

Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung

T 3221

T 3221

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8145-5

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

www.baufachinformation.de

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

**Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische
Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß
Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung)**

Az.: ZP 52-5-4.168-1239/07

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Dipl.-Ing. Astrid Weilert
Dr.-Ing. Christoph Klinzmann
Dr.-Ing. Ralf Schnetgöke
Dipl.-Ing. Cornelius Albrecht, MSc.

November 2008

Dieser Bericht umfasst 101 Seiten mit 90 Bildern und 32 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung5
2	Grundlagen für das übergreifende Sicherheitskonzept5
2.1	Grundsätzliche Anforderungen5
2.2	Vorgaben zum Sicherheitsformat.....7
2.3	Zuverlässigkeit von Bauteilen im Brandfall..... 10
3	Statistische Kennwerte der Einflussgrößen 12
3.1	Brandentstehungshäufigkeit p_1 12
3.2	Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung p_2 und p_3 14
3.3	Brandlastdichte 15
3.4	Materialkennwerte..... 16
4	Grundlagen der Struktur- und Zuverlässigkeitsanalysen 17
4.1	Brandmodelle 17
4.2	Strukturanalyse 17
4.2.1	Betonbauteile 17
4.2.2	Stahlbauteile 18
4.2.3	Holzbauteile 19
4.3	Zuverlässigkeitsanalyse von Grenzzuständen20
4.4	Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen21
5	Auswahl der zu untersuchenden Gebäude und Bauteile22
5.1	Auswahlkriterien.....22
5.2	Wohn-/Bürogebäude23
5.2.1	Brandraum und Brandbeanspruchung23
5.2.2	Betonbauteile24
5.2.3	Stahlbauteile27
5.2.4	Holzbauteile28
5.3	Verkaufs-/Versammlungsstätte31
5.3.1	Brandraum und Brandbeanspruchung31
5.3.2	Betonbauteile32
5.3.3	Stahlbauteile34
5.3.4	Holzbauteile35
5.4	Industriegebäude37
5.4.1	Brandraum und Brandbeanspruchung37
5.4.2	Betonbauteile38
5.4.3	Stahlbauteile39
5.4.4	Holzbauteile40
6	Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen für Bauteile42
6.1	Allgemeines42
6.2	Wohn-/Bürogebäude42

6.2.1	Temperaturzeitkurven	43
6.2.2	Betonbalken	43
6.2.3	Betonstütze	44
6.2.4	Bekleideter Stahlträger	45
6.2.5	Bekleidete Stahlstütze	46
6.2.6	Holzbalken	47
6.2.7	Holzstütze	48
6.2.8	Vergleichsbetrachtung für andere Bauteilauslegungen.....	49
6.3	Verkaufs-/Versammlungsstätten	52
6.3.1	Temperaturzeitkurven	52
6.3.2	Betonbalken	53
6.3.3	Betonstütze	54
6.3.4	Bekleideter Stahlträger	55
6.3.5	Bekleidete Stahlstütze	56
6.3.6	Holzbalken	57
6.3.7	Holzstütze	58
6.4	Industriegebäude	59
6.4.1	Temperaturzeitkurven	60
6.4.2	Betonbalken	60
6.4.3	Betonstütze	62
6.4.4	Bekleideter Stahlträger	63
6.4.5	Bekleidete Stahlstütze	64
6.4.6	Holzbalken	65
6.4.7	Holzstütze	66
6.5	Schlussfolgerungen aus den Zuverlässigkeitsanalysen für Einzelbauteile.....	67
7	Ergebnisse der Systemzuverlässigkeitsanalysen	68
7.1	Grundlagen und Voraussetzungen	68
7.2	Bauteilzuverlässigkeit bei Berücksichtigung von Einzelmaßnahmen	69
7.3	Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen	71
7.3.1	Beeinflussung des Brandes durch die Feuerwehr.....	71
7.3.2	Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage.....	72
7.3.3	Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und die Feuerwehr.....	72
7.4	Berücksichtigung des Einsatzes der Feuerwehr	72
7.4.1	Öffentliche Feuerwehr.....	72
7.4.2	Werkfeuerwehr.....	74
7.5	Berücksichtigung der Wirkung einer Sprinkleranlage.....	76
7.6	Beeinflussung durch Feuerwehr und Sprinkleranlage.....	79
7.6.1	Öffentliche Feuerwehr und Sprinkleranlage	79
7.6.2	Werkfeuerwehr und Sprinkleranlage.....	81
7.6.3	Werkfeuerwehr und öffentliche Feuerwehr und Sprinkleranlage.....	82

7.7	Reduktion baulicher Anforderungen aufgrund der Infrastruktur	85
7.7.1	Komponentenzuverlässigkeit	85
7.7.2	Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und die öffentliche Feuerwehr	85
7.7.3	Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und eine Werkfeuerwehr.....	87
7.8	Schlussfolgerungen aus den Systemzuverlässigkeitsanalysen	89
8	Sicherheitsformat	90
8.1	Bemessungskonzept.....	90
8.2	Erprobung und Validierung	93
8.2.1	Bemessung von Einzelbauteilen für natürliche Brandeinwirkung ohne besondere Brandbekämpfungsmaßnahmen	93
8.2.2	Bemessung von Einzelbauteilen für natürliche Brandeinwirkung mit besonderen Brandbekämpfungsmaßnahmen	94
9	Zusammenfassung und Ausblick	95
10	Literaturhinweise.....	98
Anhang A	Modell zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen	100

1 Einleitung

Die Bemessung der Konstruktion eines Gebäudes für den Brandfall hängt maßgeblich von der zeitabhängigen Temperaturbeanspruchung der Bauteile während des Brandes ab. Dabei handelt es sich um eine außergewöhnliche Einwirkung, die neben den gleichzeitig vorhandenen ständigen und veränderlichen Einwirkungen aus der normalen Nutzung zu berücksichtigen ist. In den meisten europäischen Ländern werden die Anforderungen an den Brandschutz bisher unter Bezugnahme auf eine nominelle Brandbeanspruchung, die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK nach DIN 4104-2 oder ISO 834), über Feuerwiderstandsdauern bzw. -klassen formuliert. Im Rahmen von schutzzielorientierten Brandschutzkonzepten, vor allem für Gebäude besonderer Art oder Nutzung (Sonderbauten), wird die Konstruktion jedoch immer häufiger für eine realistischere Naturbrandbeanspruchung bemessen, wobei die erforderlichen rechnerischen Nachweise mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes erbracht werden [1]. Da es sich hierbei regelmäßig um spezielle Einzelfälle handelt, können die langjährigen positiven Erfahrungen mit den Brandschutzvorschriften für Gebäude normaler Art und Nutzung – d. h. Wohn- und Bürogebäude und Gebäude vergleichbarer Nutzung – nicht oder nicht unmittelbar übertragen werden. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass die zu erreichenden Schutzziele definiert und die dafür wesentlichen Leistungskriterien mit einer ausreichenden Zuverlässigkeit eingehalten werden.

Bisher fehlt es sowohl an Vorgaben von quantitativen Leistungskriterien für die nur qualitativ formulierten Schutzziele des Brandschutzes als auch an einem schlüssigen Sicherheitskonzept, das für unterschiedliche Brandschutznachweise mit Ingenieurmethoden die erforderliche Zuverlässigkeit definiert und deren Einhaltung gewährleistet. Das Sicherheitsniveau ist dabei so zu kalibrieren, dass bei Anwendung auf Gebäude normaler Art und Nutzung im Mittel die Brandschutzanforderungen nach den geltenden bauordnungsrechtlichen Vorschriften bestätigt werden.

Im Folgenden werden die Grundzüge eines übergreifenden Sicherheitskonzeptes beispielhaft für den baulichen Brandschutz vorgestellt.

2 Grundlagen für das übergreifende Sicherheitskonzept

2.1 Grundsätzliche Anforderungen

Das übergreifende Sicherheitskonzept muss für

- unterschiedliche Bauweisen (Beton, Stahl, Verbund, Holz, Mauerwerk),
- unterschiedliche Nutzungsarten (normale Gebäude und Sonderbauten),

- unterschiedliche Brandeinwirkungen (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung),
- unterschiedliche rechnerische Nachweisverfahren (vereinfachte und allgemeine Rechenverfahren)

gleichermaßen anwendbar sein.

Folgende statistische Daten werden benötigt, um das Brandrisiko in Gebäuden bewerten und repräsentative Brandszenarien auswählen zu können:

- Brandentstehungshäufigkeit (nutzungsabhängig),
- Brandausbreitungswahrscheinlichkeit (nutzungsabhängig),
- Zuverlässigkeit und Wirksamkeit anlagentechnischer Maßnahmen,
- Zuverlässigkeit und Wirksamkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr.

Da es in Deutschland bislang keine einheitliche Brandstatistik gibt und die bei Feuerwehren und Sachversicherern recht uneinheitlich erfassten Daten die benötigten Informationen nicht liefern können, muss überwiegend auf publizierte Daten aus dem Ausland zurückgegriffen werden.

Wichtige Eingangsgrößen für die Ermittlung der Brandeinwirkungen sind:

- Brandlastdichten,
- flächenspezifische Wärmefreisetzungsraten oder Abbrandraten,
- Produktionsraten von Rauch,
- Entstehungsraten von Schadstoffen.

