abgeleitet. Die Brandlastdichte für eine Wohnung mit zwei Räumen von  $780 \text{ MJ/m}^2$  entspricht der Brandlastdichte für die Nutzungskategorie Wohnung der DIN EN 1991-1-2 [30], welche wiederum das Maximum der Datenerhebungen in Wohnungen [21], [23], [24] darstellt.

Im selben Jahr führte Baldwin (1970) [20] eine Untersuchung zu Brandlasten in modernen Bürogebäuden durch. Diese Untersuchungen ergaben einen Mittelwert der Brandlastdichte von  $372 \text{ MJ/m}^2$ .

Forsberg et al. (1971) [22] dokumentierte die Brandlasten in Schulen und Hotels. Diese statistischen Untersuchungen zur Brandlast und der Ableitung der Brandlastdichte in Schulen basieren auf rund 1700 Messungen in Grund-, Mittel- und Hochschulen. Die Summenhäufigkeit für die Brandlastdichte aus dieser Datenerhebung respektive Untersuchungen ist in Abbildung 3-1 a) dargestellt. Als Mittelwert der Brandlastdichte aus diesen Datenerhebungen ergibt sich ein Wert von  $285 \text{ MJ/m}^2$ , welcher der Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2 [1], [30] entspricht. Neben den statistischen Untersuchungen zur Brandlast in Schulen wurde die Brandlast bzw.

die Brandlastdichte von Hotelzimmern statistisch durch Forsberg et al. [22] erfasst. Die Summenhäufigkeit der Brandlastdichte für Hotelzimmer ist in Abbildung 3-1 b) dargestellt. Wobei aus diesen Untersuchungen ein Mittelwert von  $310 \text{ MJ/m}^2$  für Hotels ermittelt wurde, der ebenfalls der Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2 [1], [30] entspricht.

a)



b)

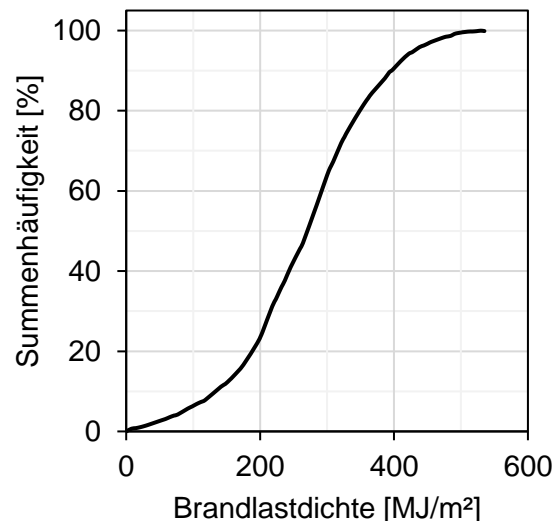


Abbildung 3-1: Summenhäufigkeit der Brandlastdichte von unterschiedlichen Nutzungskategorien - a) Schulen; b) Hotelzimmer [22]

Bryl [23] führte 1974 eine Datenerhebung in zehn Bürogebäuden durch bei der mehr als 2900 unterschiedliche Büroräume erfasst wurden. Der Mittelwert und die Standardabweichung dieser Datenerhebung wird exemplarische für Bürogebäude in Tabelle 3-10 dargestellt. Der Mittelwerte aller dokumentierte Büroräume von  $420 \text{ MJ/m}^2$  stellt die derzeitige Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2 [30], [31] dar. Darüber hinaus dokumentierte Bryl (1975) in [24] die Untersuchungen von der Commissie Research Staalconstructies [19], Nilson [21], Forsberg et al. [22].



Tabelle 3-10: Brandlastdichte in einem Bürogebäude nach Bryl (1974) [23]; Umrechnungsfaktor von Mcal/m<sup>2</sup> in MJ/m<sup>2</sup> beträgt 4,2

Raumgruppe	Mittelwert der Brandlast		Standardabweichung	
	[Mcal/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[Mcal/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
Management	65	273	30	126
Betriebsleitung	86	361	40	168
Sachbearbeiter	108	454	62	260
Büros	90	378	11	46
Sonderräume	318	1336	214	899
Technische Räume	80	336	16	67
Verkehrsräume	40	168	52	218
<b>Alle Räume</b>	<b>100</b>	<b>420</b>	<b>88</b>	<b>370</b>

In Petterson et al. (1976) [25] werden die statistischen Untersuchungen aus Schweden von Nilsson [21] und Forsberg et al. [22] zusammengestellt. In Petterson et al. [25] werden die statistischen Untersuchungen zu den unterschiedlichen Gebäudetypen respektive Raumtypen (Nutzungskategorien), zu den Schulen, Bürogebäude, Hotels, Wohnungen, Krankenhäuser usw. zählen, statistisch ausgewertet und dargestellt.

Die SIA-Dokumentation 81 [17] und die umfangreiche Zusammenstellung von Thomas [18], welche die umfangreichen deutschen und schwedischen statistischen Datenerhebungen beinhalten, sind schlussendlich die Basis der Brandlastdichten der DIN EN 1991-1-2 [1], [30] und der DIN EN 1991-1-2/NA [31]. Diese Datenerhebungen stellen die Grundlage für die Ableitung der Verteilungsfunktionen für moderne Brandlasten dar.

Solch umfangreiche Datenerhebungen bzw. Untersuchungen wurden zuletzt von Kumar (1997) [7], Köhler et al. (2006) [5] und Klein (2009) [4] durchgeführt. Kumar [7] führte in Indien eine Datenerhebung in acht Bürogebäuden durch, wobei insgesamt 388 Räume für die Ableitung des Mittelwertes herangezogen wurden. Die Datenerhebung von Kumar [7] führte zu einem Mittelwert der Brandlastdichte in Büroräumen von 348 MJ/m<sup>2</sup>, welche im Vergleich zum Mittelwert der DIN EN 1991-1-2 [30], [31] eine geringere Brandlastdichte ist. In der Schweiz an der ETH Zürich wurden durch Köhler et al. (2006) [5] und Klein (2009) [4] Datenerhebungen zu



Brandlasten in 95 Industrie- und Gewerbebauten durchgeführt. Initiiert wurden die Datenerhebungen durch die Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) zur Überprüfung bzw. Aktualisierung der Brandlasten aus der SIA-Dokumentation 81 [17], da diese aus dem Jahr 1984 stammt. Insgesamt wurden bei dieser Datenerhebung neun Büroräume dokumentiert und erfasst. Bei dieser Datenerhebung wurde ein Mittelwert der Brandlastdichte von  $398 \text{ MJ/m}^2$  ermittelt (Maximum der Brandlastdichte:  $835 \text{ MJ/m}^2$ ; Minimum der Brandlastdichte:  $168 \text{ MJ/m}^2$ ). Dieser Mittelwert der Datenerhebung aus der Schweiz von Köhler et al. [5] und Klein [4] ist geringer als der Mittelwert der Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2 [30], [31]. Die neu eingeführten Nutzungskategorien im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] werden durch den minimal und maximal Wert der Datenerhebung von Köhler et al. [5] und Klein [4] erfasst.

Im Wesentlichen werden die Brandlastdichten im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] im Vergleich zur derzeitigen Fassung der DIN EN 1991-1-2 [30], [31] nicht verändert. Lediglich werden zwei neue Nutzungskategorien von Büroräumen eingeführt, welche Büroräume mit einer geringen und höheren Brandlast erfassen sollen. Zusammenfassend können folgende Punkte festgehalten werden:

- a. Quantilwerte für die Brandlastdichte zwischen der DIN EN 1991-1-2 [30] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] (80%-Quantil) unterscheiden sich von der DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] (90%-Quantil).
- b. Die Nutzungskategorie Büro wird in Büroräume mit einer geringeren und höheren Brandlastdichte erweitert bzw. differenziert. Die Mittelwerte der Brandlastdichte können durch die Datenerhebungen von Köhler et al. [5] und Klein [4] bestätigt werden.
- c. Die Brandlastdichten der DIN EN 1991-1-2 [30], [31] basieren auf deutschen, schweizerischen und schwedischen Datenerhebungen aus den Jahren 1970 bis 1975. Diese Untersuchungen stellen die Grundlage für die Brandlasten bzw. die Annahme für die Verteilung der Brandlasten. Basierend auf diesen Datenerhebungen wurden die Verteilungsfunktionen für moderne Brandlasten abgeleitet.





### 3.6 Vergleich zum Sicherheitskonzept DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB

In Deutschland findet als Alternative zum nicht zugelassenen Verfahren nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] das Sicherheitskonzept zur DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] Anwendung. Im Unterschied zum Verfahren nach DIN EN 1991-1-2 Anhang E [30] wird im deutschen Sicherheitskonzept sowohl die Brandlastdichte als auch die Wärmefreisetzungsrate mit einem Sicherheitsbeiwert multipliziert, um die Bemessungswerte zu ermitteln. Neben den Bemessungsgrößen der Brandlastdichte und Wärmefreisetzungsrate werden auch die erforderlichen Zuverlässigkeiten der zu bemessenen Tragwerke und Bauteile im Brand berücksichtigt. Einzelne anlagentechnische oder abwehrende Brandschutzmaßnahmen werden nicht mit einem eigenen Sicherheitsfaktor belegt. Im Folgenden wird das Verfahren samt Sicherheitskonzept gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] kurz erläutert.

Das Verfahren gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] ermöglicht ebenfalls die Berechnung von Brandlastdichten als Bemessungswert. Der Bemessungswert der Brandlastdichte bestimmt sich aus Multiplikation der charakteristischen Brandlastdichte  $q_{f,d}$  mit der Verbrennungseffektivität  $\chi$  und einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{fi,q}$  (vgl. Gleichung (3.14)).

$$q_{f,d} = \chi \cdot q_{f,k} \cdot \gamma_{fi,q} \quad (3.14)$$

mit

$\chi$  Verbrennungseffektivität (zellulosehaltige Materialien  $\chi = 0,8$ ) [-]

$q_{f,k}$  charakteristische Brandlastdichte [MJ/m<sup>2</sup>]

$\gamma_{fi,q}$  Teilsicherheitsbeiwert, der die Auftretenswahrscheinlichkeit eines vollentwickelten Brandes sowie die erford. Zuverlässigkeit der Bauteile berücksichtigt [-]

Analog zum Verfahren des Anhangs E zur DIN EN 1991-1-2 [30] kann die charakteristische Brandlastdichte mittels einer Brandlasterhebung und anhand nutzerspezifischen Angaben in Tabelle BB.1 ermittelt werden. Die Angaben der charakteristischen Brandlastdichten werden für verschiedene Gebäude(-nutzungen) als Mittelwert mit Standardabweichung und 90%-Quantil angegeben. Bei einer Brandlasterhebung gemäß Anhang BB 3.3 [30] wird die charakteristische Brandlastdichte in Abhängigkeit der Menge der brennbaren Stoffe, der Netto-Verbrennungswärme und unter Berücksichtigung der Lagerung (geschützt oder ungeschützt) erfasst. Neben der Brandlastdichte wird die charakteristische Wärmefreisetzungsrate mit einem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt. Die Brandentwicklung für die Brandentwicklungsphase sowie die maximale flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate  $RHR_f$  kann gemäß Tabelle BB.2 [31] angesetzt werden. Für die Brandentwicklung wird von einem quadratischen Ansatz ( $t_\alpha$ -Ansatz) ausgegangen, bei dem zusätzlich ein Flashover berücksichtigt werden kann (vgl. Gleichung BB.8a in



[31]). Durch Multiplikation mit der Brandraumgröße  $A_f$  berechnet sich die Wärmefreisetzungsrate, deren Maximum aus dem Minimum der beiden Maximalwerte eines ventilations- oder brandlastgesteuerten Brandes errechnet werden kann. Der Bemessungswert der Wärmefreisetzungsrate ergibt sich anschließend aus der Multiplikation der charakteristischen Wärmefreisetzungsrate mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{fi,Q}$  (vgl. Gleichung (3.15)).

$$\dot{Q}_{max,d} = \dot{Q}_{max,k} \cdot \gamma_{fi,Q} \quad (3.15)$$

mit

$\dot{Q}_{max,k}$  Charakteristische maximale Wärmefreisetzungsrate [MW]

$\gamma_{fi,Q}$  Teilsicherheitsbeiwert

Zur Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{fi,q}$  und  $\gamma_{fi,Q}$  gemäß dem Sicherheitskonzept des Anhangs BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] wird zunächst die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes  $p_{fi}$  berechnet, indem die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes  $p_1$ , die Ausfallwahrscheinlichkeit einer manuellen Brandbekämpfung  $p_2$  und automatische Brandbekämpfung im Anforderungsfall  $p_3$  multipliziert werden. Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit der Brandraumgröße, der Entstehungshäufigkeit und einem von der Nutzung und Unterteilung der Nutzung abhängige Exponent bestimmt. Vereinfacht können die Angaben für die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes  $p_1$  für verschiedene Nutzungen aus Tabelle BB.3 [31] entnommen werden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für die manuelle Brandbekämpfung  $p_2$  berücksichtigt Selbsthilfemaßnahmen der Nutzer  $p_{2,1}$  und Löscharbeiten der Feuerwehr  $p_{2,2}$ . Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Nutzer wird in der Regel zu  $p_{2,1} = 0,5$  angesetzt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Löscharbeiten der Feuerwehren bei Anforderung kann gemäß Tabelle BB.4 [31] angesetzt werden. Die Multiplikation beider Ausfallwahrscheinlichkeiten ergibt rechnerisch  $p_2$ . Die Ausfallwahrscheinlichkeiten von anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen (wie automatische Löschanlagen) wird ebenfalls gemäß den Angaben in Tabelle BB.4 [31] angesetzt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes berechnet sich entsprechend für jede Nutzung individuell in Abhängigkeit der Auftretens- und Ausfallwahrscheinlichkeiten der vorhandenen oder geforderten Maßnahmen.

Unter Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie lässt sich die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit  $p_{f,fi}$  durch Division der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  in Abhängigkeit des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  und der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes berechnen (vgl. Gleichung (3.17)). Die zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_f$  und die zugehörigen Zuverlässigkeitsindizes  $\beta$  werden für einen Bezugszeitraum von einem Jahr in Abhängigkeit der



Schadensfolgeklassen (hoch, mittel, gering) nach DIN 1990 [28] in Tabelle BB.5 [31] angegeben. Entsprechend kann die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit und der Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  im Brandfall wie folgt berechnet werden:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3.16)$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad (3.17)$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) \quad (3.18)$$

mit

$p_f$	Zulässige Versagenswahrscheinlichkeit
$\Phi$	Funktion der Standard-Normalverteilung
$\beta$	Zuverlässigkeitsindex
$p_{fi}$	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes
$\beta_{fi}$	Zuverlässigkeitsindex im Brandfall
$\Phi^{-1}$	Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung
$p_{f,fi}$	zulässige, bedingte Versagenswahrscheinlichkeit

Die Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrate erfolgt mit einem Variationskoeffizienten von  $V_q = 0,3$  und Sensitivitätsfaktor  $\alpha = 0,6$  wie folgt dargestellt:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(0,9 \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} \quad (3.19)$$

mit

$V$	Variationskoeffizient
$\beta_{fi}$	Sicherheitsindex im Brandfall

Die probabilistische Berechnung ist vergleichbar mit dem Vorgehen in EN 1991-1-2 Anhang E [32], wobei im Sicherheitskonzept nach Nationalem Anhang zur DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31] von anderen Variationskoeffizienten, Sensitivitätsfaktoren und den 90%-Quantil ausgegangen wird. Ferner wird als wesentlicher Unterschied neben der Brandlastdichte auch die Wärmefreisetzungsrate mit einem Teilsicherheitsbeiwert belegt.



Die Grundlagen zum Sicherheitskonzept wurden in Hosser et al. [14] erarbeitet und sind dort umfangreich dargelegt. Eine Erprobung und Validierung des Sicherheitskonzeptes nach Nationalem Anhang zur DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31] zeigen Schaumann et al. [15].

### 3.7 Vergleich der Sicherheitskonzepte

In Tabelle 3-11 sind die Sicherheitskonzepte nach Entwurf zur EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 3-11: Tabellarischer Vergleich der Sicherheitskonzepte nach Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31]

Sicherheitskonzept nach Entwurf zur EN 1991-1-2 Anhang E [1]	Sicherheitskonzept nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31]
<p>Streuende <b>Eingangsgrößen</b> (Brandlast) Gumble Typ I Verteilung 80% Quantil Variationskoeffizient <math>V_q = 0,3</math> (30%) Alpha <math>\alpha = 0,9</math></p>	<p>Streuende <b>Eingangsgrößen</b> (Brandlast) Gumble Typ I Verteilung 90% Quantil Variationskoeffizient <math>V_q = 0,3</math> (30%) für Brandlastermittlung nach Nutzung BB.3.2 <math>V_q = 0,2</math> für Brandlastermittlung im Einzelfall nach BB 3.3 und Wärmefreisetzungsrate Alpha <math>\alpha = 0,6</math></p>
<p><b>Bemessungswert der Brandlastdichte</b> <math>q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot \delta_{q3}</math> [MJ/m<sup>2</sup>] <math>q_{f,d}</math> Bemessungswert der Brandlastdichte [MJ/m<sup>2</sup>] <math>q_{f,k}</math> Charakteristischer Werte der Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche [MJ/m<sup>2</sup>] aus Tabelle E.5 <math>m</math> Abbrandfaktor [MJ/kg] aus Tabelle E.4 <math>\delta_{q1}</math> Sicherheitsfaktor, der Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandabschnittsgröße berücksichtigt, aus Tabelle E.1 <math>\delta_{q2}</math> Sicherheitsfaktor, der Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Art der Nutzung berücksichtigt, aus Tabelle E.1 <math>\delta_n</math> Sicherheitsfaktoren, die verschiedener aktiver Brandbekämpfungsmaßnahmen (z. B. Sprinkler, Branderkennung, automatische Alarmübermittlung, Feuerwehren etc.) berücksichtigen, wobei <math>\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{n,i}</math> aus Tabelle E.2 <math>\delta_{q3}</math> Sicherheitsfaktor, zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsklassen nach EN 1990, aus Tabelle E.3</p>	<p><b>Bemessungswert der Brandlastdichte</b> <math>q_{f,d} = \chi \cdot q_{f,k} \cdot \gamma_{fi,q}</math> [MJ/m<sup>2</sup>] <math>\chi</math> Verbrennungseffektivität, für Mischlasten und überwiegend zellulosehaltige Materialien <math>\chi = 0,8</math> <math>q_{f,k}</math> Charakteristischer Werte der Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche <math>A_f</math> [MJ/m<sup>2</sup>] aus Tabelle BB.1 (90%-Quantil) <math>\gamma_{fi,q}</math> Teilsicherheitsbeiwert nach BB.5 (Berücksichtigt Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes und erforderliche Zuverlässigkeit der Bauteile)</p>