Statistisch und/oder experimentell abgesicherte Daten für die betreffenden Einflussgrößen sowie die Modellunsicherheiten bei der Beschreibung der Brandwirkungen sind weltweit nur spärlich und zum Teil widersprüchlich zu finden. Auch belastbare Daten zur Zuverlässigkeit und Wirksamkeit von anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen im Anforderungsfall sind Mangelware. Solche Angaben werden jedoch benötigt, um z. B. die Kompensation von nicht ausführbaren baulichen Brandschutzmaßnahmen durch anlagentechnische oder abwehrende Brandschutzmaßnahmen quantitativ zu begründen.

Die in dem übergreifenden Sicherheitskonzept zu berücksichtigenden Einflussgrößen und Modelle sind in Bild 1 in der Reihenfolge der Nachweisführung zusammengestellt. Auf sie wird nachfolgend noch näher eingegangen.

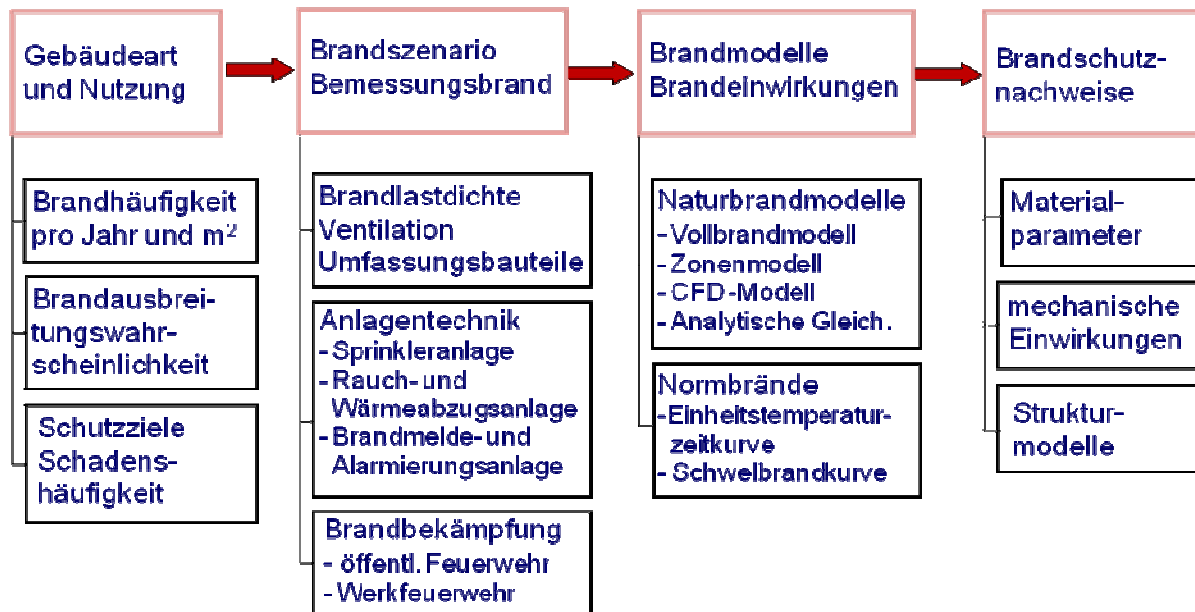


Bild 1: Modelle und Einflussgrößen, die in dem übergreifenden Sicherheitskonzept zu berücksichtigen sind

2.2 Vorgaben zum Sicherheitsformat

In Zukunft werden in Deutschland die Nachweise und Bemessungen zum konstruktiven baulichen Brandschutz mit Hilfe der Brandschutzteile der Eurocodes geführt, deren bauaufsichtliche Einführung für 2010 geplant ist. Als Brandbeanspruchung kann dann neben der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), die bisher in Deutschland und weltweit Grundlage bauordnungsrechtlicher Brandschutzanforderungen ist, auch ein natürlicher Brand zugrunde gelegt werden, der unter den speziellen brandschutztechnischen Randbedingungen eines Gebäudes möglich ist.

Das Sicherheitskonzept muss sich insgesamt an dem künftigen Stand der Technik orientieren und damit auch die in den europäischen Normen – unter übergeordneten Gesichtspunkten – getroffenen Festlegungen zum Sicherheitsformat respektieren und sinnvoll integrieren.

Entsprechend der Struktur der Eurocodes werden die Grundlagen der Tragwerksplanung bauart- und baustoffübergreifend in EN 1990 – Eurocode [2] geregelt. Ein wesentliches Prinzip ist die Beschreibung der Nachweissituationen durch Grenzzustände mit streuenden Einflussgrößen. Für diese Einflussgrößen werden sog. Bemessungswerte vorgegeben, die in der Regel aus (genormten) charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten berechnet werden. Die Bemessungswerte bzw. die Teilsicherheitsbeiwerte sollen so festgelegt werden, dass der betrachtete Grenzzustand mit einer vorgegebenen Zuverlässigkeit nicht überschritten wird. Für die erforderliche Zuverlässigkeit werden in Abhängigkeit von den möglichen Folgen beim Überschreiten des Grenzzustandes Richtwerte genannt.

Die mechanischen Einwirkungen auf Gebäude werden in den verschiedenen Teilen von EN 1991-1 geregelt. Für normale Hochbauten ist insbesondere die EN 1991-1-1 [3] von Bedeutung, in der Wichten, Eigengewichtslasten (G) und Nutzlasten (Q) geregelt sind. Da die Einwirkungen mehr oder weniger stark streuen, werden die charakteristischen Werte in der Regel (außer bei ständigen Einwirkungen wie Eigengewichtslasten) als obere Fraktilen, z. B. 95 %-Fraktile der Schneelast oder 98 %-Fraktile der Windlast, vorgegeben. Zusätzlich ist bei Grenzzuständen der Tragfähigkeit von Bauteilen und Tragwerken ein Teilsicherheitsbeiwert, z. B. $\gamma_G = 1,35$ für ständige Einwirkungen und $\gamma_Q = 1,5$ für veränderliche Einwirkungen, anzusetzen. Dadurch wird sichergestellt, dass ein Überschreiten des Bemessungswertes äußerst unwahrscheinlich ist. Treten mehrere Einwirkungen gleichzeitig auf, z. B. Eigengewicht, Nutzlast und Windlast, müssen nicht alle mit einem entsprechend hohen Bemessungswert eingesetzt werden. Für diesen Fall gelten Kombinationsregeln, nach denen nur eine sog. Leiteinwirkung mit dem vollen Bemessungswert und die weiteren veränderlichen Einwirkungen mit sog. Kombinationswerten eingehen. Diese sind gegenüber den Bemessungswerten mit Kombinationsbeiwerten ψ abgemindert, wobei mit ψ_0 ein sog. häufiger Wert, mit ψ_1 ein seltener Wert und mit ψ_2 ein quasi-ständiger Wert definiert wird.

Auf der Seite der Widerstände gehen in der Regel geometrische Größen wie Bauteilabmessungen sowie Materialeigenschaften in die Grenzzustandsbetrachtung ein. Dabei werden für geometrische Größen wegen der durchweg geringen Streuungen nominelle Werte, meist Mittelwerte, verwendet. Bei den Materialeigenschaften werden in der Regel charakteristische Werte als ungünstige Fraktilen definiert, z. B. die 5 %-Fraktile der Beton- und Betonstahlfestigkeit bei Stahlbetonbauteilen. In Abhängigkeit von den Streuungen werden zusätzlich Teilsicherheitsbeiwerte γ_M angesetzt, z. B. $\gamma_c = 1,5$ für die Betonfestigkeit und $\gamma_s = 1,15$ für die Betonstahlfestigkeit bei Stahlbetonbauteilen.

Der Brand stellt eine außergewöhnliche Bemessungssituation dar, die sehr selten eintritt und daher während der Nutzungsdauer eines Gebäudes nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Deshalb darf die erforderliche Zuverlässigkeit im Vergleich zu den häufiger zu erwartenden Bemessungssituationen (d. h. den normalen Gebrauchslastfällen) reduziert werden. Auf der Einwirkungsseite geschieht dies, indem die Teilsicherheitsbeiwerte in der Regel entfallen und als Bemessungswerte für den Brandfall unmittelbar die nominellen Werte der Eigengewichtslasten und die häufigen Werte für die Leiteinwirkung bzw. die quasi-ständigen Werte für weitere veränderliche Einwirkungen eingesetzt werden [4]. Auf der Widerstandsseite werden entsprechend dem Vorschlag des zuständigen DIN-Arbeitsausschusses die Materialteilsicherheitsbeiwerte für alle Baustoffe und Bauarten einheitlich mit $\gamma_M = 1,0$ festgelegt, um unterschiedliche Werte für die verschiedenen Bauweisen und Nachweise zu vermeiden.

Im Hinblick auf die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken bedeutet dies, dass einerseits die mechanischen Einwirkungen bauartunabhängig entsprechend den Regelungen in [2], [3] und [4] vorzugeben sind und dass andererseits für die Materialeigenschaften die charakteristischen Werte aus den entsprechenden bauartspezifischen Normteilen unverändert übernommen werden sollen. Somit muss die erforderliche Zuverlässigkeit der Brandschutzbemessung allein über die Definition einer hinreichend konservativen Bemessungsbrandeinwirkung sichergestellt werden. Das entspricht im Übrigen der bisherigen Praxis, die Brandeinwirkung über die für Brände im normalen Hochbau (Wohn- und Bürogebäude und Gebäude mit vergleichbarer Nutzung) repräsentative Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102-2 und eine bauordnungsrechtlich geforderte, auf der sicheren Seite liegende Feuerwiderstandsklasse zu definieren.

Sofern die Brandeinwirkung mit Hilfe eines Naturbrandmodells ermittelt wird, sollte dieses im Mittel zutreffende Ergebnisse liefern, also weder versteckte Sicherheitszuschläge noch –defizite enthalten. Da die wesentlichen Eingangsdaten zur Ermittlung der Brandeinwirkungen zum Teil mit größeren Streuungen oder Unsicherheiten behaftet sind, müssen sie mit Bemessungswerten in den Nachweis eingehen, die nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit über- bzw. unterschritten werden. Dabei können die Bemessungswerte entweder direkt für die Brand- und Nachweissituation definiert oder über charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte vorgegeben werden. Vorzugsweise sollte ein Sicherheitsformat gewählt werden, das möglichst viele Nachweissituationen abdeckt.

Je nach verwendetem Naturbrandmodell und Nachweisverfahren sind allerdings ganz unterschiedliche Eingangsgrößen für die Brandeinwirkungen maßgebend und daher mit Teilsicherheiten zu beaufschlagen:

- die Brandbelastung, wenn die Branddauer für die Bemessung maßgebend ist (z. B. bei Bauteilen mit größerer Feuerwiderstandsdauer und bei Holzbauteilen mit konstanter Abbrandgeschwindigkeit (dieser Fall wird in [4], Anhang E und [5] in Anlehnung an [16] ausschließlich behandelt),
- die Brandausbreitungsgeschwindigkeit, wenn die Brandeinwirkung in der Frühphase des Brandes maßgebend wird (z. B. die Raumtemperatur bei ungeschützten Stahlbauteilen),
- die maximale Brandausdehnung und/oder Abbrandrate, die in der stationären Phase eines *brandlastgesteuerten Brandes* die maximale Wärmefreisetzungsrate und Temperaturentwicklung bestimmen,
- die Ventilationsbedingungen, die im *ventilationsgesteuerten Brand* für die maximale Wärmefreisetzungsrate und Temperaturentwicklung ausschlaggebend sind.

Die genannten Einflussgrößen werden bei den nachfolgenden probabilistischen Analysen als streuende Größen (Basisvariablen) eingeführt. Die statistischen Kennwerte werden der Literatur entnommen oder sinnvoll angenommen.

2.3 Zuverlässigkeit von Bauteilen im Brandfall

Die erforderliche Zuverlässigkeit von tragenden und/oder raumabschließenden Bauteilen eines Gebäudes im Brandfall hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den mit dem brandbedingten Versagen der Bauteile verbundenen Schadensfolgen ab.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem fortentwickelten Brand in einem abgetrennten Raumbereich mit der Grundfläche A im Bezugszeitraum von 1 Jahr ergibt sich zu

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (1)$$

mit

- p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit [1/a];
- p_2 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr;
- p_3 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage im Anforderungsfall.

Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand in der Nutzungseinheit kann nach Bub et al. [11] unter Annahme einer von der Grundfläche unabhängigen flächenbezogenen Brandentstehungshäufigkeit λ_1 nach Gl. (2) bestimmt werden. Diese ergibt sich aus den, in den Brandstatistiken des In- und Auslands in der Regel enthaltenen Angaben zu absoluten Häufigkeiten von (gemeldeten) Bränden in Gebäuden bestimmter Nutzungen pro Jahr. Sofern die aufsummierte Geschossfläche bekannt ist, kann die jährlichen Auftretensrate λ_1 von Entstehungsbränden in entsprechend genutzten Gebäuden je Quadratmeter Geschossfläche angegeben werden, vgl. z. B. [6], [7]. Alternativ kann sie nach Gl. (3) unter Berücksichtigung der meist unterproportional mit der Größe der Nutzungseinheit wachsenden Brandentstehungshäufigkeit bestimmt werden:

$$p_1 = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A \quad (2)$$

$$p_1 = 1 - \exp(-a \cdot A^b) \approx a \cdot A^b \quad (3)$$

mit

- A Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit [m^2];
- λ_1 mittlere jährliche Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche [$1/(m^2 \cdot a)$];

- a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter [1/(m²·a)];
- b Exponent, der von der Art der Nutzung und der Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängt.

Die erforderliche Zuverlässigkeit β_{fi} eines Bauteils oder Tragwerks im Brandfall kann aus der (bisher stillschweigend akzeptierten) Versagenswahrscheinlichkeit p_f von Bauteilen im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei (auf der Grundlage von Tabelle 2 für den Bezugszeitraum 1 Jahr) und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Brand in dem betreffenden Raumbereich (nach Gl. (3)) abgeleitet werden:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad (5)$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) \quad (6)$$

Dabei ist $\Phi()$ die Funktion der Standard-Normalverteilung und Φ^{-1} deren Umkehrfunktion.

Das erforderliche Sicherheitsniveau für tragende Bauteile wird in EN 1990 [2], im informativen Anhang C, ausgehend von Schadensfolgekassen (Tabelle 1) abgeleitet (Tabelle 2). In der außergewöhnlichen Bemessungssituation Brand darf berücksichtigt werden, dass ein Verlust der tragenden, aussteifenden und raumabschließenden Funktion der Bauteile erst nach einer längeren Branddauer auftritt.

Deshalb erscheint die Einstufung üblicher Hochbauten (gemäß MBO) in die Schadensfolgekasse CC2 bzw. Zuverlässigkeitsklasse RC2 als konservativ; eine niedrigere Klasse kann insbesondere bei Gebäuden bis zur Gebäudeklasse 4 angezeigt sein. Bei Sonderbauten mit größerem Personenaufkommen wie Versammlungsstätten, großen Einkaufszentren oder Hochhäusern oder bei Krankenhäusern und Altenpflegeheimen mit Insassen, die auf Fremdrettung angewiesen sind, sollte jedoch die Schadensfolgekasse CC2 bzw. Zuverlässigkeitsklasse RC2 zu Grunde gelegt werden. Erdgeschossige Gebäude mit ausreichend dimensionierten, übersichtlichen Rettungswegen, z. B. Industriehallen, können aufgrund des geringeren Personenrisikos jeweils eine Klasse niedriger eingestuft werden.

Tabelle 1: Klassen für Schadensfolgen nach EN 1990 [2], Anhang C

Schadens- folgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchti- gende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC2	Mittlere Folgen für Menschenle- ben, beträchtliche wirtschaftli- che, soziale oder umweltbeeint- rächigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öf- fentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bü- rogebäude)
CC1	Niedrige Folgen für Menschen und kleine oder vernachlässig- bare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigungende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personen- verkehr, (z. B. Scheunen, Ge- wächshäuser)

Tabelle 2: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β nach [2]
und zugehörige Versagenswahrscheinlichkeiten

Zuverlässig- keitsklasse	Zuverlässigkeitsindex β und Versagenswahrscheinlichkeit p_f			
	Bezugszeitraum 1 Jahr		Bezugszeitraum 50 Jahre	
RC 3	5.2	1.0E-07	4.3	8.5E-06
RC 2	4.7	1.3E-06	3.8	7.2E-05
RC 1	4.2	1.3E-05	3.3	4.8E-04

3 Statistische Kennwerte der Einflussgrößen

3.1 Brandentstehungshäufigkeit p_1

Die Brandrisiken sind nutzungsabhängig. Sie beruhen einerseits auf den Brandentstehungshäufigkeiten und Brandausbreitungswahrscheinlichkeiten und andererseits auf der mit der Ausbreitung von Feuer und Rauch einhergehenden Gefährdung von Personen und Sachwerten. Als Grundlage für eine sinnvolle Differenzierung nach der Brandentstehungshäufigkeit können Daten aus der internationalen Literatur dienen, die allerdings nicht einheitlich definiert sind.

Bezüglich der Häufigkeit von Entstehungsbränden bezogen auf die Nutzfläche der Gebäude findet man gut dokumentierte Daten aus Finnland in [6], [7] (Tabelle 3).

Tabelle 3: Anzahl der Brände von 1996 bis 1999, zugehörige Flächenbestände verschiedener Gebäudekategorien sowie resultierende relative jährliche Brandentstehungshäufigkeiten, nach Statistics Finland [6], [7]

Name	Nutzung	Brände	Gebäudefläche [m ²]	Brandhäufigkeit λ_1 [1/(m ² ·a)]
A	Wohngebäude	4361	231 565 978	4.7E-6
C	Geschäftsgebäude	356	18 990 450	4.7E-6
D	Bürogebäude	140	16 354 516	2.1E-6
E+L	Gebäude von Transport, Feuerwehr, Rettungsdiensten	123	10 627 751	2.9E-6
F	Betreuungs- und Pflegeein- richtungen	197	8 780 942	5.6E-6
G	Versammlungsstätten	112	7 379 199	3.8E-6
H	Bildungseinrichtungen	122	15 801 759	1.9E-6
J	Industriegebäude	1038	40 321 357	6.4E-6
K	Lagergebäude	405	7 434 710	1.4E-5
N	Andere Nutzungen	2650	2 437 960	2.7E-4

Die flächenbezogenen Werte liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie ältere Daten aus England, Holland und USA, die Grundlage der Auslegungssystematik nach Bub et al. [11] waren. In Tabelle 4 sind die Angaben aus den ausgewerteten Quellen [6] bis [11] gegenübergestellt.