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite



<p><b>Brandlastdichten</b> nach Tabelle E.5 Mittelwert, 80%-Quantil in Abhängigkeit der Nutzungen (MJ/m<sup>2</sup>) Werte alle aus Schleich [10], Tabelle 4.2 S.19 übernommen, Ergänzung zusätzlicher Nutzung Büro (dichtbe- packt, geringe Brandlasten)</p> <p><i>Charakteristische Wert der Brandlastdichte wird als Modalwert der Verteilung (hier Gumble Typ I Verteilung) definiert</i></p>	<p><b>Brandlastdichten</b> nach Tabelle BB.1 Mittelwert, Standardabweichung, 90%- Quantil in Abhängigkeit der Nutzungen Werte alle aus Schleich [10], Tabelle 4.2 S.19 übernommen</p> <p><i>Charakteristische Wert der Brandlastdichte wird als Fraktilwert der Extremwertverteilung hier (Gumble Typ I Verteilung) aufge- fasst</i></p>																										
<p><b>Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes</b> <math>p_{fi}</math> = Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes <math>p_{fi} = p_{acc} = \text{probability of fire} = 5 \cdot 10^{-7}</math></p> <p>für <math>\delta_{q1}</math> (Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandraumgröße) immer <math>p_{fi} = 5 \cdot 10^{-7}</math></p> <p>Bezugszeitraum 50 Jahre für <math>\delta_{q2}</math> in Abhängigkeit der Nutzungen nach Cajot/Schleich [9] S.419</p> <table border="0"> <tr> <td>Museum</td> <td><math>0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}</math></td> </tr> <tr> <td>Hotel (Ref.)</td> <td><math>1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>Engine</td> <td><math>10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}</math></td> </tr> <tr> <td>Chemical</td> <td><math>100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}</math></td> </tr> <tr> <td>Paints</td> <td><math>1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}</math></td> </tr> </table>	Museum	$0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}$	Hotel (Ref.)	$1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}$	Engine	$10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}$	Chemical	$100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}$	Paints	$1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}$	<p><b>Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes</b> <math>p_{fi}</math> = Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes <math>p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3</math> <math>p_1</math> = jährl. Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in NE [a<sup>-1</sup>] <math>p_2</math> = Ausfallwahrscheinlichkeit manueller Brandbekämpfung <math>p_3</math> = Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch autom. Löschanlagen</p> <p>Bezugszeitraum 1 Jahr; Auftretenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Nutzung in Tabelle BB.3 (Mindestwerte, die bei der Bestimmung von <math>A_f \cdot p_{fi}</math> [1/m<sup>2</sup>] nicht unterschritten werden dürfen)</p> <table border="0"> <tr> <td>Wohngebäude</td> <td><math>3,0 \cdot 10^{-3}</math></td> </tr> <tr> <td>Bürogebäude</td> <td><math>6,2 \cdot 10^{-3}</math></td> </tr> <tr> <td>Krankenhaus, Pflegeheim</td> <td><math>3,0 \cdot 10^{-1}</math></td> </tr> <tr> <td>Hotel, Beherbergungsstätte</td> <td><math>3,7 \cdot 10^{-2}</math></td> </tr> <tr> <td>Schule, Bildungseinrichtung</td> <td><math>4,0 \cdot 10^{-2}</math></td> </tr> <tr> <td>Verkaufsstätte, Geschäftshaus</td> <td><math>8,4 \cdot 10^{-3}</math></td> </tr> <tr> <td>Theater, Kino</td> <td><math>2,0 \cdot 10^{-2}</math></td> </tr> <tr> <td>Diskotheek</td> <td><math>1,2 \cdot 10^{-1}</math></td> </tr> </table>	Wohngebäude	$3,0 \cdot 10^{-3}$	Bürogebäude	$6,2 \cdot 10^{-3}$	Krankenhaus, Pflegeheim	$3,0 \cdot 10^{-1}$	Hotel, Beherbergungsstätte	$3,7 \cdot 10^{-2}$	Schule, Bildungseinrichtung	$4,0 \cdot 10^{-2}$	Verkaufsstätte, Geschäftshaus	$8,4 \cdot 10^{-3}$	Theater, Kino	$2,0 \cdot 10^{-2}$	Diskotheek	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Museum	$0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}$																										
Hotel (Ref.)	$1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}$																										
Engine	$10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}$																										
Chemical	$100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}$																										
Paints	$1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}$																										
Wohngebäude	$3,0 \cdot 10^{-3}$																										
Bürogebäude	$6,2 \cdot 10^{-3}$																										
Krankenhaus, Pflegeheim	$3,0 \cdot 10^{-1}$																										
Hotel, Beherbergungsstätte	$3,7 \cdot 10^{-2}$																										
Schule, Bildungseinrichtung	$4,0 \cdot 10^{-2}$																										
Verkaufsstätte, Geschäftshaus	$8,4 \cdot 10^{-3}$																										
Theater, Kino	$2,0 \cdot 10^{-2}$																										
Diskotheek	$1,2 \cdot 10^{-1}$																										
<p><b>Zielwahrscheinlichkeit</b> Zielwahrscheinlichkeit <math>p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}</math> (für 1 Jahr: <math>1,3 \cdot 10^{-6}</math>) Zielzuverlässigkeit <math>\beta_{Ziel} = 3,8</math> (Bezogen auf 50 Jahre) Zuverlässigkeitsklasse RC 2</p> <p><i>Konzepte der Zuverlässigkeitsklasse und der Schadensfolgeklasse werden in EN 1990 [28] dargestellt. Sie können miteinander verknüpft werden.</i></p>	<p><b>Zielwahrscheinlichkeit</b> Zielversagenswahrscheinlichkeit <math>p_t = 1 \cdot 10^{-6}</math> Zielzuverlässigkeit <math>\beta_{Ziel} = 4,7</math> (Bezogen auf 1 Jahr) Schadensfolgeklasse CC2</p> <p><i>Konzepte der Zuverlässigkeitsklasse und der Schadensfolgeklasse werden in EN 1990 [28] dargestellt. Sie können miteinander verknüpft werden.</i></p>																										

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite



<p><b>Ausfallwahrscheinlichkeit/ Versagenswahrscheinlichkeit Löschanlagen</b></p> <p>Werte aus Schleich [10] S. 35 Tabelle 5.6</p> <table border="0"> <tr><td>Sprinkler</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>Sprinkler mit einfacher Versorgung</td><td>0,01</td></tr> <tr><td>Sprinkler mit zweifacher Versorgung</td><td>0,005</td></tr> <tr><td>Wärmemelder</td><td>0,25</td></tr> <tr><td>Rauchwarnmelder</td><td>0,0625</td></tr> </table> <table border="0"> <tr><td>Werkfeuerwehr</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>Externe Feuerwehr</td><td>0,1</td></tr> </table>	Sprinkler	0,02	Sprinkler mit einfacher Versorgung	0,01	Sprinkler mit zweifacher Versorgung	0,005	Wärmemelder	0,25	Rauchwarnmelder	0,0625	Werkfeuerwehr	0,02	Externe Feuerwehr	0,1	<p><b>Ausfallwahrscheinlichkeit/ Versagenswahrscheinlichkeit Löschanlagen</b></p> <p>Gemäß Tabelle BB.4</p> <table border="0"> <tr><td>Sprinkleranlagen nach VdS/CEA</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>Sprinkleranlagen (andere Fälle)</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Sonstige Wasserlöschanlagen</td><td>0,10</td></tr> <tr><td>Gaslöschanlagen</td><td>0,10</td></tr> </table> <table border="0"> <tr><td>Öffentliche FW &lt;15 min</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>Öffentliche FW &gt;20 min</td><td>0,5</td></tr> <tr><td>Betriebsfeuerwehr &lt;10 min (4 Staffeln)</td><td>0,02</td></tr> <tr><td>Betriebsfeuerwehr &lt;10 min (2 Staffeln)</td><td>0,05</td></tr> </table>	Sprinkleranlagen nach VdS/CEA	0,02	Sprinkleranlagen (andere Fälle)	0,05	Sonstige Wasserlöschanlagen	0,10	Gaslöschanlagen	0,10	Öffentliche FW <15 min	0,2	Öffentliche FW >20 min	0,5	Betriebsfeuerwehr <10 min (4 Staffeln)	0,02	Betriebsfeuerwehr <10 min (2 Staffeln)	0,05
Sprinkler	0,02																														
Sprinkler mit einfacher Versorgung	0,01																														
Sprinkler mit zweifacher Versorgung	0,005																														
Wärmemelder	0,25																														
Rauchwarnmelder	0,0625																														
Werkfeuerwehr	0,02																														
Externe Feuerwehr	0,1																														
Sprinkleranlagen nach VdS/CEA	0,02																														
Sprinkleranlagen (andere Fälle)	0,05																														
Sonstige Wasserlöschanlagen	0,10																														
Gaslöschanlagen	0,10																														
Öffentliche FW <15 min	0,2																														
Öffentliche FW >20 min	0,5																														
Betriebsfeuerwehr <10 min (4 Staffeln)	0,02																														
Betriebsfeuerwehr <10 min (2 Staffeln)	0,05																														
<p><b>Bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall</b></p> <p><math>p_{f,fi} = p_t/p_{acc}</math>  <math>p_t</math> Zielzuverlässigkeit  <math>p_{acc}</math> Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes</p> <p><math>p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}</math> gemäß Schleich 2001 S.33  <math>p_{acc} = p_{fi} = 5 \cdot 10^{-7}</math></p> <p>für <math>\delta_{q1}</math> (Brandentstehungsgefahr in Abhängigkeit der Brandraumgröße) immer <math>p_{fi} = 5 \cdot 10^{-7}</math>  für <math>\delta_{q2}</math> in Abhängigkeit der Nutzungen nach Cajot/Schleich 1997 S.419</p> <table border="0"> <tr><td>Museum</td><td><math>0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}</math></td></tr> <tr><td>Hotel (Ref.)</td><td><math>1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}</math></td></tr> <tr><td>Engine</td><td><math>10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}</math></td></tr> <tr><td>Chemical</td><td><math>100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}</math></td></tr> <tr><td>Paints</td><td><math>1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}</math></td></tr> </table> <p>Zuverlässigkeitsindex <math>\beta_{fi}</math>  <math>\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_t/p_{acc}) = -\Phi^{-1}(p_{f,fi})</math></p>	Museum	$0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}$	Hotel (Ref.)	$1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}$	Engine	$10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}$	Chemical	$100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}$	Paints	$1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}$	<p><b>Bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall</b></p> <p><math>p_{f,fi} = p_t/p_{fi}</math>  <math>p_f</math> zulässige Versagenswahrscheinlichkeit  <math>p_{fi}</math> jährl. Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes</p> <p><math>p_f</math> gemäß Tabelle BB.5 in Abhängigkeit der Nutzung und Schadensfolgenklassen CC1 (gering), CC2 (mittel), CC3 (hoch)  <math>p_{fi}</math> gemäß Tabelle BB.3 in Abhängigkeit der Nutzung</p> <p>Zuverlässigkeitsindex <math>\beta_{fi}</math>  <math>\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi})</math></p>																				
Museum	$0,1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-8}$																														
Hotel (Ref.)	$1 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-7}$																														
Engine	$10 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-6}$																														
Chemical	$100 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-5}$																														
Paints	$1000 \cdot (5 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^{-4}$																														
<p><b>Teilsicherheitsbeiwert/Sicherheitsfaktor</b></p> <p><math>\gamma_{fi}</math></p> $= 1,05 \frac{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,577 + \ln(-\ln(\phi(\alpha \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,577 + \ln(-\ln(0.8))]}$ <p>V= 0,3 Variationskoeffizient  <math>\alpha = 0,9</math> Sensitivitätsfaktor  <math>\beta_{fi}</math> Zuverlässigkeitsindex</p>	<p><b>Teilsicherheitsbeiwert</b></p> <p><math>\gamma_{fi}</math></p> $= \frac{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\phi(\alpha \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot 0,78 \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0.9))]}$ <p>V= 0,3 (bzw. 0,2) Variationskoeffizient  <math>\alpha = 0,6</math> Sensitivitätsfaktor  <math>\beta_{fi}</math> Zuverlässigkeitsindex</p>																														

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite



<p><b>Anwendung</b> Sicherheitsfaktoren <math>\delta_{q1}</math>, <math>\delta_{q2}</math>, <math>\delta_{q3}</math> und <math>\delta_n</math> aus Tabellen herauslesen Tabelle E.1, E.2 und E.3 in Abhängigkeit der Nutzung, der Brandraumgröße, der anlagentechnischen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen sowie der Zuverlässigkeitsklasse RC</p>	<p><b>Anwendung</b> Teilsicherheitsbeiwerte <math>\gamma_{fi,q}</math> und <math>\gamma_{fi,Q}</math> werden unter Anwendung von BB.2 sowie den Angaben aus BB.5 berechnet in Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes, der Nutzung, der anlagentechnischen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen sowie der Schadensfolgeklassen CC</p>
---	---

Um eine Aussage über das Sicherheitsniveau des Sicherheitskonzeptes des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] zu tätigen, wird das Sicherheitskonzept nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] als Referenz verwendet. Für die Berechnung der Sicherheitsfaktoren bzw. Teilsicherheitsbeiwerte wird, wie in Tabelle 3-11 dargestellt, der Zuverlässigkeitsindex im Brandfall berücksichtigt. Der Zuverlässigkeitsindex wird mit der Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung aus der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall  $p_{f,fi}$  berechnet (vgl. Gleichung (3.18)). Die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit berechnet sich aus Division der Zielversagenswahrscheinlichkeit  $p_t$  und der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes  $p_{fi}$ . Im Sicherheitskonzept gemäß Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] wird die Zielversagenswahrscheinlichkeit mit  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  (Zuverlässigkeitsklasse RC 2 nach DIN EN 1990 [28]) festgelegt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes wird in Abhängigkeit einer Referenznutzung (Büro, Hotel, Schule) mit  $5,0 \cdot 10^{-7}$  bestimmt. Beim Sicherheitskonzept nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] kann die Zielversagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Nutzung nach Tabelle BB.5 bestimmt werden, wobei zwischen den Schadensfolgeklassen CC1, CC2 und CC3 nach DIN EN 1990 [28] unterschieden werden kann. Für die Nutzung Schule oder Hotel ist unter der Annahme einer mittleren Schadensfolge die Zielversagenswahrscheinlichkeit  $p_t = p_f = 1,3 \cdot 10^{-6}$ . Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes  $p_{fi}$  wird unter Berücksichtigung der Nutzung, organisatorischer und anlagentechnischer Maßnahmen berechnet.

Für ausgewählte Nutzungen unter Variation der Brandraumgröße wurden für beide Sicherheitskonzepte die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall  $p_{f,fi}$  und der Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  bestimmt. Die Ergebnisse für die Schadensfolgeklasse CC 2 bzw. Zuverlässigkeitsklasse RC 2 sind in Tabelle 3-12 dargestellt. Vereinfacht wurden Anlagentechnik sowie organisatorische Brandschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt.



Tabelle 3-12: Bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten im Brandfall  $p_{f,fi}$  und zugehöriger Zuverlässigkeitsindex für verschiedene Nutzungen und Brandraumgrößen  $A_f$  gemäß Schadensfolgeklasse CC 2 bzw. Zuverlässigkeitsklasse RC 2

Nutzung	$A_f$	$p_{f,fi}$		$\Delta p_{f,fi}$	$\beta_{fi}$		$\Delta \beta_{fi}$
		Anhang E	Anhang BB		Anhang E	Anhang BB	
<b>Hotel</b>	25	1,16E-01	6,50E-03	1,09E-01	1,20	2,48	1,29
	250	1,16E-02	6,50E-04	1,09E-02	2,27	3,22	0,94
	1000	2,89E-03	1,63E-04	2,73E-03	2,76	3,59	0,83
	2500	1,16E-03	6,50E-05	1,09E-03	3,05	3,83	0,78
	5000	5,78E-04	3,25E-05	5,46E-04	3,25	3,99	0,74
	10000	2,89E-04	1,63E-05	2,73E-04	3,44	4,16	0,71
<b>Museum</b>	25	1,16E+00	1,20E-02	1,14E+00	-	2,26	-
	250	1,16E-01	2,13E-03	1,14E-01	1,20	2,86	1,66
	1000	2,89E-02	7,54E-04	2,82E-02	1,90	3,17	1,28
	2500	1,16E-02	3,79E-04	1,12E-02	2,27	3,37	1,10
	5000	5,78E-03	2,26E-04	5,56E-03	2,53	3,51	0,98
	10000	2,89E-03	1,34E-04	2,76E-03	2,76	3,64	0,88
<b>Büro</b>	25	1,16E-01	1,25E-01	-9,16E-03	1,20	1,15	-0,05
	250	1,16E-02	1,57E-02	-4,15E-03	2,27	2,15	-0,12
	1000	2,89E-03	4,51E-03	-1,62E-03	2,76	2,61	-0,15
	2500	1,16E-03	1,98E-03	-8,22E-04	3,05	2,88	-0,17
	5000	5,78E-04	1,06E-03	-4,82E-04	3,25	3,07	-0,18
	10000	2,89E-04	5,68E-04	-2,79E-04	3,44	3,25	-0,19
<b>Schule</b>	25	1,16E-01	5,82E-03	1,10E-01	1,20	2,52	1,33
	250	1,16E-02	1,03E-03	1,05E-02	2,27	3,08	0,81
	1000	2,89E-03	3,66E-04	2,53E-03	2,76	3,38	0,62
	2500	1,16E-03	1,84E-04	9,73E-04	3,05	3,56	0,52
	5000	5,78E-04	1,09E-04	4,69E-04	3,25	3,70	0,45
	10000	2,89E-04	6,50E-05	2,24E-04	3,44	3,83	0,38
<b>Verkaufsstätte</b>	25	1,16E-01	7,88E-03	1,08E-01	1,20	2,41	1,22
	250	1,16E-02	7,88E-04	1,08E-02	2,27	3,16	0,89
	1000	2,89E-03	1,97E-04	2,69E-03	2,76	3,54	0,78
	2500	1,16E-03	7,88E-05	1,08E-03	3,05	3,78	0,73
	5000	5,78E-04	3,94E-05	5,39E-04	3,25	3,95	0,70
	10000	2,89E-04	1,97E-05	2,69E-04	3,44	4,11	0,67

Die quantitative Beurteilung der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall  $p_{f,fi}$  und des Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  für die Sicherheitskonzepte zeigt, dass lediglich für die Nutzung Büro geringere bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten beim Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] berechnet werden. Ansonsten liegen die bedingten Versagenswahrschein-



lichkeiten gemäß Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] unabhängig von der Nutzung und Brandraumgröße deutlich über den bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten im Brandfall nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31]. Entsprechend werden geringere Zuverlässigkeitsindizes im Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] im Vergleich zu DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] ermittelt. Der Sicherheitsabstand zur Zielzuverlässigkeit ist somit geringer.