Tabelle 4: Nutzungsabhängige Brandentstehungshäufigkeiten nach internationalen Quellen

Nutzung	Auftrittensrate λ_1 [1/(m ² ·a)]				Auftrittenswahrscheinlichkeit p_1 [1/a]	
	[6]	[8]	[9]	[11]	[8]	[9]
Wohngebäude	4.7E-6	2.0E-6		<1.0E-6	4.0E-4	3.0E-3
Bürogebäude	2.1E-6	1.0E-6	1.2E-5		8.0E-4	6.2E-3
Betreuungs- und Pflegeeinrichtungen	5.6E-6					0.3
Versammlungsstätten	3.8E-6		9.7E-5			2.0E-2 -1.2E-1
Bildungseinrichtungen	1.9E-6					4.0E-2
Geschäftsgebäude	4.7E-6					
Transport, Feuerwehr, Rettungsdienst	2.9E-6					
Industriegebäude	6.4E-6	2.0E-6		2.0E-6	6.0E-3	4.4E-2
Lagergebäude	1.4E-5		3.3E-5			1.3E-2
Andere Nutzungen	2.7E-4					

3.2 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung p_2 und p_3

Mit einer Beeinträchtigung der Konstruktion ist nur zu rechnen, wenn ein Entstehungsbrand nicht im frühen Stadium durch die Nutzer in Selbsthilfe oder durch die Feuerwehr gelöscht wird und es zu einer Brandausbreitung kommt. Mit p_2 wird daher die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr berücksichtigt und mit p_3 die Ausfallwahrscheinlichkeit der vom Feuerwehreinsatz unabhängigen Löschanlage.

In Tabelle 5 sind nach einer englischen Untersuchung [9] die Anteile der Brände am Tag und in der Nacht angegeben, bei denen es zu einer Ausbreitung über den Raum der Brandentstehung hinaus kam. Dabei hängt es selbstverständlich von der jeweiligen Raumaufteilung und –größe ab, welche Brandfläche tatsächlich betroffen war bzw. wie die Brandgröße einzustufen war.

Tabelle 5: Nutzungsabhängiger Anteil der Brände mit Ausbreitung über den Ursprungsraum hinaus nach [9]

Nutzung	Anteil der Brände mit Ausbreitung über den Raum der Brandentstehung hinaus			
	eingeschossig		mehrgeschossig	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Etagenwohnungen			0,10	0,15
Wohngebäude			0,10	0,19
Büros			0,08	0,21
Geschäfte	0,10	0,18	0,13	0,16
Versammlungsstätten	0,19	0,44	0,13	0,25
Industriegebäude	0,12	0,15	0,18	0,30
Lager	0,28	0,46	0,30	0,56

Unabhängig davon ist aber zu erkennen, dass sich die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit zumindest bei Brandentstehung am Tag recht gut mit dem Erfahrungswert $p_2 = 0,1$ aus [11] deckt. In der Nacht ist sie durchweg höher, insbesondere wenn sich dann im Gebäude keine Personen aufhalten, z. B. in Versammlungsstätten oder Lagern, und wenn keine Brandmelde- und Löschanlage vorhanden ist.

Aus einer Auswertung von Brandstatistiken deutscher Feuerwehren in [24] lässt sich der Anteil von Großbränden (Definition: Einsatz von mehr als 3 C-Rohren) ebenfalls mit ca. 10 % ablesen (Bild 2), wobei es zwischen den Durchschnittswerten für das Flächenland Bayern mit überwiegend freiwilligen Feuerwehren und der Großstadt Frankfurt/Main mit einer schlagkräftigen Berufsfeuerwehr Unterschiede gibt.

Alternativ können auch vereinfachte analytische Gleichungen zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 der Brandbekämpfung verwendet werden. Diese werden in Anhang A näher erläutert und bei den Analysen in Kapitel 7 berücksichtigt.

Der Anteil der gemeldeten Brände, die bei Eintreffen der Feuerwehr bereits durch Nutzer in Selbsthilfe gelöscht waren, liegt nach der Brandstatistik von Bayern (Bild 2) bei ca. 5 %. Nach der Einsatzstatistik der Londoner Feuerwehr [25] beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit der Selbsthilfemaßnahmen in Wohngebäuden 72 % und in sonstigen Gebäuden 74 % (Bild 3).

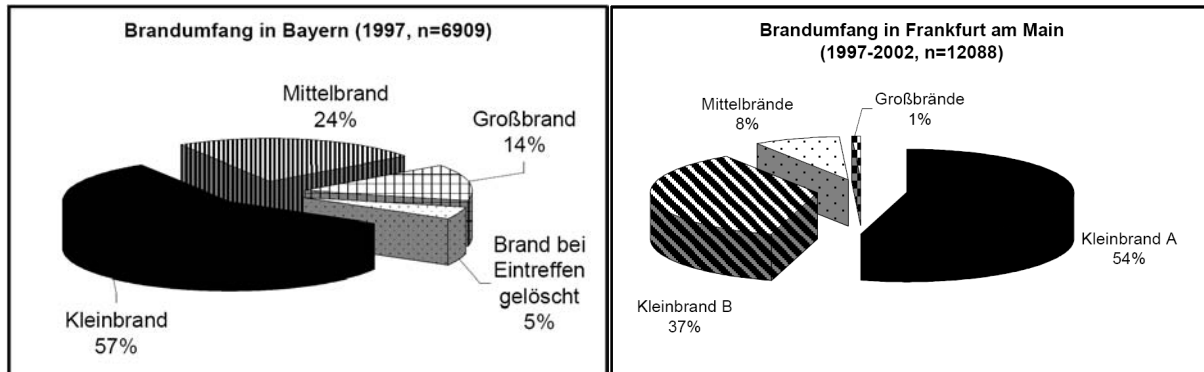


Bild 2: Anteile der unterschiedlich großen Brände nach Einsatzstatistik der Feuerwehren in Bayern und in Frankfurt/Main nach [24]

Art des Brandes	Anzahl Brände	Prozent-satz	Brandfläche [m ²]	
			Mittelwert	95%-Fraktile
Wohnungsbrände				
- Erstbekämpfung erfolgreich	92	28	0,9	3,1
- Erstbekämpfung versagt	240	72	1,7	6,0
Brände in sonstigen Gebäuden				
- Erstbekämpfung erfolgreich	32	26	0,7	2,3
- Erstbekämpfung versagt	92	74	2,5	9,4

Bild 3: Einfluss der Brandbekämpfung durch die Nutzer auf die Größe der Brandfläche bei Entdeckung des Brandes (nach [25])

Für die Ausfallwahrscheinlichkeit von Löschanlagen werden in Deutschland seitens der Sachversicherer sehr geringe Werte genannt, z. B. $p_3 = 0,02$ für Sprinkleranlagen; dagegen wird genannt, während in internationalen Veröffentlichungen eher mit Werten um $p_3 = 0,1$ gerechnet wird.

3.3 Brandlastdichte

Für die Dauer des nicht durch Löschanlagen beeinflussten Brandes und damit auch für die Höhe der Temperaturen sind die Brandlastdichten maßgebend. Sie sind daher ein wichtiges Kriterium für den erforderlichen Feuerwiderstand der Konstruktion und auch für die Gefährdung von Personen durch Hitze und Rauch.

In Tabelle 6 sind Durchschnittswerte der Brandlastdichten für verschiedene Nutzungen aufgrund einer Auswertung internationaler Quellen in [10] zusammengestellt; daran lassen sich auch die zufälligen Streuungen und die daraus resultierenden Bandbreiten der Brandlasten erkennen.

Tabelle 6: *Nutzungsabhängige Brandlastdichten nach [10]*

Nutzung	Brandlastdichte [MJ/m ²]				
	Mittelwert	Standardabweich.	80 %-Fraktile	90 %-Fraktile	95 %-Fraktile
Wohnen	780	234	948	1085	1217
Krankenhaus (Zimmer)	230	69	280	320	359
Hotel (Zimmer)	310	93	377	431	484
Bücherei	1500	450	1824	2087	2340
Büro	420	126	511	584	655
Schule (Klassenzimmer)	285	85,5	347	397	445
Einkaufszentrum	600	180	730	835	936
Theater (Kino)	300	90	365	417	468
Verkehr (öffentl. Bereich)	100	30	122	139	156
Industrie – Lager *)	1180		1800	2240	2690
Industrie – Produktion *)	300		470	590	720

**) zusätzliche Angaben nach [9] basierend auf einer Log-Normalverteilung*

Offensichtlich decken die Brandlastdichten in Wohngebäuden die Verhältnisse bei vielen anderen Nutzungen auf der sicheren Seite ab. Unter diesem Gesichtspunkt gibt es grundsätzlich keinen Anlass, die Anforderungen der Bauordnung, die bekanntlich auf Wohngebäude und vergleichbar genutzte Gebäude zugeschnitten sind, hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile zu verschärfen, weil die Brandverläufe und Brandwirkungen nicht ungünstiger sein werden. Eine Ausnahme stellen Bibliotheken und Lagerräume dar, bei denen die Mittelwerte deutlich höhere mittlere Brandlastdichten als Wohnungen und auch größere Streuungen aufweisen.

3.4 Materialkennwerte

In den Nachweis der Konstruktion für die maßgebende Brandeinwirkung gehen verschiedene Materialkennwerte ein, die mehr oder weniger stark streuen und zum Teil mit vereinfachten Modellen ermittelt werden, die zusätzliche Unsicherheiten enthalten. Die wichtigsten Materialkennwerte betreffen einerseits mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, E-Modul, thermische Dehnung und andererseits die thermischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte. Daneben gibt es spezielle Kennwerte wie die Abbrandrate von Holz.

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die statistischen Kennwerte für die benötigten Materialkennwerte vorwiegend der Literatur [12] entnommen. Sie sind im Zusammenhang mit den untersuchten Bauteilen in Abschnitt 4 dokumentiert.

4 Grundlagen der Struktur- und Zuverlässigkeitsanalysen

4.1 Brandmodelle

Zur Berechnung der Brandraumtemperaturen des jeweiligen Brandszenarios stehen verschiedene mathematische Brandsimulationsmodelle zur Verfügung, die sich in drei Gruppen einteilen lassen. Die erste Gruppe beinhaltet empirisch belegte Ansätze z. B. zur Modellierung der Plume-Temperaturen oder des Ceiling Jets. Die zweite Gruppe umfasst die Zonenmodelle und die dritte Gruppe die Feldmodelle (CFD). Allen ist gemein, dass sie als Eingangsgröße eine Brandlast Q benötigen, die idealerweise vor Ort ermittelt wird. Unter der Brandlast Q versteht man die Summe der Verbrennungswärme sämtlicher in einem Raum enthaltenen brennbaren Stoffe.

Mit Hilfe der Brandlast lässt sich eine Energiefreisetzungsrate ermitteln, die als Eingangsgröße für die Brandmodelle dient. Bei Bauwerken, die sich in der Planung befinden, muss die Brandlast sinnvoll abgeschätzt werden. Für eine probabilistische Bemessung muss zusätzlich noch die Streuung der Brandlast abgeschätzt werden.

4.2 Strukturanalyse

4.2.1 Betonbauteile

Die Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt wird mit Hilfe der Fourier-Gleichung berechnet.

$$c_p \cdot \rho \cdot \delta T / \delta t = \text{div.} \lambda \cdot (\text{grad } T) + W \quad (7)$$

Dabei werden die thermischen Materialkennwerte für die spezifische Wärmekapazität c_p , die Rohdichte ρ und die Wärmeleitfähigkeit λ von Beton und Stahl als konstante Werte in Anlehnung an den Eurocode temperaturabhängig berücksichtigt. Die Fourier-Gleichung wird rechnergestützt mit dem Computerprogramm FIRES-T [18]) gelöst. Die Wärmeübergangsbedingungen berücksichtigen einen konvektiven ($\alpha = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$) und einen radiativen ($\epsilon = 0,8$) Anteil [4]. Der Feuchtegehalt des Betons wird mit 3 Massen-% angenommen.

Die Tragfähigkeit des Betonquerschnitts wird mit Hilfe der temperaturabhängigen thermo-mechanischen Werkstoffeigenschaften rechnergestützt ermittelt.

Das Trag- und Verformungsverhalten der Stütze unter Brandbeanspruchung wird unter Berücksichtigung der mechanischen Einwirkungen, der geometrischen Abmes-

sungen, der Wärmeeinwirkungen, der temperaturabhängigen thermo-mechanischen Werkstoffeigenschaften und der geometrisch nichtlinearen Effekte (Theorie II. Ordnung) analysiert. Die Berechnung wird programmgesteuert mit dem institutseigenem Computerprogramm STABA-F [17] durchgeführt.

Das temperaturabhängige, nichtlineare thermische und mechanische Materialverhalten des Betons sowie der Bewehrung ist in Bild 4 und Bild 5 dargestellt.

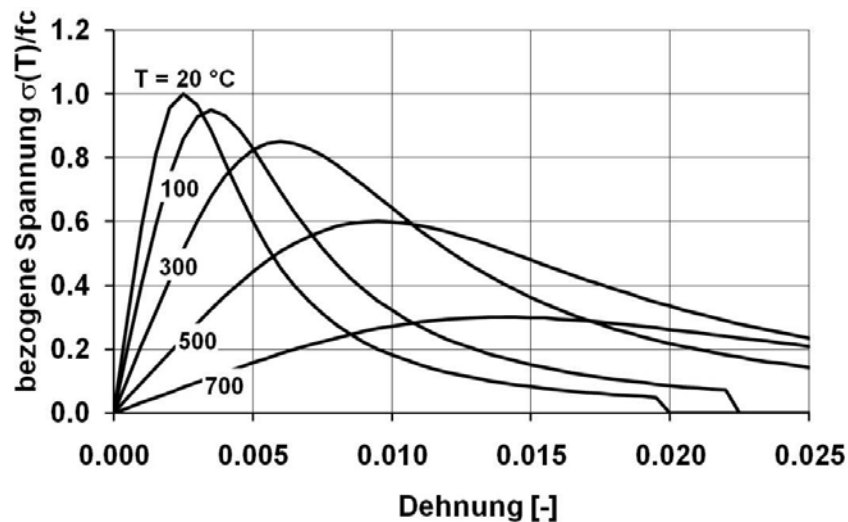


Bild 4: Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Beton mit quarzhaltigem Zuschlag nach Eurocode 2 [20]

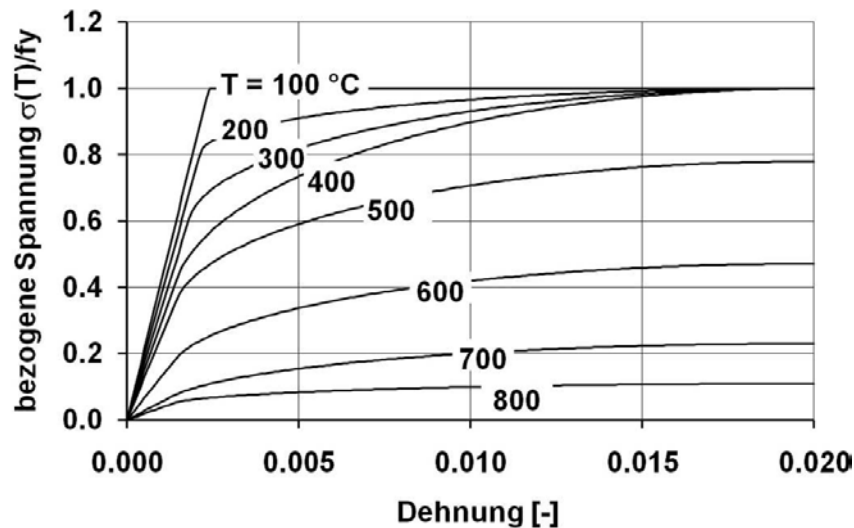


Bild 5: Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Bewehrungsstahl nach Eurocode 2 [20]

4.2.2 Stahlbauteile

Die Bauteilerwärmung wird mit Hilfe des vereinfachten Rechenverfahrens nach Eurocode 3 [21] ermittelt. Ausgehend von der Brandraumtemperatur θ_g wird dabei die

Änderung der Querschnittstemperatur des bekleideten Stahlprofils $\Delta\theta_{a,t}$ im Zeitschrittverfahren berechnet.

Die Querschnittsträgfähigkeit und Stütztragfähigkeit wird mit Hilfe der vereinfachten Rechenverfahren nach Eurocode 3 auf Grundlage der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte ermittelt. Der Einfluss der erhöhten Stahltemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Baustahl ist in Bild 6 dargestellt.

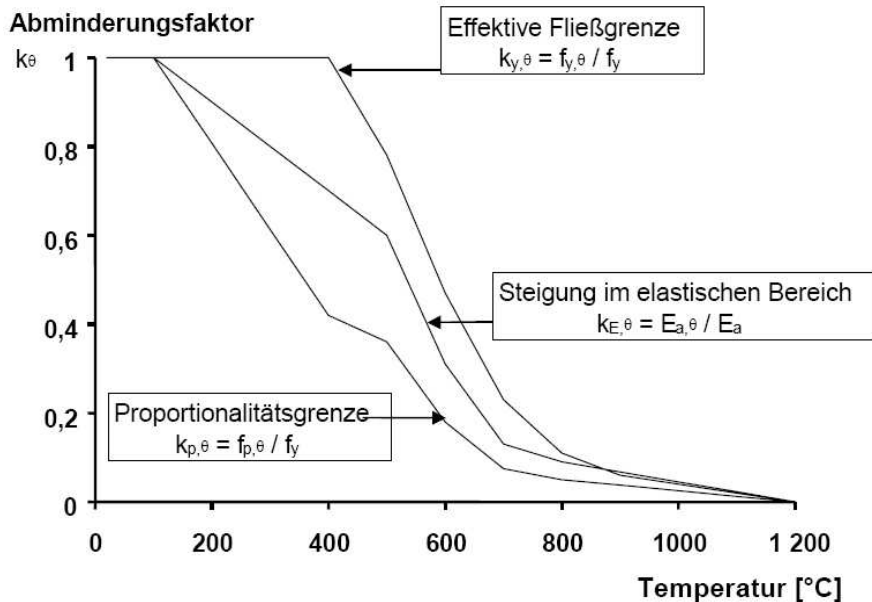


Bild 6: Abhängigkeit der Streckgrenze, der Proportionalitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls von der Temperatur nach Eurocode 3 [21]