Die Ergebnisse für die bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten im Brandfall  $p_{f,fi}$  und den Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] für verschiedene Nutzungen (exemplarisch  $A_f = 2.500 \text{ m}^2$ , CC2 bzw. RC2) zeigen die folgenden Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3.

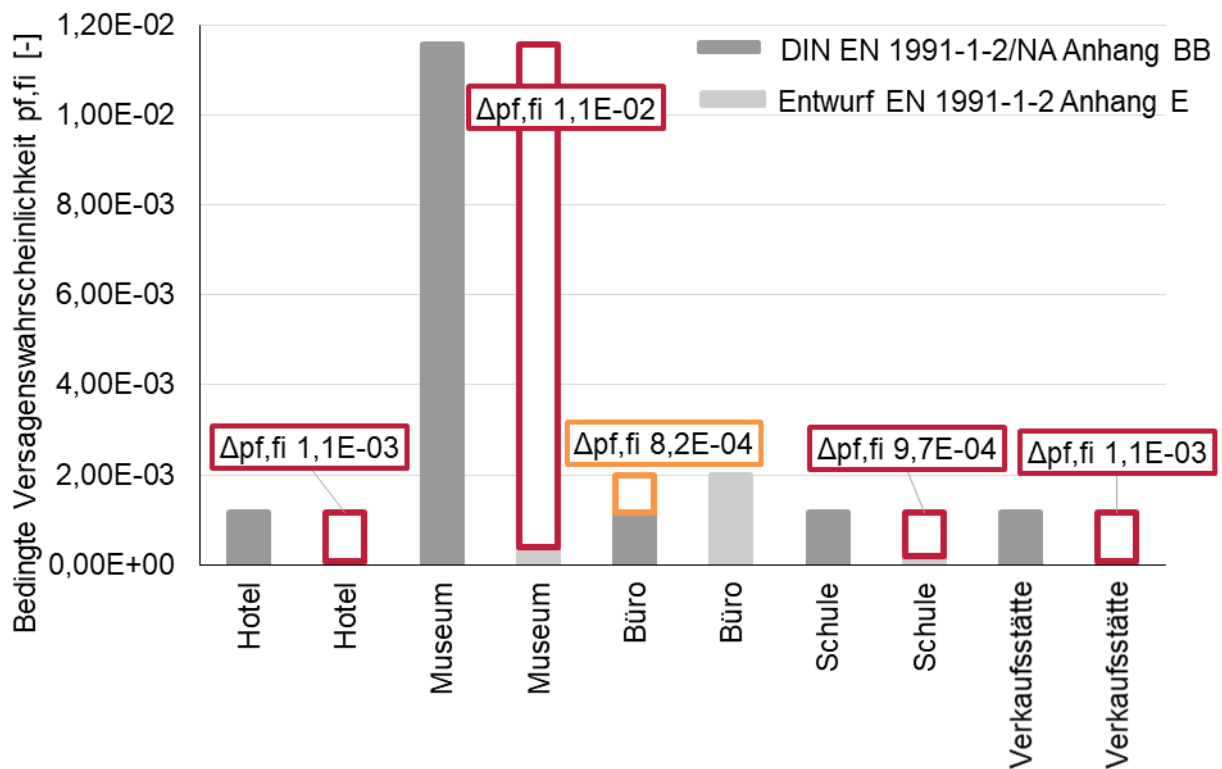


Abbildung 3-2: Bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten im Brandfall  $p_{f,fi}$  nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] für verschiedene Nutzungen ( $A_f = 2.500 \text{ m}^2$ , CC2 bzw. RC2)

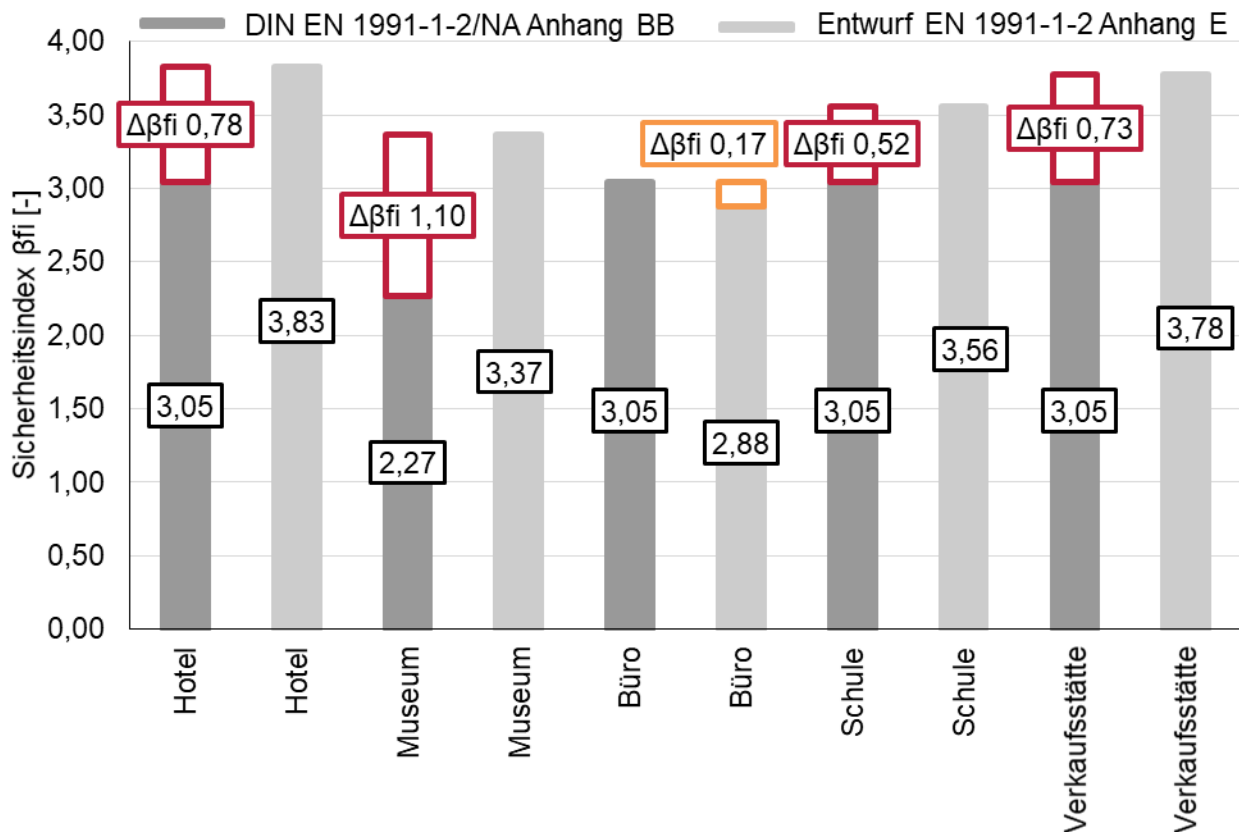


Abbildung 3-3: Zuverlässigkeitsindex im Brandfall  $\beta_{fi}$  nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] für verschiedene Nutzungen ( $A_f = 2500 \text{ m}^2$ , CC2 bzw. RC2)

Die Ergebnisse für ausgewählte Nutzungen mit Brandraumgrößen von 25 - 10.000 m<sup>2</sup> zeigen, dass das Sicherheitskonzept nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] im Vergleich zum Sicherheitskonzept nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] höhere bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_{f,fi}$  entsprechend geringere Zuverlässigkeitsindizes  $\beta_{fi}$  berechnet.

Aufgrund des Vergleichs von  $p_{f,fi}$  und  $\beta_{fi}$  ergeben sich für die Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] geringere Werte und für die Sicherheitsfaktoren gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] höhere Werte. **Das Sicherheitskonzept nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] ist demnach konservativer.** Das Sicherheitskonzept des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] kann aufgrund des Vergleiches  $p_{f,fi}$  und  $\beta_{fi}$  nicht zum gleichen Sicherheitsniveau wie DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] führen.



### 3.8 Auswahl der charakteristischen Brandlastdichte

Die Bestimmung des Bemessungswerts der Brandlastdichte basiert gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] auf dem 90 % Quantilwert der charakteristischen Brandlastdichte. Der Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] hingegen basiert auf dem kleineren 80 % Quantilwert der charakteristischen Brandlastdichte. Tabelle 3-13 vergleicht die charakteristischen und bemessungsrelevanten Brandlastdichten für das Büro (Zeilen A-C) und die Verkaufsstätte (Zeile D). Die Werte gemäß NA Anhang BB [31] basieren dabei auf dem 90 % Quantilwert. Für den Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] wurden Bemessungswerte ausgehend sowohl für den 80 % als auch den 90 % Quantilwert berechnet.

*Tabelle 3-13: Vergleich der Brandlastdichten in [MJ/m<sup>2</sup>] ausgehend vom 90 % bzw. 80 % Quantil für das Büro (A normal, B erhöhte Brandlast, C geringe Brandlast) und die Verkaufsstätte (D)*

	NA Anhang BB [31] 90 % Quantilwert	Entwurf EN 1991-1-2 An- hang E [1] 80 % Quantilwert	Entwurf EN 1991-1-2 An- hang E [1] 90 % Quantilwert
char. Brandlastdichte $q_{f,k}$	584	511	584
<b>A</b> Bemessungswert Brandlast- dichte $q_{f,d}$	498	363	415
Verhältnis Bemessungswert $q_{f,d}$ / char. Brandlastdichte $q_{f,k}$	85 %	71 %	71 %
$q_{f,k}$	1034	905	1034
<b>B</b> $q_{f,d}$	882	642	734
$q_{f,d} / q_{f,k}$	85 %	71 %	71 %
$q_{f,k}$	286	250	286
<b>C</b> $q_{f,d}$	244	177	203
$q_{f,d} / q_{f,k}$	85 %	71 %	71 %
$q_{f,k}$	835	730	835
<b>D</b> $q_{f,d}$	827	486	556
$q_{f,d} / q_{f,k}$	99 %	67 %	67 %

Es wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Bemessungswert und charakteristischer Brandlastdichte für den Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] bei sonst konstanten Randbedingungen unabhängig vom gewählten Quantilwert ist (vgl. Tabelle 3-13). Der Bemessungswert gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31], basierend auf dem 90 % Quantil, ist in den



untersuchten Fällen immer größer als der Bemessungswert gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1].

Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Bemessungswerten gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] basierend auf dem 80 % bzw. 90 % Quantilwert (vgl. Tabelle 3-13), werden für die systematischen Vergleichsrechnungen in Abschnitt 4 die Werte basierend auf dem 80 % Quantilwert verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass Anwender des Verfahrens des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] die dort enthaltenen 80 % Quantilwerte als Grundlage heranziehen. Für die DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] werden die dort aufgelisteten 90 % Quantilwerte verwendet.



## 4 Systematische Vergleichsrechnungen

### 4.1 Vorbemerkung

Zur Beurteilung der Auswirkungen der unterschiedlichen Sicherheitskonzepte werden in diesem Kapitel systematische Vergleichsrechnungen an ausgewählten Beispielen aus der Literatur durchgeführt. Die ausgewählten Beispiele basieren auf den Untersuchungen von Hosser et al. [14] und Schaumann et al. [15]. Die zugrunde gelegten Parameter bilden die Grundlage für die Ermittlung der Wärmefreisetzungsraten und thermischen Einwirkungen der Temperaturzeitkurven für unterschiedliche Naturbrandszenarien. In diesem Zusammenhang werden zunächst die Parameter der systematischen Vergleichsrechnungen erläutert, bevor die Temperaturzeitkurven des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] und des Nationalen Anhangs der DIN EN 1991-1-2 [31] berechnet und vergleichend bewertet werden. Mit den berechneten Temperaturzeitkurven der Naturbrände für die beiden Sicherheitskonzepte wird anschließend das Erwärmungs- und Tragverhalten der betrachteten Bauteile in den unterschiedlichen Nutzungen berechnet. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse der systematischen Vergleichsrechnung prägnant zusammengefasst.

### 4.2 Zusammenstellung der Konfigurationen

Die für die systematischen Vergleichsrechnungen gewählten Gebäude bzw. Nutzungen sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Des Weiteren sind in Tabelle 4-1 die wesentlichen Informationen zu den systematischen Vergleichsrechnungen angegeben. Die Parameterauswahl für die Berechnung der Büronutzung sowie der Garage erfolgte in Anlehnung an Schaumann et al. [15] und die Parameter der Verkaufsstätte bzw. Versammlungsstätte wurden entsprechend Hosser et al. [14] gewählt. Als ein weiteres Beispiel für den Holzbau wurde eine Versammlungsstätte mit der Grundfläche  $A = 200 \text{ m}^2$  untersucht. Mit dieser Vorgehensweise wird der Einfluss der unterschiedlichen Sicherheitskonzepte für jeden Baustoff (Stahl, Beton, Holz) für mindestens zwei Nutzungen abgebildet. Die gewählten Gebäude repräsentieren reale bzw. realitätsnahe Gebäudenutzungen, bei denen die Anwendung der hier untersuchten Ingenieurmethoden in der Praxis üblicherweise verwendet wird. Die Ventilationsöffnungen wurden immer so festgelegt, dass sich ein brandlastgesteuerter Brandverlauf einstellt. Dies entspricht zum einen den Vorgaben von Hosser et al. [14]. Zum anderen ermöglicht es den Einfluss der Brandlastdichte auf den Brandverlauf ungeachtet der Ventilationsbedingungen zu beurteilen.



Tabelle 4-1: Ausgewählte Gebäudenutzung für die systematische Vergleichsrechnung

Gebäude- nutzung	Grundflä- che A [m <sup>2</sup> ]	Ventilations- öffnung A <sub>w</sub> [m <sup>2</sup> ]	Geschoss- Höhe [m]	In Anleh- nung an (Quelle)	Betrachteter Baustoffe <sup>(1)</sup>
Büro	350,0	74,0	3,0	[15]	H, S, Stb, V
Verkaufs- stätte	200,0	27,8	3,0	[14]	Stb, V
Versamm- lungsstätte <sup>(2)</sup>	200,0	55,5	3,0	[14]	H, S

(1) H = Holz, S = Stahl, Stb = Stahlbeton, V = Verbund

(2) Kleine Multifunktionshalle einer Schule für Sport, Konzerte, Schulaufführungen, etc.

Für die entsprechenden Gebäudenutzungen werden die Querschnitte für die betrachteten Baustoffe aus den Untersuchungen von Hosser et al. [14] und Schaumann et al. [15] verwendet respektive basierend auf den Untersuchungen von Hosser et al. [14] und Schaumann et al. [15] werden entsprechende Bauteilquerschnitte abgeleitet. Die Bauteilquerschnitte für die Gebäudenutzungen und den entsprechenden Baustoff sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Die vergleichende Betrachtung zum Tragverhalten infolge der Sicherheitskonzepte des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und des Nationalen Anhangs der DIN EN 1991-1-2 Anhang BB [31] erfolgt anhand von Einfeldträgersystemen. Die Systemlängen und die Lasten der jeweiligen Gebäudenutzungen sind ebenfalls in Tabelle 4-2 dargestellt. Bei der Betrachtung werden Stützen aufgrund der Problematik der Stabilität nicht weiter betrachtet. Die Berechnung der Einwirkungen im Brandfall erfolgt gemäß DIN EN 1990 [28] unter Berücksichtigung der Nationalen Regelungen für die quasi-ständige Einwirkungskombination. Im Nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2 [31] wird festgelegt, dass in der Regel die quasi-ständige Einwirkungskombination (Verwendung des Kombinationsbeiwertes  $\psi_{2,1}$ ) verwendet werden soll. Die maßgebende Einwirkung für das entsprechend statische System der Gebäudenutzung ist in Tabelle 4-2 dargestellt. Für alle Bauteile wird eine dreiseitige Beflammung von unten angesetzt.



Tabelle 4-2: Übersicht über die Systemdaten der einzelnen Referenzgebäudekategorien

Gebäudekategorie	Querschnitt	Systemlänge der Träger	Lasten
Büro	<b>Verbundträger</b> mit ungeschütztem <i>HEB220</i> Profil (S355) und einem <i>Betongurt</i> mit einer Höhe von 16 cm (C20/25)	7,5 m mit einer Lasteinzugsfläche von 5,0 m	$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 28,2 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 25 \frac{kN}{m}$ $= 35,7 \frac{kN}{m} \quad (1)$
	<b>Stahlträger</b> mit geschütztem <i>HEA400</i> Profil (S235) und einer kastenförmigen Bekleidung mit einer Dicke $d_p$ von 19 mm		$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 25,0 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 25 \frac{kN}{m}$ $= 32,5 \frac{kN}{m} \quad (2)$
	<b>Stahlbetonträger</b> aus C30/37 Normalbeton, 20 cm breit, 60 cm hoch, Bewehrung 2d28	7,5 m mit einer Lasteinzugsfläche von 2,0 m	$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 4,0 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 10 \frac{kN}{m}$ $= 7,0 \frac{kN}{m} \quad (2)$
	<b>Holz balken</b> aus Brett-schichtholz (GL24h), 18 cm breit, 38 cm hoch		$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 16,2 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,6 \cdot 12,5 \frac{kN}{m}$ $= 23,7 \frac{kN}{m} \quad (2)$
Verkaufs-stätte	<b>Verbundträger</b> mit ungeschütztem <i>HEB220</i> Profil (S355) und einem <i>Betongurt</i> mit einer Höhe von 16 cm (C20/25)	5,0 m mit einer Lasteinzugsfläche von 5,0 m	$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 25,0 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 25 \frac{kN}{m}$ $= 32,5 \frac{kN}{m} \quad (2)$
	<b>Stahlbetonträger</b> aus C30/37 Normalbeton, 30 cm breit, 90 cm hoch, Bewehrung 6d20		$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 16,7 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,6 \cdot 12,5 \frac{kN}{m}$ $= 24,2 \frac{kN}{m} \quad (2)$
Versamm-lungsstätte	<b>Stahlträger</b> mit ge-schütztem <i>HEA400</i> Pro-fil (S235) und einer kas-tenförmigen Bekleidung mit einer Dicke $d_p$ von 19 mm		$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 16,7 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,6 \cdot 12,5 \frac{kN}{m}$ $= 24,2 \frac{kN}{m} \quad (2)$

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite



Gebäude-kategorie	Querschnitt	Systemlänge der Träger	Lasten
Versamm-lungsstätte	<b>Holz balken</b> aus Brett-schichtholz (GL28h), 20 cm breit, 60 cm hoch	5,0 m mit einer Lasteinzugs-fläche von 5,0 m	$q_{Ed,fi} = \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$ $= 1,0 \cdot 10,0 \frac{kN}{m} + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 25 \frac{kN}{m}$ $= 17,5 \text{ kN/m}^{(2)}$

- (1) Bei der Berechnung der Einwirkung im Brandfall infolge des Eigengewichts  $g_k$  werden die Anteile des Estrichs, der Dämmung, dem Belag, der Installation und der einzelnen Querschnittsteile berücksichtigt. Bei der Nutzlast wird die Kategorie B3 gemäß DIN EN 1991-1-1/NA [29] mit  $q_k$  von 5 kN/m<sup>2</sup> zu Grunde gelegt.  
Die Belastung des Systems erfolgte in Anlehnung an Schaumann et al. [15]
- (2) Die Einwirkung berücksichtigt das Eigengewicht des Bauteils, Lasten aus Installationen von 1 kN/m<sup>2</sup>, einen Trennwandzuschlag von 1,2 kN/m<sup>2</sup> und eine Nutzlast der Kategorie C/D von 5,0 kN/m<sup>2</sup> gemäß DIN EN 1991-1-1/NA [29].  
Die Belastung des Systems erfolgte in Anlehnung an Hosser et al. [14]

### 4.3 Berechnung der Brandeinwirkung

Zur Bestimmung der Brandeinwirkung auf die einzelnen Bauteile wurden für die zu untersuchenden Gebäudenutzungen zunächst Bemessungswerte der Brandlastdichten sowie daraus resultierende Wärmefreisetzungsraten ermittelt. Die Berechnung erfolgte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [30] und gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] mit einem Tabellenkalkulationsprogramm. Die Bemessungswerte der Brandlastdichte für die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Gebäudenutzungen können Abbildung 4-1 entnommen werden. Für das Büro wurden drei unterschiedliche Varianten berechnet:

- „Normales“ Büro mit einer charakteristischen Brandlastdichte von  $q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$  (80 %-Quantil, Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]) bzw.  $q_{f,k} = 584 \text{ MJ/m}^2$  (90 % Quantil, DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [30]),
- Büro mit geringer Brandlast („sparsely loaded“),  $q_{f,k} = 250 \text{ MJ/m}^2$  (80 % Quantil, Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]),
- ein Büro hoher Brandlast („densely loaded“),  $q_{f,k} = 905 \text{ MJ/m}^2$  (80 % Quantil, Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]).