4.2.3 Holzbauteile

Im Eurocode 5 [22] wird für Nadelholz in Form von Brettschichtholz der Bemessungswert der Abbrandrate mit $\beta_n = 0,7 \text{ mm/min}$ und für Vollholz mit $\beta_n = 0,8 \text{ mm/min}$ angegeben. Mit dem Wert β_n sind auch Effekte aus dem verstärkten Eckabbrand abgedeckt, die nicht gesondert betrachtet werden müssen. Die Abbrandrate wird über den Brandverlauf als konstant angenommen. Damit ergibt sich die Abbrandtiefe in Abhängigkeit der Branddauer t zu

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (8)$$

Im vereinfachten Nachweis wird ein ideeller Restquerschnitt mit einer vergrößerten effektiven Abbrandtiefe d_{ef} berechnet:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (9)$$

Damit werden Reduktionen der Festigkeit und des E-Moduls von Holz aufgrund der Durchwärmung des Querschnittes kompensiert, so dass mit den Materialkennwerten für Normaltemperatur gerechnet werden kann.

4.3 Zuverlässigkeitsanalyse von Grenzzuständen

Für die zu untersuchenden Bauteile und Tragwerke unter Brandeinwirkung werden Grenzzustände definiert, bei deren Überschreiten die Tragfähigkeit oder Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Wenn die Grenzzustände durch analytische Grenzzustandsfunktionen beschrieben sind, kann die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit beim Brand $p_{f,fi}$ bzw. der zugehörige Zuverlässigkeitsindex β_{fi} mit Zuverlässigkeitsmethoden 1. oder 2. Ordnung (FORM/SORM-Methoden) berechnet werden [23]. Kann der Grenzzustand dagegen nur mit Hilfe eines numerischen Modells, z. B. mit der FEM, berechnet werden, erfolgt die Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe von Simulationsverfahren nach der Monte-Carlo-Methode, wobei zufällige Werte für die Einflussgrößen mit einem Simulationsprogramm MCSim [15] generiert werden.

Um umfangreiche Parameterrechnungen für Raumbrände automatisiert durchführen zu können, wurde ein Programmpaket entwickelt, das die Verwendung von verschiedenen Brandmodellen zur Ermittlung von Temperaturzeitkurven ermöglicht:

- Einheitstemperaturzeitkurve für Vergleichszwecke,
- vereinfachte Naturbrandkurve nach Zehfuß [14],
- Temperaturzeitkurve auf Grundlage einer Berechnung mit dem Zonenmodell CFAST [13].

Das Programm MCSim generiert Zufallswerte für die streuenden Eingangsgrößen und berechnet mit der Monte-Carlo-Methode die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. den Sicherheitsindex β_{fi} . Für die thermische und mechanische Analyse [17] entwickelt, das die Berechnung von temperaturbeanspruchten Bauteilen in Stahlbeton-, Verbund-, Stahl- und Holzbauweise erlaubt. Der Ablauf der programmgesteuerten Berechnung ist schematisch in Bild 7 dargestellt.

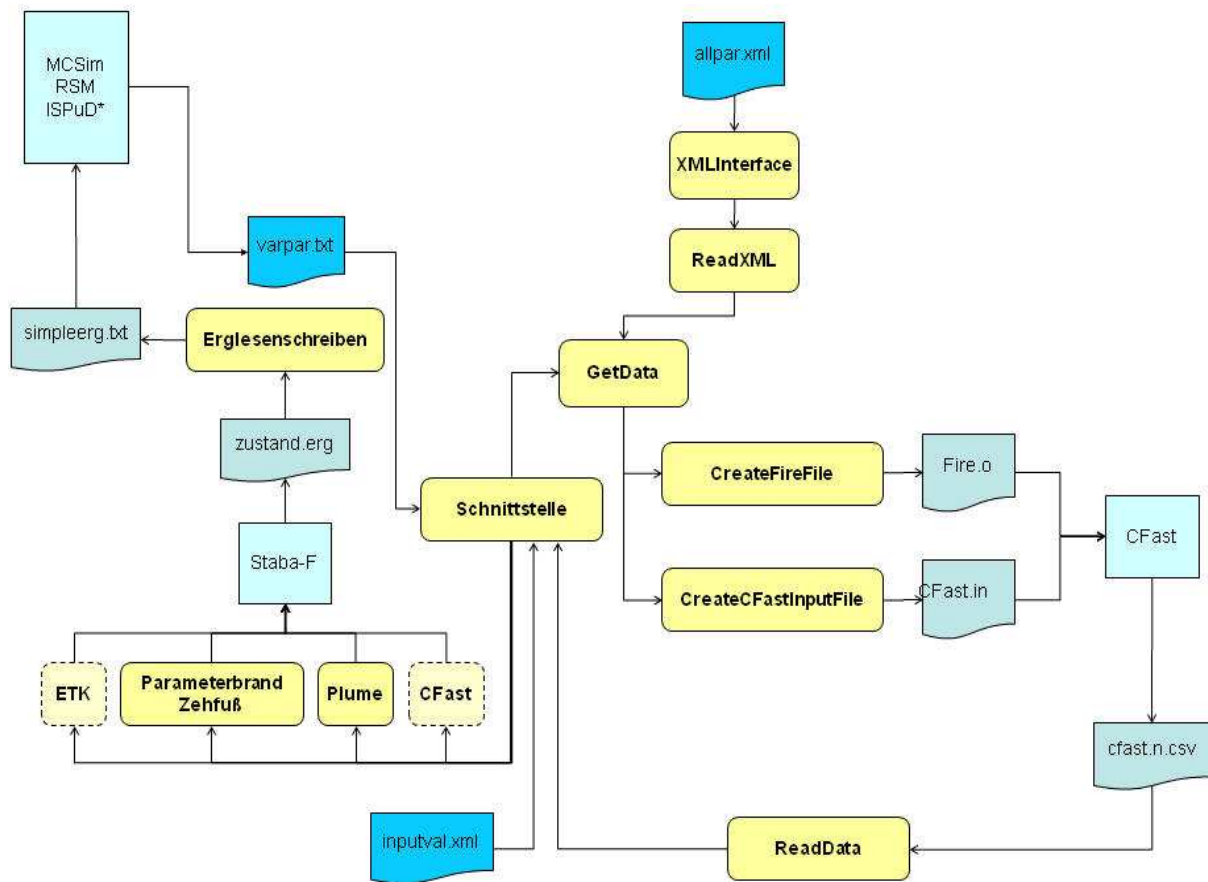


Bild 7: Programmstruktur des Programmpaketes für die automatisierte numerische Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens und der Zuverlässigkeit brandbeanspruchter stabförmiger Bauteile

4.4 Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen

Wenn der Einfluss von anlagentechnischen und/oder abwehrenden Brandschutzmaßnahmen auf das Brandszenario und die Brandeinwirkungen berücksichtigt werden soll, sind aufwändigere Systemzuverlässigkeitsanalysen durchzuführen. Dabei ist von Bedeutung, mit welcher Wahrscheinlichkeit die jeweilige Maßnahme im Brandfall verfügbar ist und wie sie sich auf den Verlauf des Brandes auswirkt. Hat z. B. ein Brand beim Eintreffen der Feuerwehr schon eine bestimmte Größe überschritten, so ist die Feuerwehr erfahrungsgemäß nicht mehr in der Lage, diesen wirksam zu löschen. Sie muss ihre Maßnahmen dann darauf beschränken, ein Übergreifen des Brandes auf andere Gebäude(teile) zu verhindern.

Ob ein bestimmter „Versagenspfad“ für die einzelner Bauteile oder des Tragwerks maßgebend wird, hängt unter anderem auch von dem zu erwartenden Schaden ab. So ist z. B. das Versagen einer Sprinkleranlage mit ca. 2 % höchst unwahrscheinlich, der Schaden an Gebäude und Inventar kann aber bei dem dann entstehenden Vollbrand erheblich größer sein, so dass der Vollbrand bemessungsrelevant wird. Diese

Überlegung wurde z.B. in dem Sicherheitskonzept der DIN 18230-1 [16] für Industriegebäude verfolgt.

Da das bemessungsrelevante Brandszenario auch mit viel Erfahrung nicht immer eindeutig erkannt werden kann, müssen oft mehrere Szenarien untersucht werden, die jeweils mit mehr oder weniger großem Gewicht in die Systemzuverlässigkeit eingehen. In Bild 8 ist schematisch ein Ereignisbaum dargestellt, bei dem die Funktion oder der Ausfall einzelner Brandschutzmaßnahmen eine Vielzahl möglicher Versagenspfade ergeben, an deren Ende jeweils ein bestimmtes Versagensereignis steht. Die Berechnung liefert dafür bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten, aus denen sich Schadenshäufigkeiten pro Jahr ermitteln lassen.

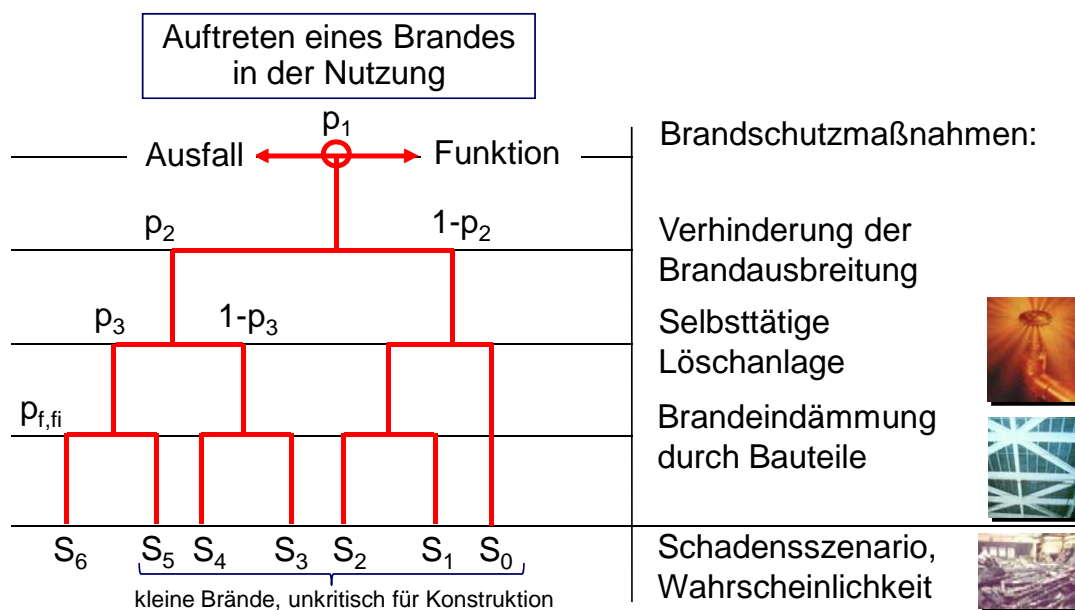


Bild 8: Ereignisbaum mit verschiedenen Brandschutzmaßnahmen (schematisch)

5 Auswahl der zu untersuchenden Gebäude und Bauteile

5.1 Auswahlkriterien

In diesem Forschungsvorhaben können aufgrund des begrenzten zeitlichen und finanziellen Rahmens nicht alle denkbaren Gebäude- und Nutzungsarten und auch nicht alle möglichen Bauteile und Tragwerke untersucht werden, zumal die numerischen Tragwerksanalysen in Verbindung mit den Zuverlässigkeitsanalysen mittels den Methoden der Zuverlässigkeitstheorie 1. und 2. Ordnung sowie optimierten Monte-Carlo-Simulationsverfahren in komplizierten Fällen äußerst aufwändig und zeitraubend sind.

Daher war es erforderlich, eine sinnvolle Auswahl an Gebäuden und Bauteilen zu treffen, mit denen der typische Anwendungsbereich der Brandschutznachweise nach den Eurocodes weitgehend abgedeckt werden kann.

Hinsichtlich der Gebäude ist zu unterscheiden zwischen kleineren und großen Räumen, in denen sich Brände unterschiedlich entwickeln und ausbreiten und somit auch unterschiedliche Temperaturzeitverläufe zu erwarten sind. Die Nutzungsarten sind dabei vor allem wegen der unterschiedlichen Brandlastdichte von Bedeutung. Die zu untersuchenden Bauteile sollen einerseits die häufigsten Bauweisen abdecken und andererseits auch das unterschiedliche Trag- und Verformungsverhalten – vorwiegend auf Biegung be berücksichtigen.

Hinsichtlich der Art der Nachweise sollten alle drei Nachweisstufen - tabellarische Daten, vereinfachtes Rechenverfahren, allgemeines Rechenverfahren – abgedeckt und nach Möglichkeit auch direkt verglichen werden.

5.2 Wohn-/Bürogebäude

5.2.1 Brandraum und Brandbeanspruchung

Die Geometrie des Brandraumes im Wohn-/Bürogebäude ist aus Tabelle 7 zu ersehen. Es handelt sich um einen größeren Raum mit 36 m^2 Grundfläche und 3 m lichter Höhe, der über Fenster mit einer Gesamtfläche von 25 % der Grundfläche verfügt. Diese stehen im Brandfall als Ventilationsöffnung zur Verfügung, so dass es zu einem brandlastgesteuerten Brandverlauf kommt.

Tabelle 7: Geometrie des Brandraums

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Raubbreite	b	m	konst.	6	-	-		gewählt
Raumlänge	l	m	konst.	6	-	-		gewählt
Raumfläche	A	m^2	konst.	36	-	-	$b \cdot l$	
Raumhöhe	h	m	konst.	3	-	-		gewählt
gesamte Fläche der Hülle ohne Fenster	A_t	m^2	konst.	136	-		$(2 \cdot b + 2 \cdot l) \cdot h + 2 \cdot A_w$	
Fensterhöhe	h_w	m	konst.	1,7	-	-	-	gewählt
Fensterbreite	b_w	m	konst.	5	-	-	-	gewählt
Fensterfläche	A_w	m^2	konst.	8,5	-	-	$h_w \cdot b_w$	

Der natürliche Brand wird mit dem vereinfachten Modell nach [14] berechnet, das unter den vorliegenden Randbedingungen vergleichbare Ergebnisse wie eine Berechnung mit dem international anerkannten Zonenmodell CFAST [13] liefert. Die Eingangsdaten sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Hierbei wurde die Brandlast-dichte für Wohngebäude gemäß Tabelle 6 zu Grunde gelegt, die auch Bürogebäude (mit Sicherheitsreserve) abdeckt.

Tabelle 8: Annahmen für die Ermittlung der natürlichen Temperaturzeitkurve [14]

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Brandlast- dichte	q	MJ/ m ²	Gum- bel	780	234	0,3		[5]
Wärme- freiset- zungsrate	HRR	MW	Gauß- Normal	9	1,8	0,2	HRR = 0,25*A _f	Gewählt
Brand- entwick- lungszeit	t _g	s	konst.	300	-	-	Mittlere Wach- stumsrate	[4]
therm. Ei- genschaft der Um- fassungs- bauteile	b	J/(m ² s ^{0,5} K	konst.	2280	-	-	-	Gewählt
Brandflä- che	A _f	m ²	konst.	36	-	-	= Raumflä- che	

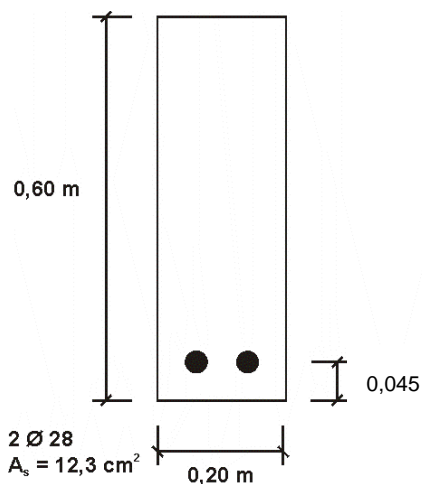
5.2.2 Betonbauteile

Stellvertretend für Biegebauteile wird ein Balken mit dem in Bild 9 dargestellten Rechteckquerschnitt untersucht. Die Abmessungen und die statistischen Kennwerte der Einflussgrößen sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Der Balken wurde nach DIN 1045-1 für die gegebene Belastung bemessen. Die Mindestbreite und der Achsabstand der Bewehrung sind nach Eurocode [20] für die Feuerwiderstandsklasse R 90 ausreichend.

Tabelle 9: Bauteilkenngrößen des Stahlbetonbalkens von 20 x 60 cm²

Parameter	Sym- bol	Einheit	Verteil- ung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Varia- tions- koeff- zient	Anmer- kung	Quelle
Höhe	h	m	konst.	0,6	-	-	$h = 3 \cdot b$	
Breite	b	m	konst.	0,2	-	-	-	ge- wählt
Achsab- stand der Bewehrung	a	m	konst.	0,045	-	-	$a_{sd} =$ 0,055 m (seitlich)	[20]
Beweh- rungsquer- schnitt	A_s	cm ²	konst.	12,3	-	-	-	ge- wählt
Streckgren- ze Beweh- rungstahl	f_y	MN/m ²	Gauß- Nor- mal	560	30	0,055	-	[12]
Betondruck- festigkeit	f_c	MN/m ²	Log- Nor- mal	38	5	0,13	C30/37	
ständige Einwirkung	G	kNm	Gauß- Nor- mal	1272	127	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k =$ 70/30	Bemes- sung
veränderli- che Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	282	141	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemes- sung



Beton C30/37
BSt 500S

$$M_{Rd} = 253,4 \text{ kNm}$$

$$M_{gk} = 127,2 \text{ kNm}$$

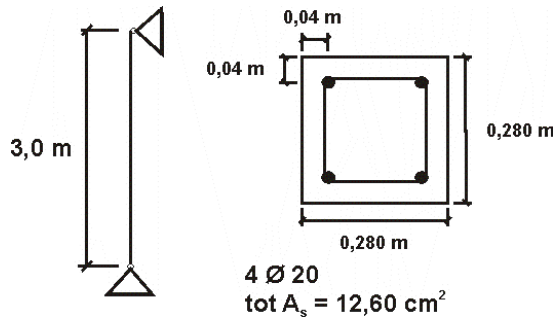
$$M_{qk} = 54,5 \text{ kNm}$$

$$a = 0,045 \text{ m}$$

$$a_{sd} = 0,055 \text{ m (seitlich)}$$

Bild 9 Querschnitt und Beanspruchung des Stahlbetonbalkens

Analog sind in Bild 10 und Tabelle 10 die entsprechenden Angaben für die Stahlbetonstütze zu finden.