Da in DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [30] Angaben zu der Nutzung Büro mit geringer Brandlast und Büro mit hoher Brandlast noch nicht geregelt sind (vgl. Abschnitt 3.5), wurden diese aus dem Verhältnis der gegebenen Brandlastdichten in „normalen“ Büros abgeleitet (vgl. Abbildung 4-2).



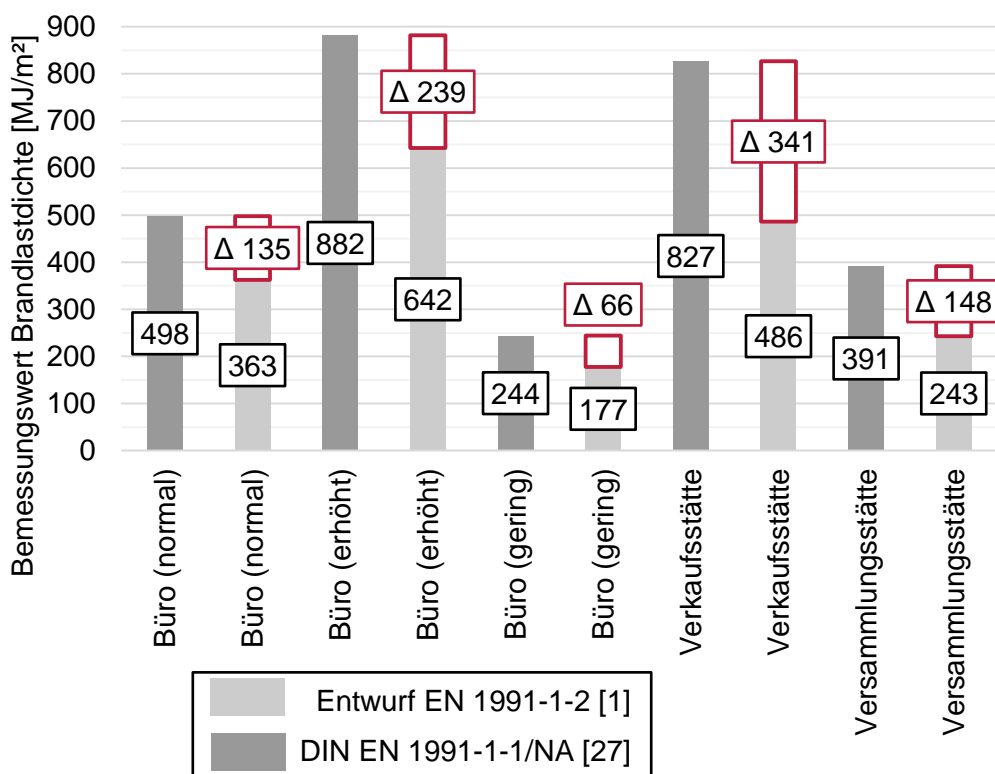


Abbildung 4-1: Bemessungswerte der Brandlastdichte für die ausgewählten Nutzungen

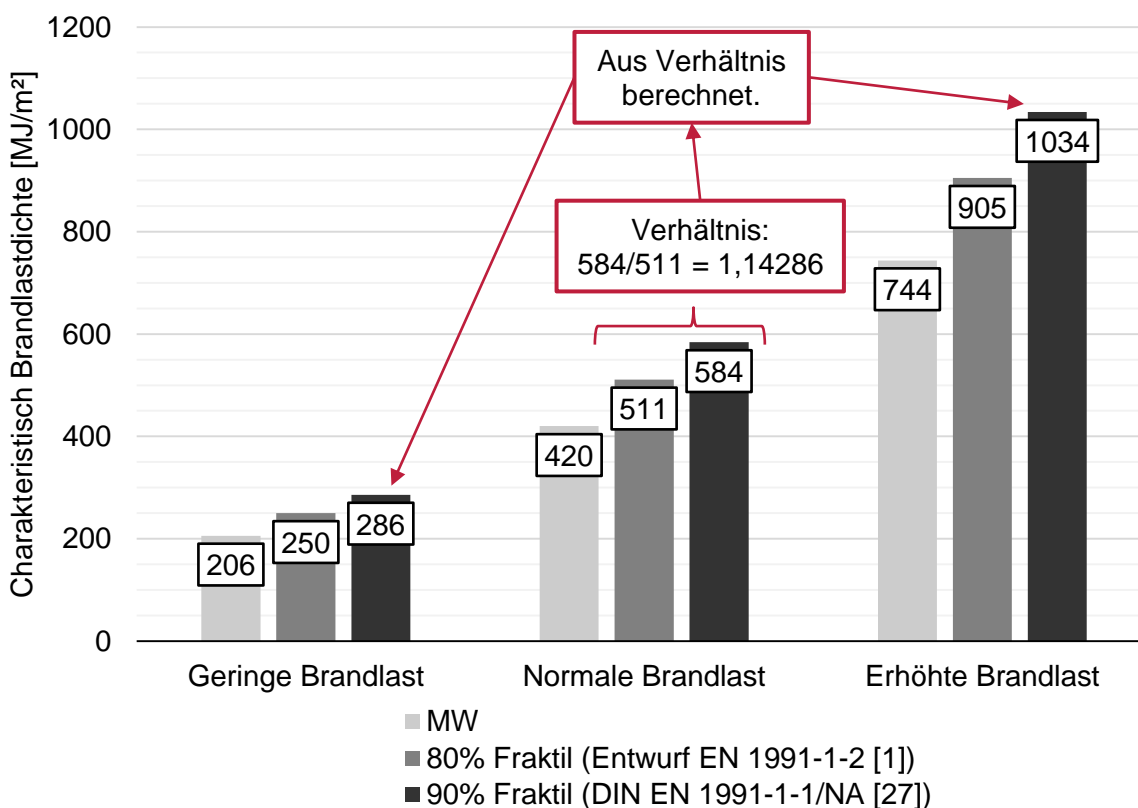


Abbildung 4-2: Herleitung 90 % - Quantilwert für niedrige und hohe Brandlastdichten in Büros

Die ermittelten Wärmefreisetzungsraten dienen als Eingangsgrößen für Brandsimulationen mit dem Zonenmodell CFAST [45]. Mit CFAST wurden Heißgastemperaturen bestimmt. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe in der Heißgasschicht des Büroraumes. Die Temperaturen nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] steigen jeweils länger an als nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]. Die Temperaturen für das Büro mit normaler Brandlast erreichen größere Werte als für das brandlastreduzierte Büro. Die größten Temperaturen werden für das Büro mit erhöhter Brandlast erzielt. Dies entspricht den erwarteten Verläufen für brandlastgesteuerte Brände bei den vorliegenden Randbedingungen. Die Temperaturen verhalten sich analog zu den in Abbildung 4-1 dargestellten Bemessungswerten der Brandlastdichten.

$$(T_{\max,[1]} < T_{\max,[30]})_{\text{gering}} < (T_{\max,[1]} < T_{\max,[30]})_{\text{normal}} < (T_{\max,[1]} < T_{\max,[30]})_{\text{erhöht}}$$

[1]: Entwurf EN 1991-1-2

[31]: DIN EN 1991-1-2/NA

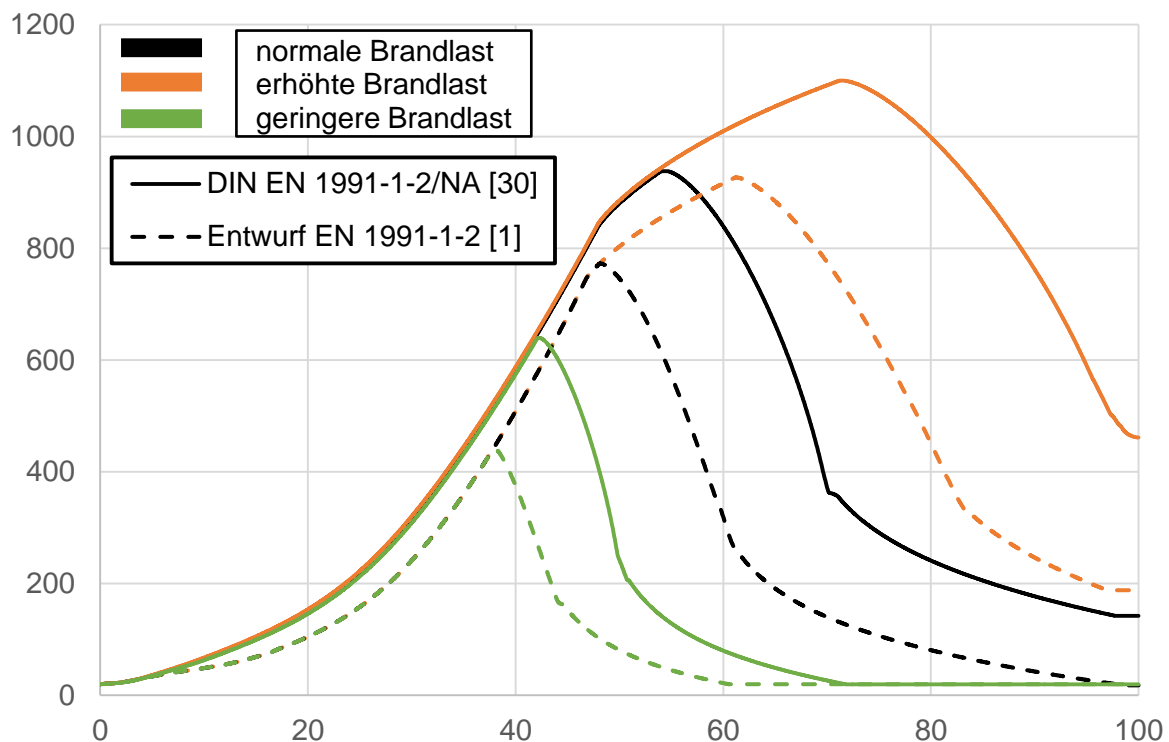


Abbildung 4-3: Mit CFAST ermittelter Temperaturverlauf in der Heißgasschicht (Büro)



## 4.4 Vergleichsrechnungen anhand von Praxisbeispielen

### 4.4.1 Allgemeines

Basierend auf den ermittelten Naturbrandkurven der unterschiedlichen Sicherheitskonzepte gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] werden deterministische Vergleichsrechnungen mit Referenzbauteilen aus Praxisbeispielen durchgeführt. Dazu werden im Folgenden zunächst die Randbedingungen der thermischen und mechanischen Simulationen erläutert. Im Anschluss werden die Vergleichsrechnungen den entsprechenden Bauteilen (Stahlträger, Verbundträger, Stahlbetonträger, Holzträger) der jeweiligen Nutzung analysiert und bewertet.

Grundlage für die mechanische Berechnung des Tragverhaltens der entsprechenden Konfiguration ist ein Einfeldträgersystem mit den in Tabelle 4-2 angegebenen Systemlängen. Die Abmessungen und Materialeigenschaften der einzelnen Querschnittsteile sind ebenfalls in Tabelle 4-2 dargestellt. Die Querschnitte der Tabelle 4-2 in Stahl-, Verbund- und Stahlbetonbauweise sind die Basis für die thermischen und mechanischen Simulationen. Die thermischen und darauf aufbauende mechanischen Simulation werden mit den Programmen SAFIR [43] (Stahl- und Verbundbau) und InfoCAD [44] (Stahlbetonbau) durchgeführt. Für die Holzbauteile nach Tabelle 4-2 wird das vereinfachte Verfahren (*Methode mit reduziertem Querschnitt*, Nachweis auf Beigedrillknicken) gemäß DIN EN 1995-1-2 [38] angewendet (vgl. Abschnitt 4.4.4).

Für die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung werden die entsprechenden Kennwerte gemäß DIN EN 1991-1-2 [30] definiert. Dabei erfolgt die Definition der Konvektion mit einem Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c = 35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  und die Strahlung mit einer Emissivität  $\epsilon = 0,7$ . Die Implementierung der thermischen und mechanischen Materialeigenschaften in den numerischen Modellen erfolgt für Stahl gemäß DIN EN 1993-1-2 [34] bzw. DIN EN 1994-1-2 [36], für Beton gemäß DIN EN 1992-1-2 [33] bzw. DIN EN 1994-1-2 [36] und für Holz gemäß DIN EN 1995-1-2 [38]. Für Beton wird die obere Funktion der Wärmeleitfähigkeit verwendet und eine Betonfeuchte von 3 % angesetzt. Bei den thermischen Analysen mit den Brandschutzplatten werden die thermischen Materialkennwerte für Plattenbekleidung gemäß DIN EN 1993-1-2/NA [35] angesetzt. Die Spannungs-Dehnungsbeziehungen werden gemäß DIN EN 1993-1-2 [34], DIN EN 1994-1-2 [36] und DIN EN 1995-1-2 [38] in den mechanischen Analysen angesetzt. Dies bedeutet beispielsweise, dass für den Stahl bzw. den Bewehrungsstahl ein linear elastisch - ideal plastisches Materialverhalten zu Grunde gelegt wird. Bei den mechanischen Analysen wird der Kontakt zwischen den einzelnen Teilen des Querschnitts über einen idealen Verbund realisiert, dadurch wird auf eine explizite Modellierung beispielsweise der Verbundmittel bei einem Verbundträger verzichtet.



Als Kriterium zur Bewertung der Auswirkungen der Temperaturzeitkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] auf das Tragverhalten der einzelnen Bauteile wird für die mechanischen Analysen das Abbruchkriterium gemäß DIN 1363-1 [41] zugrunde gelegt. Als Bewertungskriterium wird das Durchbiegungskriterium verwendet. Die Grenzdurchbiegung  $u_{Grenz}$  eines biegebeanspruchten Bauteils berechnet sich gemäß DIN 1363-1 [41] wie folgt:

$$u_{Grenz} = \frac{l^2}{400 \cdot d} \quad (4.1)$$

mit:

- l     Spannweite des Systems
- d     Abstand zwischen dem äußersten Rand der Druckzone und dem äußersten Rand Zugzone

Das Kriterium wird verwendet, um die Versagenszeitpunkte der verschiedenen Vergleichsrechnungen miteinander zu vergleichen.

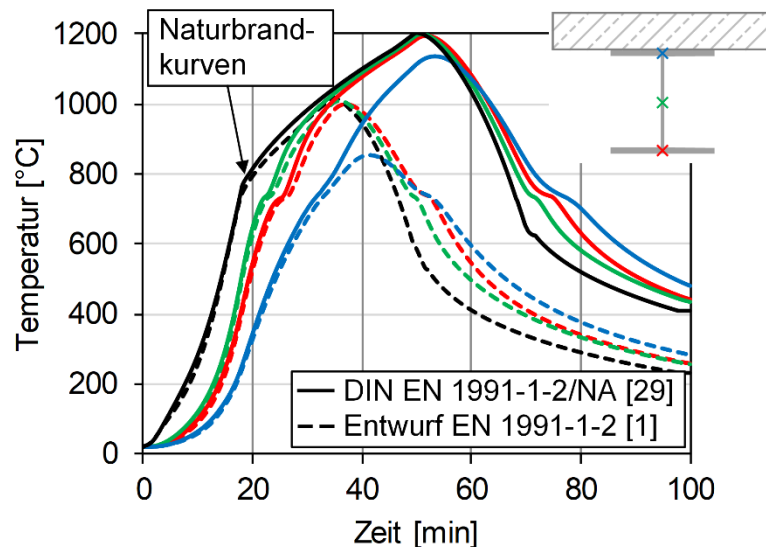
#### **4.4.2 Vergleichsrechnung mit den Stahl- und Verbundbauteilen**

Basierend auf den berechneten Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] werden die thermischen Analysen durchgeführt. Es werden ausschließlich die Temperaturen der Stahlquerschnitte der Stahlbauteile und der Verbundbauteile miteinander verglichen, da diese maßgeblich das Tragverhalten des Systems beeinflussen. Im Folgenden werden die Stahltemperaturen und das Tragverhalten der Bauteile (Stahl- und Verbundbauteile) für die exemplarischen Nutzungen (Verkaufsstätte, Büro und Versammlungsstätte) miteinander verglichen und bewertet.

##### **Verkaufsstätte - Verbundträger**

In diesem Abschnitt werden das Erwärmungsverhalten des Stahlquerschnitts des Verbundträgers und das Tragverhalten unter den Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] analysiert. In Abbildung 4-4 ist das Erwärmungsverhalten des Stahlquerschnitts des Verbundträgers bei Beanspruchung durch die Naturbrandkurven abgebildet. Durch den nahezu identischen Verlauf der Entwicklungsphase der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] unterscheiden sich die Temperaturzeitverläufe des Stahlquerschnitts des Verbundträgers in dieser Phase nicht voneinander. Die Vollbrandphase des Naturbrandes gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] hat die zweifache Dauer der Vollbrandphase der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Folglich wird der Querschnitt über einen längeren Zeitraum erwärmt, wodurch

höhere Querschnittstemperaturen unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] erreicht werden (vgl. Abbildung 4-4). Innerhalb der Betondecke des Betongurtes stellt sich ein nichtlinearer Temperaturverlauf ein.



*Abbildung 4-4: Vergleich der Temperaturzeitverläufe des ungeschützten Stahlquerschnittes des Verbundträgers unter den Naturbrandkurven der Verkaufsstätte*

Basierend auf diesen Temperaturzeitverläufen des Stahlquerschnittes unter der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] wird das Verformungsverhalten des Verbundträgers analysiert. Die zeitabhängige Verformung des Verbundträgers ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Die Auswertung der Verformung des Verbundträgers erfolgte in Feldmitte bei  $L/2$ . Durch den nahezu identischen Temperaturzeitverlauf der einzelnen Querschnittsteile des Stahlquerschnittes des Verbundträgers unterscheidet sich das Verformungsverhalten bis zur 20. Minute der Einwirkung unter der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] nicht wesentlich voneinander. Ab der ca. 20. Minute nehmen die Verformungen des Verbundträgers unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] stärker zu als unter der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der DIN EN 1991-1-2 [1], da sich das Stahlprofil infolge der Brandbeanspruchung stärker erwärmt (vgl. Abbildung 4-4). Die Verformungen infolge der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] nehmen bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums gemäß DIN 1363-1 [41] kontinuierlich zu (siehe Abbildung 4-5). Durch den nahezu identischen Verlauf der Entwicklungs- und Vollbrandphase der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist die Differenz bis zum Erreichen der Grenzdurchbiegung infolge der Naturbrandkurven gering. Die zeitliche Differenz bis zum Erreichen der Grenzdurchbiegung  $u_{\text{Grenz}}$  unter den Naturbrandkurven gemäß

DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] beträgt ca. 1 Minute (vgl. Abbildung 4-4).

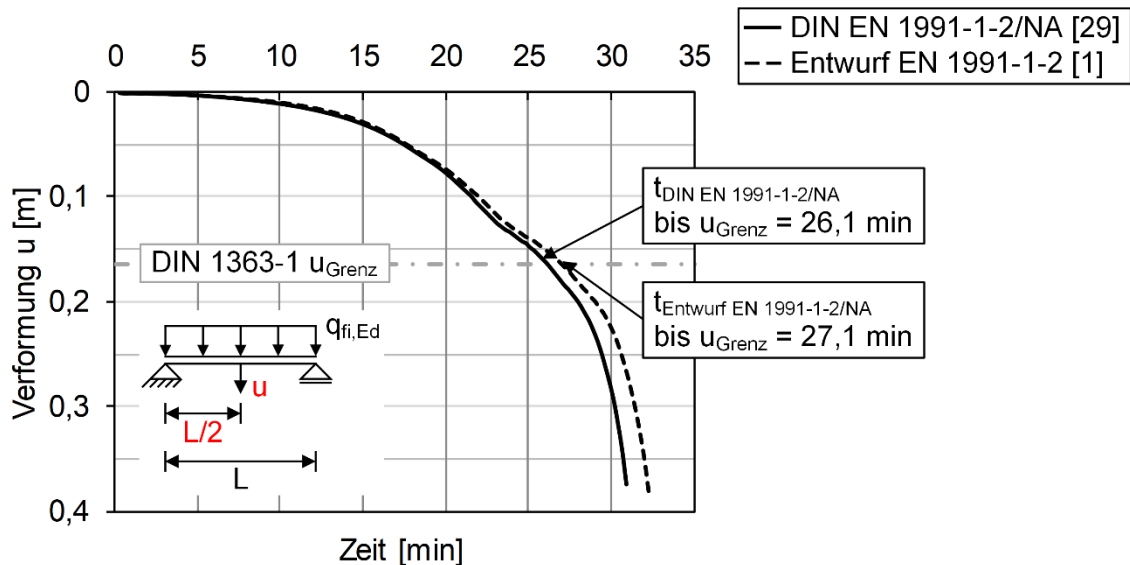


Abbildung 4-5: Zeitabhängige Verformung des Verbundträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven der Verkaufsstätte

### Versamlingsstätte - Stahlträger

Im Folgenden wird der Einfluss auf das Tragverhalten eines geschützten Stahlträgers in einer Versamlingsstätte unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] analysiert. Bei dem geschützten Stahlträger handelt es sich um ein HEA400 Profil mit einer kastenförmigen Bekleidung. Die Bekleidung des Querschnittes wurde für eine 90-minütige Feuerwiderstandsdauer gemäß Hosser et al. [14] gewählt. In Abbildung 4-6 ist das Erwärmungsverhalten des Stahlquerschnitts in einer Versamlingsstätte unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] dargestellt. Durch die längere Vollbrandphase und höhere Gastemperaturen des Naturbrandszenarios gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] erwärmt sich der Stahlquerschnitt infolge der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] stärker (siehe Abbildung 4-6).

Unter den Naturbrandkurven erwärmt sich der Stahlquerschnitt im Maximum auf ca. 175 °C (gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31]) bzw. ca. 110 °C (gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]). Durch die geringen Temperaturen des Stahlträgers wird lediglich die Steifigkeit (E-Modul) des Stahlträgers reduziert. Durch die Differenz in der Erwärmung des Querschnittes von ca. 65 °C wird das E-Modul des Stahlträgers unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] stärker reduziert, weshalb die Verformungen unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] größer sind. Dennoch wird die Grenzdurchbiegung  $u_{\text{Grenz}}$  von ca. 16 cm infolge der

Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] nicht erreicht. Lediglich die Verformungen unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] sind aufgrund der höheren Reduktion der Steifigkeit größer (vgl. Abbildung 4-7).

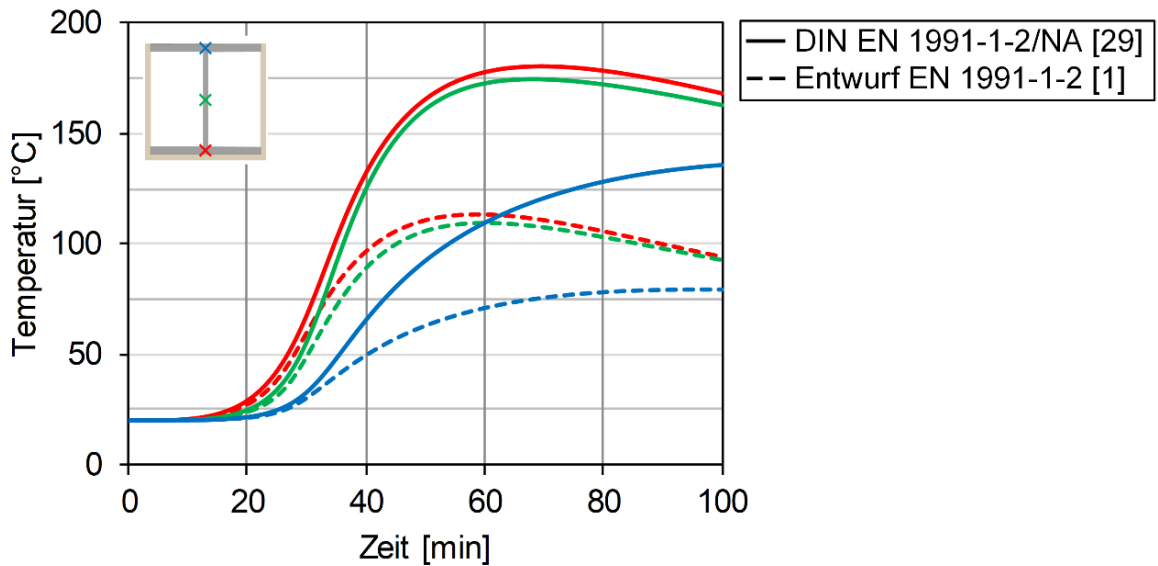


Abbildung 4-6: Vergleich der Temperaturzeitverläufe des geschützten Stahlträgers unter den Naturbrandkurven der Versammlungsstätte

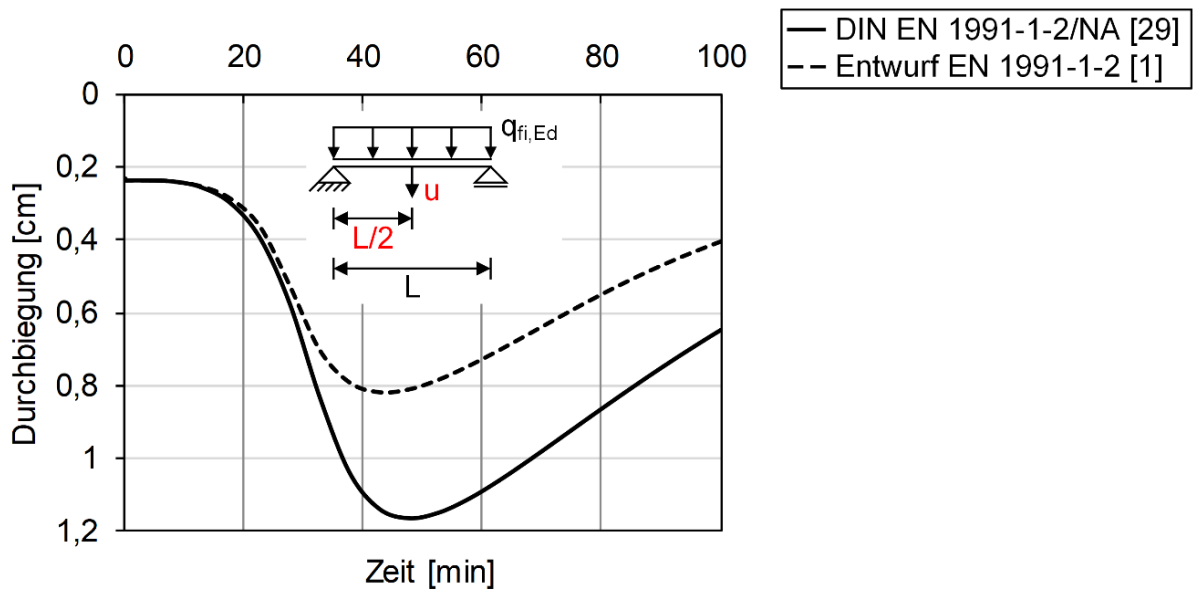


Abbildung 4-7: Zeitabhängige Verformung des geschützten Stahlträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven der Versammlungsstätte



## Bürogebäude – Verbundträger

Im Entwurf der DIN EN 1991-1-2 [1] werden für Bürogebäude Brandlastdichten für unterschiedliche Nutzungskategorien des Bürogebäudes definiert. Neben der bisherigen Brandlastdichte von 511 MJ/m<sup>2</sup> (EN 1991-1-2 [30], 80%-Quantil) bzw. 584 MJ/m<sup>2</sup> (DIN EN 1991-1-2/NA [31], 90%-Quantil) werden im Entwurf der EN 1991-1-2 [1] neue Brandlastdichten für die Nutzungskategorien Bürogebäude mit einer geringen (210 MJ/m<sup>2</sup>) und hohen Brandlastdichte (905 MJ/m<sup>2</sup>) definiert (siehe Tabelle 4-3).

*Tabelle 4-3: Quantilwerte der Brandlastdichte für das Büro gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 [1]*

Bürokategorie	Quantilwerte der Brandlastdichte in [MJ/m <sup>2</sup> ] gemäß	
	DIN EN 1991-1-2/NA [31]	Entwurf der EN 1991-1-2 [1]
Normale Brandlastdichte	584	511
Erhöhte Brandlastdichte	-	905
Geringe Brandlastdichte	-	210

Eine derartige Differenzierung der Brandlasten für Bürogebäude wird in der derzeitigen Version der DIN EN 1991-1-2/NA [31] nicht berücksichtigt. In Abbildung 4-8 werden die Temperaturzeitverläufe der Erwärmung des Stahlquerschnitts des Verbundträgers unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31], dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen und geringen Brandlastdichte dargestellt. Die höhere Brandlastdichte  $q_k$  von 584 MJ/m<sup>2</sup> der DIN EN 1991-1-2/NA [31] resultiert in einer höheren maximalen Gastemperatur und in einer längeren Vollbrandphase der Naturbrandkurve im Vergleich zu den Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen und geringen Brandlastdichte. Die größere Brandlastdichte resultiert in höheren Querschnittstemperaturen unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] (siehe Abbildung 4-8). Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen des Stahlbauteils unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte beträgt ca. 200 °C. Aufgrund der Unterscheidung im Entwurf der EN 1991-1-2 [1] zwischen einem Bürogebäude mit einer geringen und normalen Brandlastdichte wird folglich das Erwärmungsverhalten des Stahlquerschnitts des Verbundträgers beeinflusst. Unter der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer geringen Brandlastdichte werden signifikant geringere Querschnittstemperaturen im Stahlprofil des Verbundträgers erreicht. Dies ist auf die wesentlich geringere Brandlastdichte bei einem Bürogebäude in der Nutzungskategorie mit einer geringen Brandlastdichte zurückzuführen.



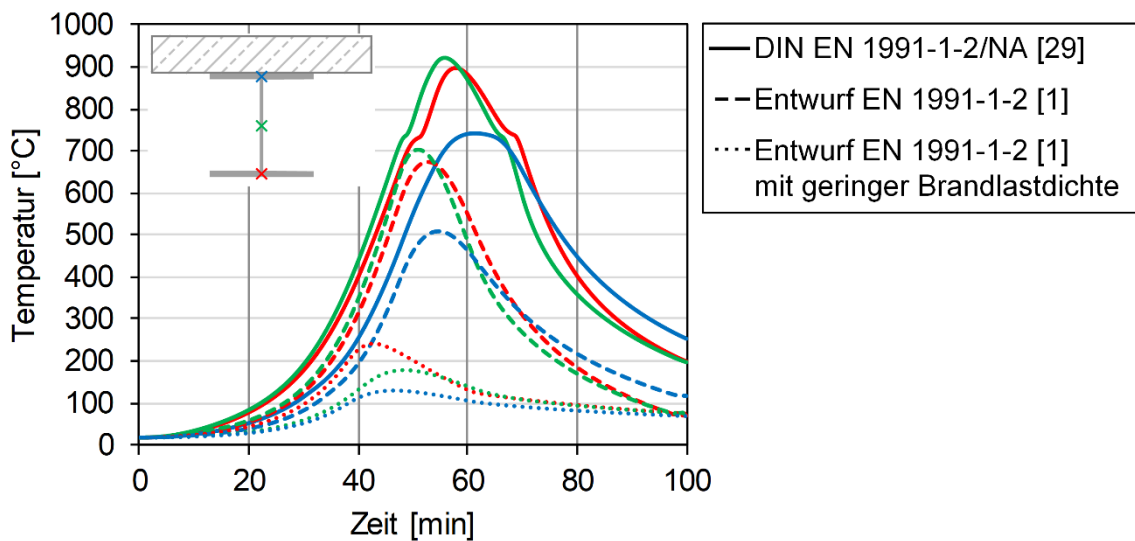


Abbildung 4-8: Vergleich der Temperaturzeitverläufe des Stahlquerschnittes des Verbundträgers unter den Naturbrandkurven des Bürogebäudes

In Abbildung 4-9 ist die zeitabhängige Verformung des Verbundträgers dargestellt. Aus dem zeitabhängigen Verlauf der Verformung unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31], dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen und geringen Brandlastdichte lassen sich drei Erkenntnisse ableiten.

1. Das Tragverhalten unter der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer geringen Brandlastdichte ist nicht kritisch für die Tragfähigkeit des Verbundträgers.
2. Unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte wird das Kriterium der Grenzdurchbiegung  $u_{\text{Grenz}}$  erreicht. Das Kriterium der Grenzdurchbiegung wird unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsphasen der Naturbrandkurven früher erreicht.
3. Das Grenzdurchbiegungskriterium wird unter der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte erreicht, allerdings tritt in den numerischen Simulationen rechnerisch kein Versagen des Verbundträgers auf. Der Verbundträger unter der Naturbrandkurve des Entwurfs der DIN EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte behält seine Tragfähigkeit infolge des Naturbrandszenarios. Dies ist im Wesentlichen auf die geringeren Querschnittstemperaturen des Stahlprofils im Vergleich zur Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] zurückzuführen (siehe Abbildung 4-8).

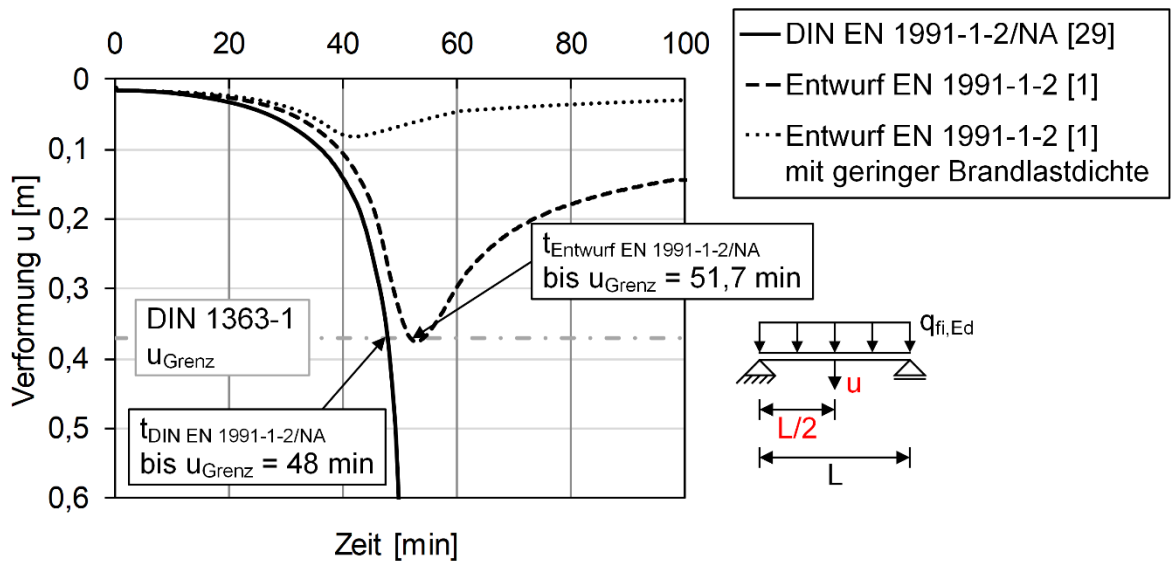


Abbildung 4-9: Zeitabhängige Verformung des Verbundträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven in Bürogebäuden

### Büro - Stahlträger

In Abbildung 4-10 ist das Erwärmungsverhalten eines geschützten Stahlträgers unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31], des Entwurfs der DIN EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen und hohen Brandlastdichte dargestellt. Unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31], dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte ist eine ähnliche Temperaturentwicklung im Stahlquerschnitt festzustellen, wie im Referenzbeispiel einer Versammlungsstätte mit einem Stahlträger. Durch die Verwendung der Gebäudenutzung Büro mit einer höheren Brandlastdichte zur Ermittlung der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] werden folglich höhere Temperaturen im Stahlquerschnitt erreicht im Vergleich zu den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte (siehe Abbildung 4-10).

Das unterschiedliche Erwärmungsverhalten unter den Naturbrandkurven ist ebenso in den zeitabhängigen Verformungen des Stahlträgers wiederzuerkennen. Mit zunehmender Brandlastdichte der Naturbrandkurven nehmen die maximalen Verformungen des Stahlträgers zu (vgl. Abbildung 4-11). Die Abweichung zwischen den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] lassen sich auf die unterschiedlichen Entwicklungsphasen der Naturbrandkurven zurückführen. Unter den Naturbrandkurven wird das Grenzdurchbiegungskriterium  $u_{\text{Grenz}}$  von 0,35 m nicht erreicht.

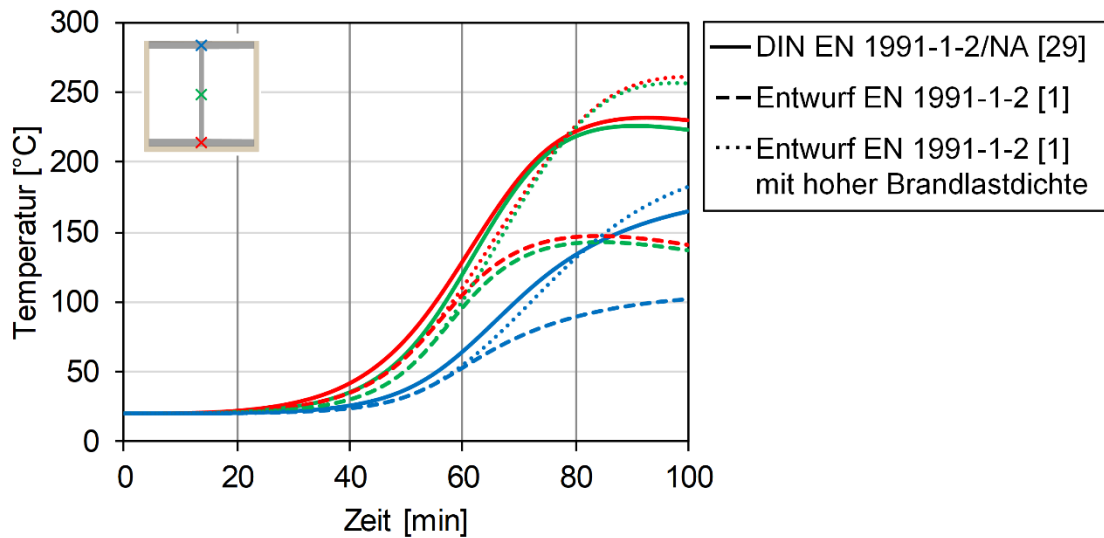


Abbildung 4-10: Vergleich der Temperaturzeitverläufe des geschützten Stahlträgers unter den Naturbrandkurven des Bürogebäudes

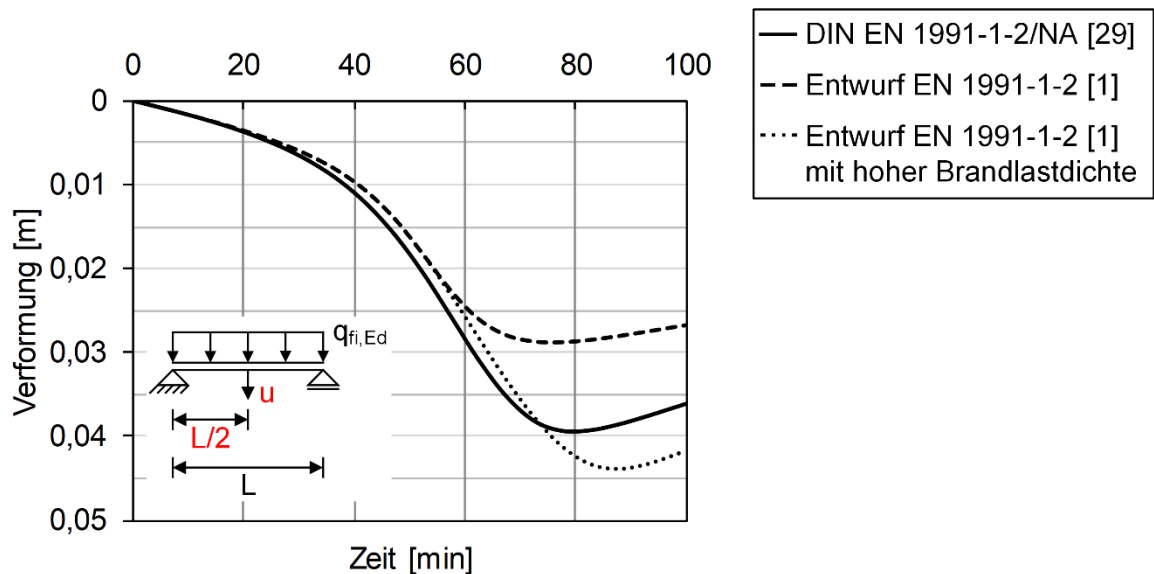


Abbildung 4-11: Zeitabhängige Verformung des geschützten Stahlträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven des Bürogebäudes

#### 4.4.3 Vergleichsrechnung mit den Stahlbetonbauteilen

Basierend auf den Naturbrandkurven gemäß der DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] werden die numerischen Simulationen mit InfoCAD [44] zur Bewertung des Einflusses auf das Tragverhalten der entsprechenden Bauteile durchgeführt. Grundlage für die



Bewertung und den Vergleich des Tragverhaltens stellt das Grenzdurchbiegungskriterium der DIN 1363-1 [41] dar. Weiterhin werden ausschließlich die Temperaturen der Längsbewehrung miteinander verglichen, da diese maßgeblich das Tragverhalten des Systems beeinflussen. Im Folgenden werden die Bewehrungstemperaturen und das Tragverhalten der Stahlbetonbauteile für die exemplarischen Nutzungen (Verkaufsstätte und Büro) miteinander verglichen und bewertet.

### Stahlbetonträger – Bürogebäude

Abbildung 4-12 zeigt die Temperaturzeitverläufe der Erwärmung der Längsbewehrung des Stahlbetonträgers unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] sowie gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1], jeweils mit einer normalen, erhöhter und geringerer Brandlastdichte (vergleiche Abschnitt 4.3). Die Verläufe der Naturbrandkurven in Abbildung 4-12 wurden zu Gunsten einer besseren Übersicht mit einer verkürzten Abkühlphase dargestellt. In allen drei Fällen liegt der Bemessungswert der Brandlastdichte für die DIN EN 1991-1-2/NA [31] über den Werten nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Die Brandlastdichten sind in der folgenden Tabelle 4-4 aufgelistet. Die Werte für erhöhte und verringerte Brandlastdichten in Büros gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] basieren auf den entsprechend Abbildung 4-2 hergeleiteten, charakteristischen Werten.

*Tabelle 4-4: Bemessungswerte der Brandlastdichte für das Büro gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 [1]*

Bürokategorie	Bemessungswert der Brandlastdichte in [MJ/m <sup>2</sup> ] gemäß	
	DIN EN 1991-1-2/NA [31]	Entwurf der EN 1991-1-2 [1]
Normale Brandlastdichte	498	363
Erhöhte Brandlastdichte	882	642
Geringe Brandlastdichte	244	177

Die größere Brandlastdichte resultiert bei identischen Randbedingungen in höheren Maximaltemperaturen der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zu den Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] (vgl. Abbildung 4-12). Dementsprechend erreicht die Bewehrung bei einer Naturbrandbeanspruchung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] eine höhere Maximaltemperatur (vgl. Abbildung 4-12). Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen der Längsbewehrung unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und der des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] mit einer normalen Brandlastdichte beträgt circa 200 K.

Aufgrund der Unterscheidung im Entwurf der EN 1991-1-2 [1] zwischen einem Bürogebäude mit einer geringen, normalen und erhöhten Brandlastdichte wird das Erwärmungsverhalten der Bewehrung des Stahlbetonträgers beeinflusst. Unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] mit einer geringen Brandlastdichte werden signifikant geringere Querschnittstemperaturen, unter den Naturbrandkurven mit erhöhter Brandlastdichte werden signifikant höhere Temperaturen in der Bewehrung des Stahlbetonträgers erreicht. Dies ist auf die wesentlich geringere beziehungsweise vergrößerte Brandlastdichte bei einem Bürogebäude in der Nutzungskategorie mit einer geringen beziehungsweise größeren Brandlastdichte zurückzuführen.

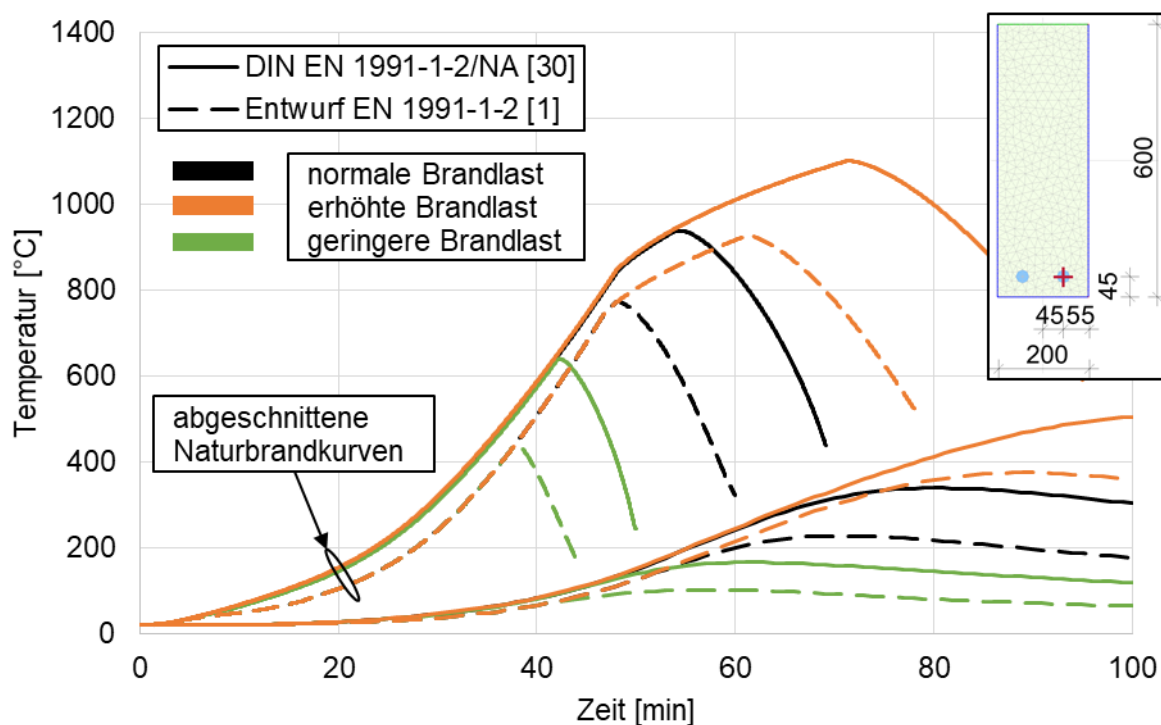


Abbildung 4-12: Vergleich der Temperaturzeitverläufe der Längsbewehrung des Stahlbetonträgers unter den Naturbrandkurven des Büros

In Abbildung 4-13 ist die zeitabhängige Verformung des Stahlbetonträgers dargestellt. Aus dem zeitabhängigen Verlauf der Verformung unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] lässt sich in Verbindung mit den vorangegangenen Erläuterungen bezüglich der Temperaturzeitverläufe (vgl. Abbildung 4-12) ableiten, dass die in allen drei Bürokatgorien größere Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] auch zu größeren Verformungen des Bauteils führt. Dies kann mit der stärkere Temperaturbeanspruchung des Bauteils aufgrund der größeren Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] begründet werden.

Die maximal zulässige Grenzdurchbiegung beträgt für den betrachteten Stahlbetonträger des Büros  $u_{\text{Grenz}} = 234 \text{ mm}$ . Abbildung 4-13 zeigt, dass für keine der insgesamt sechs betrachteten Varianten die Grenzdurchbiegung erreicht wird. Ebenso kam es in den numerischen Simulationen zu keinem rechnerischen Versagen des Stahlbetonträgers.

Zusammenfassend kann der Nationale Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2 [31] für das beschriebene Bauteil in allen drei Bürokategorien als konservativer im Vergleich zum Entwurf der EN 1991-1-2 [1] bewertet werden.

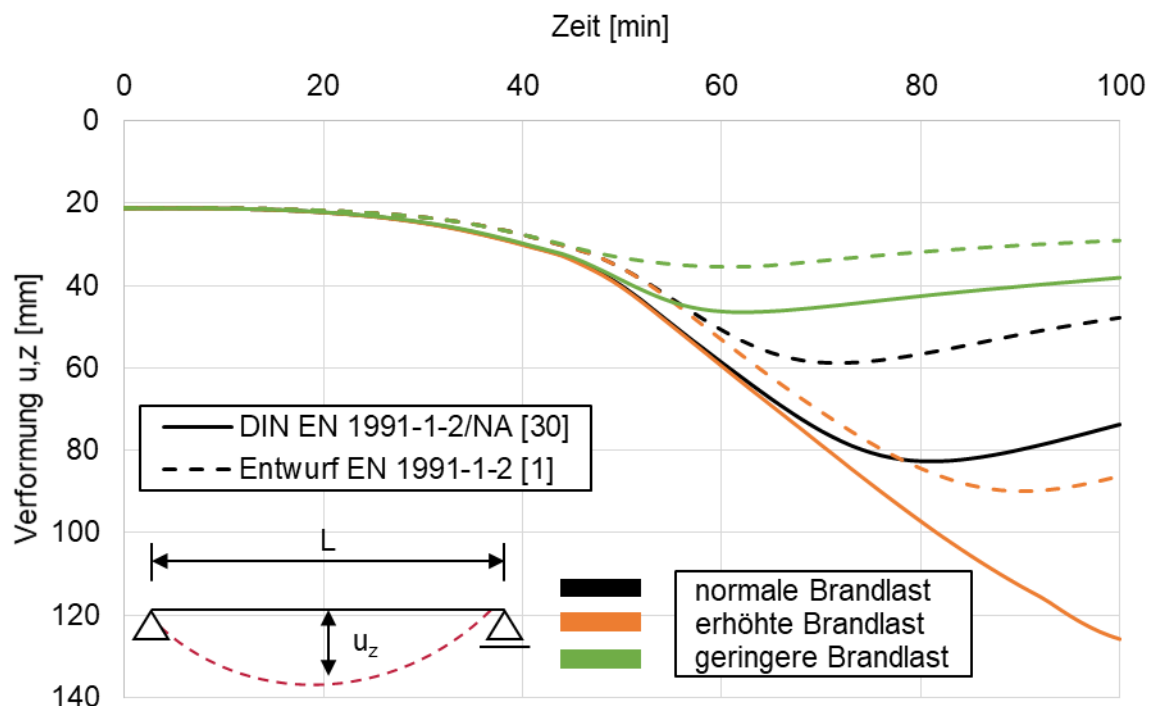


Abbildung 4-13: Zeitabhängige Verformung des Stahlbetonträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven des Büros



## Stahlbetonträger – Verkaufsstätte

Abbildung 4-14 zeigt die Temperaturzeitverläufe der Erwärmung der Längsbewehrung des Stahlbetonträgers unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] sowie gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2. Die roten Kurven zeigen den Temperaturzeitverlauf eines äußeren Bewehrungseisens, die blauen Kurven den eines inneren Eisens (vgl. Querschnittsdarstellung in Abbildung 4-14). Der Bemessungswert der Brandlastdichte für die DIN EN 1991-1-2/NA [31] liegt weit über dem Wert nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1], er ist fast doppelt so groß. Die Brandlastdichten sind in der folgenden Tabelle 4-5 aufgelistet.

*Tabelle 4-5: Bemessungswerte der Brandlastdichte für die Verkaufsstätte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 [1]*

Bemessungswert der Brandlastdichte in [MJ/m <sup>2</sup> ] gemäß	
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	Entwurf der EN 1991-1-2 [1]
827	486

Die größere Brandlastdichte resultiert bei identischen Randbedingungen in höheren Maximaltemperaturen der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zu den Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] (vgl. Abbildung 4-14). Dementsprechend erreicht die Bewehrung bei einer Naturbrandbeanspruchung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] eine höhere Maximaltemperatur (vgl. Abbildung 4-14). Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen der Längsbewehrung unter der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und der des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] beträgt für das äußere Bewehrungseisen circa 200 K und circa 100 K für das innere Bewehrungseisen. Aufgrund der dreiseitigen Beflammung von unten erreicht die außen liegende Bewehrung sowohl nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] als auch nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] höhere Temperaturen als die innenliegende Bewehrung.

In Abbildung 4-15 ist die zeitabhängige Verformung des Stahlbetonträgers dargestellt. Aus dem zeitabhängigen Verlauf der Verformung unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] lässt sich in Verbindung mit den vorangegangenen Erläuterungen bezüglich der Temperaturzeitverläufe (vgl. Abbildung 4-14) ableiten, dass die größere Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] auch zu größeren Verformungen des Bauteils führt. Dies kann mit der stärkeren Temperaturbeanspruchung des Bauteils aufgrund der größeren Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] begründet werden.

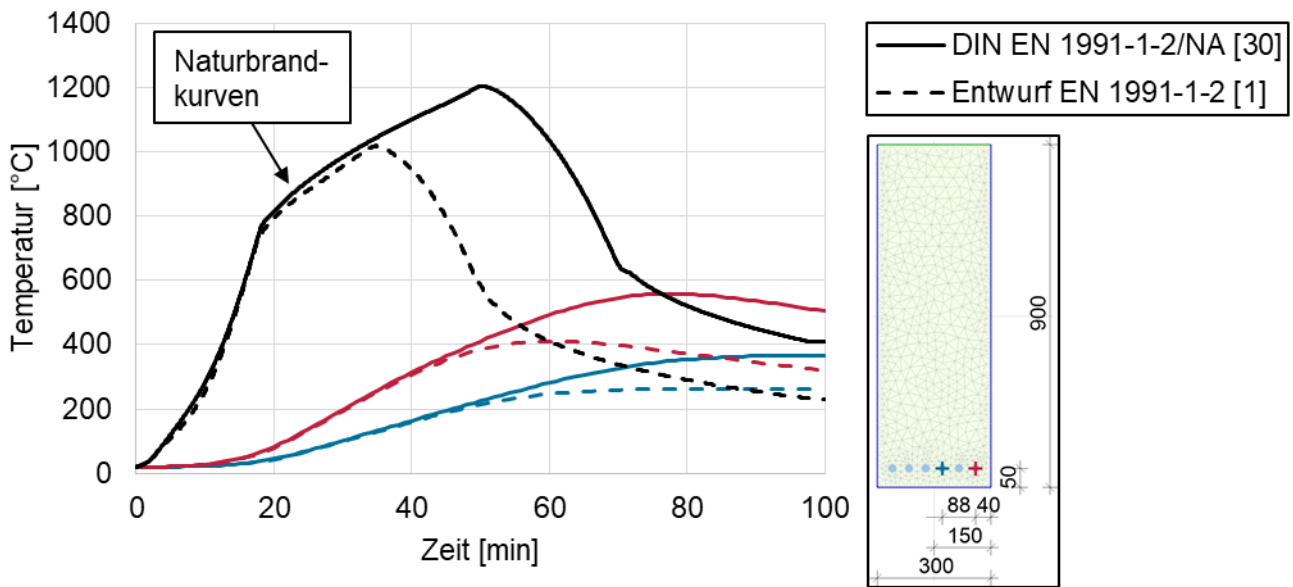


Abbildung 4-14: Vergleich der Temperaturzeitverläufe der Längsbewehrung des Stahlbetonträgers unter den Naturbrandkurven der Verkaufsstätte

Die maximal zulässige Grenzdurchbiegung beträgt für den betrachteten Stahlbetonträger der Verkaufsstätte  $u_{\text{Grenz}} = 278 \text{ mm}$ . Abbildung 4-15 zeigt, dass für keine der beiden betrachteten Varianten die Grenzdurchbiegung erreicht wird. Ebenso kam es in den numerischen Simulationen zu keinem rechnerischen Versagen des Stahlbetonträgers.

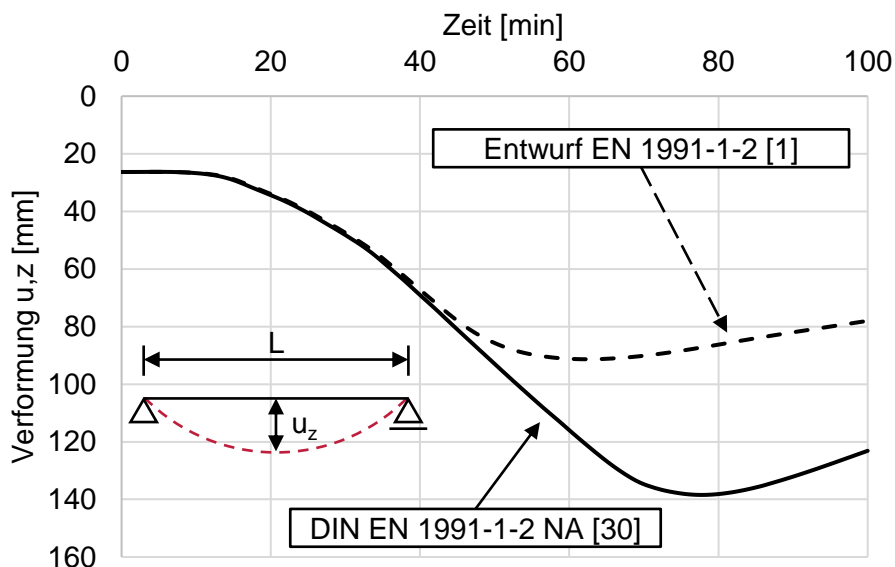


Abbildung 4-15: Zeitabhängige Verformung des Stahlbetonträgers in Feldmitte (bei  $L/2$ ) unter den Naturbrandkurven der Verkaufsstätte





Zusammenfassend kann der Nationale Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2 [31] für das beschriebene Bauteil in der Nutzungskategorie Verkaufsstätte als konservativer im Vergleich zum Entwurf der EN 1991-1-2 [1] bewertet werden.

#### **4.4.4 Vergleichsrechnung mit den Holzbauteilen**

Für die Holzbauteile wurde ein anderes Vorgehen als bei den Stahl-, Verbund- und Stahlbetonbauteilen gewählt. Anstelle der mit numerischen Simulationen ermittelten maximalen Verformung in Feldmitte im Brandfall wird die maximale Auslastung des Tragfähigkeitsnachweises auf Biegedrillknicken gemäß DIN EN 1995-1-1 Gleichung (6.33) [37] als Vergleichskriterium herangezogen. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass Abbrand auftritt, während die Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] sowie dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] Temperaturen von  $\geq 300$  °C aufweisen (vgl. Tabelle 4-6 und Abbildung 4-17).

#### **Holzbalken – Büro**

Die Bemessungswerte der Brandlastdichte für die Versammlungsstätte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Der Wert für das normale Büro ist größer als der Wert für das Büro mit geringer Brandlast. Am größten ist der Wert für das Büro mit erhöhter Brandlast. Die Werte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] sind in jeder Bürokategorie etwa 38 % größer als die Werte gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1].

Abbildung 4-16 vergleicht die Abbrandzeiträume des Holzbalkens unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] für die drei Bürokategorien. Aufgrund der jeweils größeren Brandlastdichte erreichen bei ansonsten identischen Randbedingungen die Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zu den Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] für alle drei Bürokategorien höhere Maximaltemperaturen. Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen der Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und denen des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] betragen jeweils circa 200 K.

Der Temperaturanstieg der sechs Naturbrandkurven verläuft nahezu identisch. So liegt der Zeitpunkt, an dem die für den Abbrand des Holzes entscheidende Grenztemperatur von 300 °C erstmals erreicht wird, nur wenige Minuten auseinander (vgl. Abbildung 4-16). Die Kurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] erreichen die Grenztemperatur nach 29 Minuten bzw. 30 Minuten, die Kurven gemäß EN 1991-1-2 [1] nach 33 Minuten.

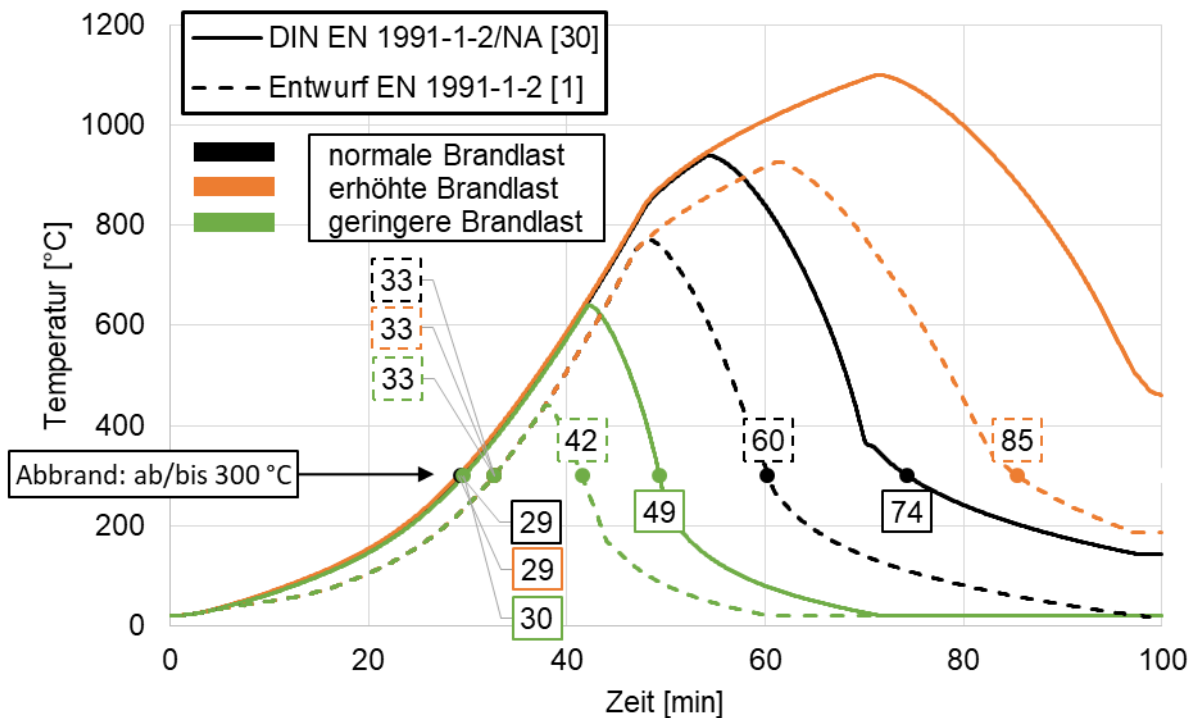


Abbildung 4-16: Vergleich der Abbrandphasen des Holzbalkens unter den Naturbrandkurven des Büros

Nach Erreichen der Maximaltemperatur fallen die Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] jedoch früher und weiter nach unten ab, als die Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] (vgl. Abbildung 4-16). Die Zeitpunkte des Unterschreitens der Grenztemperatur von 300 °C liegen demnach für die Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] bei 74 Minuten (normale Brandlast), 49 Minuten (geringe Brandlast) bzw. die Grenztemperatur wird gar nicht mehr unterschritten (erhöhte Brandlast). Für die Naturbrandkurven nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] liegen die Zeitpunkte bei nur 60 Minuten (normale Brandlast), 42 Minuten (geringe Brandlast) und 85 Minuten (erhöhte Brandlast). Die Abbrandphasen dauern bei Naturbrandbeanspruchung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] aufgerundet 45 Minuten (normale Brandlast), 20 Minuten (geringe Brandlast) und 71 Minuten (erhöhte Brandlast). Bei Naturbrandbeanspruchung gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] dauert der Abbrand nur 28 Minuten (normale Brandlast, 17 Minuten weniger), 9 Minuten (geringe Brandlast, 11 Minuten weniger) und 53 Minuten (erhöhte Brandlast, 18 Minuten weniger). Die genauen Zeitwerte können der Tabelle 4-6 entnommen werden.



Tabelle 4-6: Vergleich der Dauer der Abbrandphase des Holzbalkens des Büros

Naturbrandkurve gemäß (Quelle, Variante)	Beginn Ab- brand [min] ( $T \geq 300 \text{ °C}$ )	Ende Abbrand [min] ( $T < 300 \text{ °C}$ )	Dauer Abbrandphase [min] (exakt)
[31] normale Brandlast	29	74	45
[1] normale Brandlast	33	60	28
[31] erhöhte Brandlast	29	100	71
[1] erhöhte Brandlast	33	85	53
[31] geringere Brandlast	30	49	20
[1] geringere Brandlast	33	42	9

[31]: DIN EN 1991-1-2/NA  
[1]: Entwurf der EN 1991-1-2

Der Unterschied zwischen den Naturbrandkurven in der Abkühlphase kann mit den unterschiedlichen Brandlastdichten begründet werden. Die in allen Bürokategorien größeren Brandlastdichten gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] führen bei sonst identischen Randbedingungen zu einer insgesamt größeren Brandlast als nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Es wird dementsprechend nicht nur eine höhere Maximaltemperatur erreicht. Auch dauert die Wärmefreisetzung des Brandes nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] länger an.

Der Abbrand während der entsprechend Tabelle 4-6 andauernden Abbrandphasen wurde in der statischen Berechnung mit der *Methode mit reduziertem Querschnitt* gemäß DIN EN 1995-1-2 [38] berücksichtigt. Die dabei ermittelten ideellen Abbrandtiefen  $d_{ef}$  können Tabelle 4-7 entnommen werden. Es zeigt sich, dass aufgrund der größeren Brandlastdichten (vgl. Tabelle 4-4) und des daraus resultierenden, länger anhaltenden Abbrandes (vgl. Tabelle 4-6) die ideale Abbrandtiefe  $d_{ef}$  bei einer Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] größer sind, als nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Der Unterschied bei normaler Brandlastdichte beträgt 11,9 mm, bei hoher Brandlastdichte 12,6 mm und bei geringer Brandlastdichte 11,6 mm.

Tabelle 4-8 listet die Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken von Biegestäben nach DIN EN 1995-1-1 Gleichung (6.33) [37] für den Holzbalken in der Büronutzung auf. Die Auslastung bei normaler Brandlastdichte ist größer als bei geringer Brandlastdichte. Die größte Auslastung wird bei hoher Brandlastdichte erreicht, dort steigen die Werte über 1,0. Die Nachweise werden nicht erfüllt. Die Auslastung bei Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist für alle drei Bürokategorien größer als bei Naturbrandbeanspruchung nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Aufgrund der größeren Brandlastdichte nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zur Brandlastdichte nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] werden höhere und länger



anhaltend hohe Temperaturen in der Heißgasschicht ermittelt (vgl. Abbildung 4-16). Die daraus resultierenden längeren Abbrandphasen (vgl. Tabelle 4-6) ergeben tiefere ideale Abbrandtiefen  $d_{ef}$  (vgl. Tabelle 4-7).

*Tabelle 4-7: Ideale Abbrandtiefen gemäß Methode mit reduziertem Querschnitt [38] für den Holzbalken des Büros unter Naturbrandbeanspruchung*

Ideelle Abbrandtiefe $d_{ef}$ [mm] gemäß Methode mit reduziertem Querschnitt (DIN EN 1995-1-2 [38] Abschnitt 4.2.2) bei			
	normaler Brandlastdichte	hoher Brandlastdichte	geringer Brandlastdichte
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	38,50	56,70	21,00
Entwurf EN 1991-1-2 [1]	26,60	44,10	9,45

Bei sonst konstanten Randbedingungen (Bauteil, Belastung, etc.) führt der aufgrund der größeren ideellen Abbrandtiefe  $d_{ef}$  kleinere Restquerschnitt bei Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] zu einer größeren statischen Auslastung als bei Naturbrandbeanspruchung nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Zusammenfassend kann die DIN EN 1991-1-2/NA [31] für das beschriebene Bauteil in der Nutzung Büro für alle drei Brandlastkategorien als konservativer im Vergleich zum Entwurf der EN 1991-1-2 [1] bewertet werden.

*Tabelle 4-8: Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken von Biegestäben für den Holzbalken des Büros unter Naturbrandbeanspruchung*

Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken gemäß DIN EN 1995-1-1 Gleichung (6.33) [37] bei			
	normaler Brandlastdichte	hoher Brandlastdichte	geringer Brandlastdichte
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	0,95	2,47	0,60
Entwurf EN 1991-1-2 [1]	0,68	1,19	0,48



## Holz balken – Versammlungsstätte

Die Bemessungswerte der Brandlastdichte für die Versammlungsstätte gemäß der DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] sind in Tabelle 4-9 dargestellt. Der Bemessungswert der Brandlastdichte nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist etwa 61 % größer als der nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1].

*Tabelle 4-9: Bemessungswerte der Brandlastdichte für die Versammlungsstätte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und Entwurf der EN 1991-1-2 [1]*

Bemessungswert der Brandlastdichte in [MJ/m <sup>2</sup> ] gemäß	
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	Entwurf der EN 1991-1-2 [1]
391	243

Abbildung 4-17 vergleicht die Abbrandphasen des Holzbalkens unter den Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] für die Versammlungsstätte. Aufgrund der größeren Brandlastdichte erreicht bei ansonsten identischen Randbedingungen die Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zu der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] eine höhere Maximaltemperaturen. Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] und der des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] beträgt circa 100 K.

Der Temperaturanstieg beider Naturbrandkurven verläuft nahezu identisch. So liegt der Zeitpunkt, an dem die für den Abbrand des Holzes entscheidende Grenztemperatur von 300 °C erreicht wird, nur zwei Minuten auseinander (vgl. Abbildung 4-17). Die Kurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] erreicht die Grenztemperatur nach 12 Minuten, die Kurve gemäß EN 1991-1-2 [1] nach 14 Minuten.

Nach Erreichen der Maximaltemperatur fällt die Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] früher und weiter nach unten ab, als die Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31]. Die Zeitpunkte des Unterschreitens der Grenztemperatur von 300 °C liegen demnach für die DIN EN 1991-1-2/NA [31] Naturbrandkurve bei 42 Minuten, für die Entwurf der EN 1991-1-2 [1] Naturbrandkurve bei nur 30 Minuten. Die Abbrandphase dauert bei Naturbrandbeanspruchung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] aufgerundet 31 Minuten, bei Naturbrandbeanspruchung gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] nur 17 Minuten (24 Minuten weniger). Die genauen Zeitwerte können der Tabelle 4-10 entnommen werden.

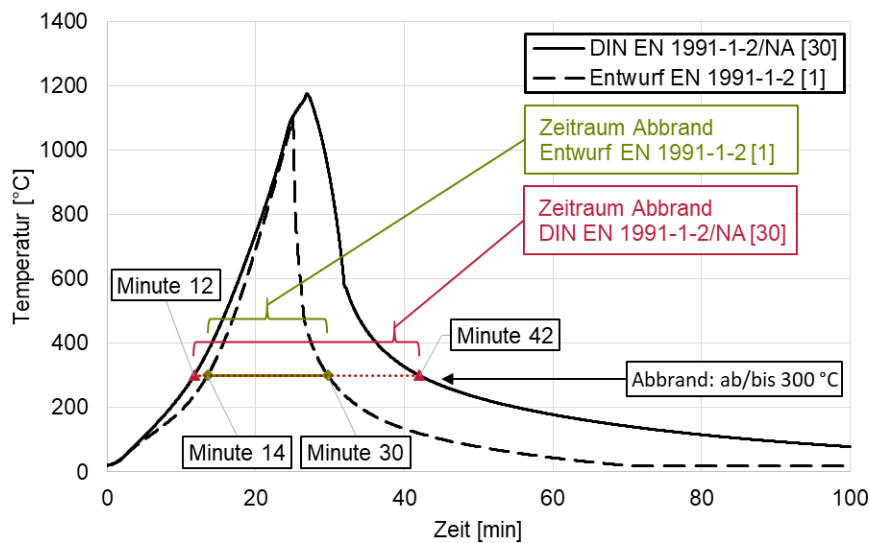


Abbildung 4-17: Vergleich der Abbrandphasen des Holzbalkens unter den Naturbrandkurven der Versammlungsstätte

Der Unterschied zwischen den Naturbrandkurven in der Abkühlphase kann ebenfalls mit den unterschiedlichen Brandlastdichten begründet werden. Die größere Brandlastdichte gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] führt bei sonst identischen Randbedingungen zu einer insgesamt größeren Brandlast als nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Es wird dementsprechend nicht nur eine höhere Maximaltemperatur erreicht, auch dauert die Wärmefreisetzung des Brandes nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] länger an.

Tabelle 4-10: Vergleich der Dauer der Abbrandphase des Holzbalkens der Versammlungsstätte

Naturbrandkurve gemäß	Beginn Abbrand [min] ( $T \geq 300 \text{ °C}$ )	Ende Abbrand [min] ( $T < 300 \text{ °C}$ )	Dauer Abbrandphase [min] (exakt)
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	12	42	30
Entwurf der EN 1991-1-2 [1]	14	30	17

Der Abbrand während der entsprechend Tabelle 4-10 andauernde Abbrandphasen wurde in der statischen Berechnung mit der *Methode mit reduziertem Querschnitt* gemäß DIN EN 1995-1-2 [38] berücksichtigt. Die dabei ermittelten ideellen Abbrandtiefen  $d_{ef}$  können Tabelle 4-11 entnommen werden. Es zeigt sich, dass aufgrund der größeren Brandlastdichten (vgl. Tabelle 4-9) und des daraus resultierenden, länger anhaltenden Abbrandes (vgl. Tabelle 4-10) die ideale Abbrandtiefe  $d_{ef}$  bei einer Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] größer ist als nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Der Unterschied beträgt 10,8 mm.



*Tabelle 4-11: Ideelle Abbrandtiefen gemäß Methode mit reduziertem Querschnitt [38] für den Holzbalken der Versammlungsstätte unter Naturbrandbeanspruchung*

Ideelle Abbrandtiefe $d_{ef}$ [mm] gemäß Methode mit reduziertem Querschnitt (DIN EN 1995-1-2 [38] Abschnitt 4.2.2)	
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	28,7
Entwurf EN 1991-1-2 [1]	17,8

Tabelle 4-12 listet die Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken von Biegestäben nach DIN EN 1995-1-1 Gleichung (6.33) [37] für den Holzbalken in der Versammlungsstätte auf. Die Auslastung bei Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist größer als bei Naturbrandbeanspruchung nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Bei Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist der Nachweis knapp nicht erfüllt. Das Bauteil ist 5 % überlastet. Bei Naturbrandbeanspruchung nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] ist der Nachweis erfüllt. Die Auslastung beträgt 79 %. Aufgrund der größeren Brandlastdichte nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] im Vergleich zur Brandlastdichte nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] (vgl. Tabelle 4-9) werden höhere und länger anhaltend hohe Temperaturen in der Heißgasschicht ermittelt (vgl. Abbildung 4-17). Die daraus resultierende längere Abbrandphase (vgl. Tabelle 4-10) ergibt eine tiefere, ideelle Abbrandtiefe  $d_{ef}$  (vgl. Tabelle 4-11).

Bei sonst konstanten Randbedingungen (Bauteil, Belastung, etc.) führt der aufgrund der größeren ideellen Abbrandtiefe  $d_{ef}$  der kleinere Restquerschnitt bei Naturbrandbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-2/NA [31] zu einer größeren statischen Auslastung als bei Naturbrandbeanspruchung nach dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] (vgl. Tabelle 4-12). Zusammenfassend kann die DIN EN 1991-1-2/NA [31] für das beschriebene Bauteil in der Nutzung Versammlungsstätte als konservativer im Vergleich zum Entwurf der EN 1991-1-2 [1] bewertet werden.

*Tabelle 4-12: Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken von Biegestäben für den Holzbalken der Versammlungsstätte unter Naturbrandbeanspruchung*

Auslastung des Nachweises auf Biegedrillknicken gemäß DIN EN 1995-1-1 Gleichung (6.33) [37]	
DIN EN 1991-1-2/NA [31]	1,05
Entwurf EN 1991-1-2 [1]	0,79



## 4.5 Fazit der Vergleichsberechnungen

Die Bewertung der Methoden zur Ermittlung der Brandlastdichte gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] und deren Auswirkung auf die Naturbrandkurven sowie das Tragverhalten von Bauteilen basiert auf einigen Vergleichsrechnungen für ausgewählte Gebäudesituation und entsprechende Bauteile. Aus den Ergebnissen der Vergleichsberechnungen der ausgewählten Stahl-, Verbund-, Holz- und Stahlbetonbauteile der verschiedenen Gebäudenutzungen (Verkaufsstätte, Versammlungsstätte, Büro) gemäß DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] und dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] können die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

1. Basierend auf den Temperaturzeitkurven (Naturbrandkurven) des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] kann abgeleitet werden, dass sich der Verlauf der Entwicklungsphasen zwischen dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] unterscheidet. Die Temperaturzeitkurven des Entwurfs der EN 1991-1-2 Anhang E [1] und DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] unterscheiden sich in der Vollbrandphase deutlich. In der Vollbrandphase werden nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang BB [31] höhere Temperaturen erreicht als im Vergleich zur Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1]. Darüber hinaus dauert die Vollbrandphase der Naturbrandkurve gemäß dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] länger an als die Vollbrandphase der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1]. Alle Naturbrandkurven haben einen qualitativ gleichen Verlauf.
2. Für Bürogebäude werden im Anhang E des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] zwei neue Nutzungskategorien eingeführt, welche ein papierloses Büro (Bürogebäude mit einer geringen Brandlastdichte) und ein Büroraum mit maximal 30 % Archivfläche (Bürogebäude mit einer hohen Brandlastdicht) repräsentieren sollen. Für alle drei Bürokategorien reduzieren sich die Wärmefreisetzungsrate und die maximalen Temperaturen der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] im Vergleich zur DIN EN 1991-1-2/NA [31]. Infolge der geringeren Temperaturen der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] im Vergleich zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] und den daraus resultierenden geringeren Querschnittstemperaturen bzw. geringeren Abbrandtiefen reduzieren sich die Verformungen bzw. Auslastungen der entsprechenden Bauteile.

Die Einordnung des Bürogebäudes in die entsprechende Nutzungskategorie zur





Definition der Brandlastdichte beeinflusst signifikant den Verlauf der Naturbrandkurve und folglich das Erwärmungs- und Tragverhalten des entsprechenden Bauteils. Eine Ergänzung im Anhang BB zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] ist aufgrund der fehlenden Differenzierung anderer Nutzungskategorien (z. B. Versammlungsstätte) und einer ungenauen Definition der Grenzen zwischen mittlerer, geringer und erhöhter Brandlast bei der Büronutzung nicht zu empfehlen. Ferner weisen die höheren und geringeren Brandlasten der Büronutzung gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] keine dokumentierte Grundlage auf.

3. Basierend auf den durchgeführten Vergleichsrechnungen der unterschiedlichen Gebäudesituationen kann abgeleitet werden, dass durch die Naturbrandkurven gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] höhere Querschnittstemperaturen und größere Verformungen bzw. größere Abbrandtiefen im Vergleich zur Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] erreicht werden. Dies ist auf den zuvor bereits erläuterten unterschiedlichen Verlauf der Vollbrandphase der Naturbrandkurven zurückzuführen. Des Weiteren können infolge der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und der DIN EN 1991-1-2/NA [31] in Abhängigkeit der Raum- bzw. Gebäudesituation signifikante Unterschiede für die Bewertung des Versagens anhand des Grenzdurchbiegungskriteriums gemäß DIN 1363-1 [41] des Bauteils auftreten. Denn bei bestimmten Randbedingungen der Gebäudesituation wird das Grenzdurchbiegungskriterium gemäß DIN 1363-1 [41] erreicht. Außerdem wird ein Versagen des Bauteils in der Simulation infolge der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] erreicht. Im Gegensatz dazu wird infolge der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] das Grenzdurchbiegungskriterium gemäß DIN 1363-1 [41] erreicht, allerdings versagen die Bauteile in den Simulationen nicht.
4. Die Methode zur Bestimmung der Naturbrandverläufe basierend auf der Wärmefreisetzungsrate ist nach Entwurf EN 1991-1-2 [1] und DIN EN 1991-1-2/NA [31] identisch. Im Vergleich zu DIN EN 1991-1-2/NA [31] sind die Brandlastdichte, die Wärmefreisetzungsrate und die Temperaturen der Naturbrandkurve größer als die bei Anwendung des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1], weshalb die Naturbrandkurven der DIN EN 1991-1-2/NA [31] zu konservativeren Ergebnissen im Vergleich zum Entwurf der EN 1991-1-2 [1] führen.



## 5 Gesamtbewertung der Novellierung

Im Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 (Stand: April 2018) [1] werden gegenüber dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [30] folgende Änderungen vorgenommen worden:

- a) In Absatz E.1 wurde in Gleichung (E.1) ein neuer Sicherheitsfaktor  $\delta_{q3}$  ergänzt.
- b) In Tabelle E.2 sind Sicherheitsfaktoren auf  $\delta_{n8}$  reduziert worden. Die Tabelle wurde in ihrer Darstellung überarbeitet und der Sicherheitsfaktor  $\delta_{n3}$  (Automatische Branderkennung und Brandmeldung (Wärme)) wurde von 0,87 auf 0,9 erhöht.
- c) Die Tabelle E.3 zur Darstellung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  in Abhängigkeit der Zuverlässigkeitsklassen RC1, RC2 und RC3 nach DIN EN 1990 [28] wurde ergänzt.
- d) Die Tabelle E.5 wurde redaktionell überarbeitet und die Büronutzung mit geringen (*sparingly loaded office*) und hohen (*densely loaded office*) Brandlastdichten ergänzt.
- e) In Tabelle E.6. sind entsprechend die Maxima der Wärmefreisetzungsraten für Büronutzung mit geringen und hohen Brandlasten mit  $t_{\alpha} = 300$  s und  $RHR_f = 250$  kW/m<sup>2</sup> ergänzt.
- f) Zur Anwendung eines weiteren neuen Sicherheitsfaktors  $\delta_{q3}$  wurde die Gleichung (E.7) ergänzt.

Unter Zugrundelegung der systematisch durchgeführten Vergleichsrechnungen kann abgeleitet werden, dass trotz der Novellierung des Sicherheitskonzeptes gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E [1] der wesentliche Kritikpunkt nicht überarbeitet wurde. Es werden nun 10 Sicherheitsfaktoren zur Bestimmung des Bemessungswerts der Brandlastdichte herangezogen. Die Sicherheitsfaktoren werden weiterhin miteinander multipliziert, obwohl sie teilweise stochastisch nicht unabhängig voneinander sind. Auch eine Ergänzung des Sicherheitsfaktors  $\delta_{Q1}$ , der zur Berechnung des Bemessungswertes der Wärmefreisetzungsrates angewendet wird, führt mit der Empfehlung von  $\delta_{Q1} = 1,0$  zu keiner Änderung bei der praktischen Anwendung. Die Intransparenz des Sicherheitskonzeptes und die Vielzahl an Sicherheitsfaktoren bleiben weiterhin bestehen.

Basierend auf dem Vergleich der Sicherheitskonzepte gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] und gemäß dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] werden höhere bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_{f,fi}$  und geringere Zuverlässigkeitsindizes  $\beta_{fi}$  im Brandfall berechnet. Dies führt zu geringeren Sicherheitsfaktoren, die bei der Berechnung des Bemessungswertes zu geringeren Brandlasten führen. Entsprechend sind die Maxima der Wärmefreisetzung und die Dauer der Branddauer, insbesondere der Vollbrandphase, die von der Brandlast abhängig ist, geringer. Die sich ergebenden Naturbrandkurven, die auf Basis der Wärmefreisetzungsrates ermittelt wurden, sind im Vergleich zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] ebenfalls



in ihrem Temperaturmaximum reduziert und in der Branddauer verkürzt. Folglich sind die Temperaturbeanspruchung der betrachteten Bauteile unter Anwendung des Entwurfs des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] geringer. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen der betrachteten Gebäudesituation (Büro, Verkaufsstätte, Versammlungsstätte) mit den entsprechenden Bauteilen in Stahl-, Verbund-, Stahlbeton- und Holzbauweise weisen dieselben Differenzen im Erwärmungs- und Tragverhalten infolge der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] und der DIN EN 1991-1-2/NA [31] auf. Letztendlich haben die geringeren Querschnittstemperaturen bzw. geringeren Abbrandtiefen infolge der Naturbrandkurve gemäß dem Anhang E des Entwurfes der EN 1991-1-2 [1] geringere Durchbiegungen bzw. geringere statische Auslastungen zur Folge.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Vergleichsrechnung unter Anwendung des Sicherheitskonzept gemäß dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] zu konservativeren Ergebnissen im Vergleich zum Sicherheitskonzept des Entwurfs des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] führen. Eine Anwendung des Sicherheitskonzeptes gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 Anhang E wird für die DIN EN 1991-1-2 [30] daher nicht empfohlen.

Für die Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes gemäß „Anhang E - Brandlastdichten“ empfehlen sich für den Nationalen Anhang zur DIN EN 1991-1-2 [31] folgende Abweichung:

Der Anhang E darf nicht angewendet werden. Er wird durch Anhang BB zum Nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-2 [31] ersetzt.



## 6 Zusammenfassung

Im Zuge der Überarbeitung und Vereinheitlichung der europäischen Normen wurde das Sicherheitskonzept bzw. das Verfahren zur Ermittlung einer Naturbrandkurve gemäß dem Anhang E der DIN EN 1991-1-2 [30] überarbeitet und in der Entwurfsfassung des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] dokumentiert. Das Verfahren des Anhangs E der DIN EN 1991-1-2 [30] wird in Deutschland durch den nationalen Anhang [31] der DIN EN 1991-1-2 [30] ausgeschlossen, da das Sicherheitskonzept des Anhangs E der DIN EN 1991-1-2 [30] nicht dem nationalen Sicherheitsniveau entspricht und mathematisch voneinander abhängige Einflussfaktoren unabhängig voneinander im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden. Mit dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] sollte dieser Faktor überarbeitet werden, sodass ein einheitliches Sicherheitskonzept auf europäischer Ebene verwendet werden kann. Mit dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurde anhand von theoretischen Betrachtungen und Vergleichsrechnungen zwischen dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] und dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] überprüft, ob das nationale Sicherheitsniveau der DIN EN 1991-1-2/NA [31] durch den Entwurf der EN 1991-1-2 [1] widergespiegelt wird.

Für die Überprüfung wurden in einem ersten Schritt die Grundlagendokumente für die vereinfachten Annahmen zur Bestimmung der Sicherheitsfaktoren und Ergänzungen im Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] analysiert und überprüft. Aufgrund fehlender Literaturangaben bzw. Hintergrunddokumente und unzureichender Dokumentation der Sicherheitsfaktoren, konnte die Ableitung der Sicherheitsfaktoren nur teilweise nachvollzogen werden. Insbesondere konnten die Änderungen der Sicherheitsfaktoren  $\delta_{n3}$ ,  $\delta_{n6}$ ,  $\delta_{n7}$  und  $\delta_{n8}$  im Entwurf der EN 1991-1-2 [1] aufgrund fehlender Angaben zu den Versagenswahrscheinlichkeiten der Sicherheitsmaßnahmen (wie beispielsweise Löschmaßnahmen, Feuerwehr, etc.) nicht analysiert werden. Ebenso beinhalten die Hintergrunddokumente des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] keine Berechnungen für den neuen Sicherheitsfaktor  $\delta_{Q1}$ . Die Empfehlung von  $\delta_{Q1} = 1,0$  führt bei der praktischen Anwendung zu keiner Veränderung des Bemessungswertes der Wärmefreisetzungsrate.

Die Berechnung für die Sicherheitsfaktoren  $\delta_{Q1}$ ,  $\delta_{Q2}$  und  $\delta_{Q3}$  sind hingegen plausibel. Jedoch werden für die probabilistischen Berechnungen unterschiedliche Brandraumgrößen  $A_f = 25 \text{ m}^2$ ,  $1.000 \text{ m}^2$  oder  $2.500 \text{ m}^2$  als Bezugsgrößen verwendet. Weiterhin wird die Wahrscheinlichkeit für ein Brandereignis zu  $p_f = 4 \cdot 10^{-7}$  und  $p_f = 5 \cdot 10^{-7}$  angenommen. Auch die Bezugsdauer wird z. T. von 50 auf 55 Jahre erhöht, ohne eine Anpassung der Zielversagenswahrscheinlichkeit vorzunehmen. Der Wechsel der Bezugsgrößen, der Brandauftrittswahrscheinlichkeiten und der verschiedenen Bezugsdauern sind nicht nachvollziehbar.



Die Ergänzung der Brandlasten für Büronutzungen können anhand der Hintergrunddokumente nicht nachvollzogen werden. Die neuen Brandlasten (Mittelwerte, 80 %-Quantil) sind im Verhältnis zu der mittleren Brandlast der Büronutzung jedoch plausibel.

Ferner wurde das Sicherheitskonzept gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] mit dem Sicherheitskonzept nach dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] verglichen. Die Ergebnisse gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] resultierten in höheren bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_{f,fi}$  und in einem entsprechend geringeren Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  im Brandfall, die geringere Sicherheitsfaktoren zur Folge haben. Im Ergebnis des Vergleichs zwischen der bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_{f,fi}$  sowie dem Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] mit den entsprechenden Werten nach Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] kann abgeleitet werden, dass die unterschiedlichen Konzepte nicht das gleiche Sicherheitsniveau haben.

Die praktische Anwendung der Sicherheitskonzepte zur Berechnung der Naturbrandkurven gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] anhand von Beispielen, zeigte geringere Temperaturen bei den Naturbrandkurven im Vergleich zu der Berechnung gemäß dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31]. Die Anwendung der Sicherheitsfaktoren gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] hat einen geringeren Bemessungswert der Brandlastdichte zur Folge, wodurch sich die Wärmefreisetzungsrates und die Dauer der Vollbrandphase im Vergleich zur DIN EN 1991-1-2/NA [31] reduziert bzw. verkürzt. Basierend auf unterschiedlichen Gebäudesituationen und den entsprechenden Bauteilen mit verschiedenen Bauweisen (Stahl-, Verbund-, Stahlbeton- und Holzbauweise) wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, um den Einfluss der Naturbrandkurven gemäß dem Anhang E des Entwurfs der EN 1991-1-2 [1] und des Anhangs BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] auf Bauteilebene zu bewerten. Durch die geringeren Brandlastdichten und folglich reduzierte Wärmefreisetzungsrates ist die thermische Beanspruchung der Bauteile infolge der Naturbrandkurve gemäß dem Entwurf der EN 1991-1-2 [1] gegenüber der Naturbrandkurve gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [31] geringer. Durch die geringere thermische Beanspruchung der Bauteile werden geringere Querschnittstemperaturen erreicht, wodurch sich die Verformungen reduzieren und sich die Branddauer bis zum Erreichen des Grenzdurchbiegungskriterium gemäß DIN 1363-1 [41] vergrößert.

Auf Grundlage der systematischen Vergleichsberechnungen und der Betrachtung der Sicherheitskonzepte des Entwurfs des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] und des Anhangs BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] kann geschlussfolgert werden, dass die Beanspruchung eines Bauteils infolge der Naturbrandkurve gemäß dem Anhang BB der DIN EN 1991-1-2/NA [31] größer ist als die Beanspruchung infolge der Naturbrandkurve des Entwurfs des Anhangs E der EN



1991-1-2 [1] und im Ergebnis zu konservativeren Ergebnissen führt. Ferner bleiben die wesentlichen Kritikpunkte (Intransparenz der Sicherheitsfaktoren, Multiplikation der Sicherheitsfaktoren, Sicherheitsfaktor für die Wärmefreisetzungsrate) auch beim Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] erhalten. Eine Anwendung des Sicherheitskonzeptes gemäß dem Entwurf des Anhangs E der EN 1991-1-2 [1] kann aus vorgenannten Gründen in Deutschland nicht empfohlen werden.



Braunschweig, den 18.11.2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Zehfuß

Lukas Gößwein, M. Sc.

Lisa Sander, M. Sc.

Hannover, den 18.11.2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann

Patrick Meyer, M. Sc.