Beton C30/37
BSt 500S

$N_{Rd} = 2384 \text{ kN}$
 $N_{gk} = 1197 \text{ kNm}$
 $N_{qk} = 513 \text{ kNm}$

Bild 10 Querschnitt und Beanspruchung Stahlbeton-Innenstütze (monolithisch mit Geschossdecken verbunden)

Tabelle 10: Bauteilkenngrößen der Stahlbetonstütze von 28 x 28 cm²

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	3	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	1,5	-	-	-	
Höhe	d	m	konst.	0,28	-	-	-	gewählt
Breite	b	m	konst.	0,28	-	-	-	gewählt
Achsabstand der Bewehrung	a	m	konst.	0,04	-	-	-	gewählt
Bewehrungsquerschnitt	tot A_s	cm ²	konst.	12,6	-	-	-	gewählt
Streckgrenze Bewehrungsstahl	f_y	MN/m ²	Gauß-Normal	560	30	0,055	BSt 500	[12]
Betondruckfestigkeit	f_c	MN/m ²	Log-Normal	38	5	0,13	C30/37	
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	1197	119,7	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k = 70/30$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	265	132,5	0,50	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemessung

5.2.3 Stahlbauteile

Stellvertretend für Biegebauteile wird ein Stahlträger HE280A aus Baustahl S235 untersucht. Aufgrund einer Bemessung nach Eurocode [21] für R 90 wurde eine kastenförmige Bekleidung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten $d_p = 19$ mm gewählt.

Der Bemessungswert des maximalen Biegemoments bei Normaltemperatur berechnet sich aus den charakteristischen Werten der Momentenanteile $M_{gk} = 95$ kNm und $M_{qk} = 63$ kNm zu $M_{Rd} = 223$ kNm.

Die statistischen Kennwerte der Einflussgrößen sind aus Tabelle 11 zu ersehen.

Tabelle 11: Bauteilkenngrößen des Stahlträgers HE280A mit Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten(GFK)

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Varia- tions- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Wider- standsmo- ment	W_y	cm ²	konst.	1010	-	-	-	
Beiwert	α_{pl}	-	konst.	1,1	-	-	-	
Streckgrenze Stahl	f_y	kN/ cm ²	Gauß- Normal	28	1,96	0,07	-	[12]
Beklei- dungsdicke	d_p	m	konst.	0,019	-	-	-	[21]
Verhältnis- wert	A_p/V	1/m	konst.	88	-	-	-	
ständige Einwirkung	G	kNm	Gauß- Normal	95	9,5	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=$ 60/40	Bemes- sung
veränderli- che Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	327	164	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemes- sung
Wärmeleitfä- higkeit (GKF)	λ_p	W/ (m*K)	konst.	0,2	-	-	-	[21]
Spezifische Wärme (GKF)	c_p	J/ (kg*K)	konst.	1700	-	-	-	
Dichte (GKF)	ρ_p	kg/m ³	konst.	945	-	-	-	

Bei der untersuchten Stahlstütze handelt es sich um eine Innenstütze, die im Brandfall als beidseitig eingespannt betrachtet werden kann. Nach Eurocode 3 [21] wurde eine kastenförmige Bekleidung aus GKF $d_p = 18$ mm für R 90 gewählt. Die statistischen Kennwerte der Einflussgrößen sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Bauteilkenngrößen der Stahlstütze aus HE240B mit Bekleidung aus Gipskartonfeuerschutzplatten GKF

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Varia- tions- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	3	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	1,5	-	-	-	
Querschnittsfläche Stahl	A	cm ²	konst.	106				
Streckgrenze Stahl	f_y	kN/cm ²	Gauß-Normal	28	1,96	0,07	-	[12]
Knickbeiwert	χ_{fi}	-	konst.	0,83	-	-	-	Bemesung
Bekleidungsdicke	d_p	m	konst.	0,018	-	-	-	[21]
Verhältniswert	A_p/V	1/m	konst.	91	-	-	-	
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	770	77	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=60/40$	Bemesung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	265	132,5	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemesung
Wärmeleitfähigkeit (GKF)	λ_p	W/(m*K)	konst.	0,2	-	-	-	[21]
Spezifische Wärme (GKF)	c_p	J/(kg*K)	konst.	1700	-	-	-	
Dichte (GKF)	ρ_p	kg/m ³	konst.	945	-	-	-	

5.2.4 Holzbauteile

Abweichend von den Beton- und Stahlbauteilen, werden die Holzbauteile für die Feuerwiderstandsklasse F 60 ausgelegt.

Die Eingangsdaten für die Untersuchung des Balkens aus Brettschichtholz mit den Querschnittsabmessungen $b/h = 18 \text{ cm}/34 \text{ cm}$ sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Bauteilkenngrößen des (rechteckiger Brettschichtholzquerschnitt)

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Querschnittshöhe	h	[cm]	konst.	34	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Querschnittsbreite	b	[cm]	konst.	18	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	[22]
Biegezugfestigkeit	f_m	kN/cm ²	Log-Normal	35,56	4,978	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ -Fraktile	DIN 1052
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß-Normal	1260	138.6	0,11		
ständige Einwirkung	G	kNm	Gauß-Normal	22,86	2,286	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k = 0,65$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kNm	Gumbel	5,90	2,95	0,5	$Q_k = 95\%$ -Fraktile	Bemessung
Zündtemperatur	T_{zuend}	°C	Gauß-Normal	275	50	0,18		
Abbrandrate	β_n	mm/min	Gauß-Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 = 90%-Fraktile	

Tabelle 14 enthält die Angaben für die Holzstütze mit dem Querschnitt b/h = 18 cm/18 cm dargestellt.

Tabelle 14: Bauteilkenngrößen der Holzstütze 18/18 (rechteckiger Brettschichtholzquerschnitt)

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	EC 5
Biegezugfestigkeit	f_m	kN/cm ²	Log-Normal	35,56	4,978	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ -Fraktil von f_m	
Druckfestigkeit	$f_{c,0}$	kN/cm ²	Log-Normal	30,85	2,777	0,09	$F_{c,0,k} = 5\%$ -Fraktil von $f_{c,0}$	
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß-Normal	1260		0,11		
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	129,6	12,96	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=0,65$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	33,53	16,76	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemessung
Zündtemperatur	T_{zuend}	°C	Gauß-Normal	250	30	0,12		
Abbrandrate	β_n	mm/min	Gauß-Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 = 90%-Fraktile	EC 5
Querschnittshöhe	h	[cm]	konst.	18	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Querschnittsbreite	b	[cm]	konst.	18	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	3	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	1,5	-	-	-	

5.3 Verkaufs-/Versammlungsstätte

5.3.1 Brandraum und Brandbeanspruchung

Stellvertretend für Gebäude mit großen Brandräumen wurde eine Verkaufsstätte gewählt. Der Verkaufsraum hat eine Grundfläche von 200 m² bei 3 m lichter Höhe. Es sind Fenster mit insgesamt 27 m² Öffnungsfläche vorhanden, die im Brandfall als Ventilationsöffnung dienen; der Brand verläuft dann brandlastgesteuert.

Die geometrischen und brandschutztechnischen Randbedingungen sind in Tabelle 15 und 16 zusammengestellt. Die Brandlastdichte gemäß Tabelle 6 deckt auch Versammlungsräume mit ab.

Tabelle 15: Geometrie des Brandraumes

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Raubbreite	b	m	konst.	10	-	-		gewählt
Raumlänge	l	m	konst.	20	-	-		gewählt
Raumfläche	A	m ²	konst.	200	-	-	b*l	
Raumhöhe	h	m	konst.	3	-	-		gewählt
gesamte Fläche der Hülle ohne Fenster	A _t	m ²	konst.	533			(2*b+2*l)*h +2*A _w	
Fensterhöhe	h _w	m	konst.	1,7	-	-	-	gewählt
Fensterbrei- te	b _w	m	konst.	16	-	-	-	gewählt
Fensterflä- che	A _w	m ²	konst.	27,2	-	-	h _w *b _w	

Tabelle 16: Annahmen für die Ermittlung der natürlichen Temperaturzeitkurve [14]

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Brandlast- dichte	q	MJ/ m ²	Gum- bel	600	180	0,3		[12]
Wärmefrei- setzungsrate	HRR	MW	Gauß- Normal	50	10	0,2	HRR = 0,25*A _f	gewählt
Brand- entwick- lungszeit	t _g	s	konst.	300	-	-	Mittlere Wach- stumsrate	[4]
therm. Ei- genschaften Umfassungs- bauteile	b	J/(m ² s ^{0,5} K)	konst.	2280	-	-	-	gewählt
Brandfläche	A _f	m ²	konst.	200	-	-	= Raumflä- che	

5.3.2 Betonbauteile

Die zu untersuchenden Stahlbetonbauteile wurden analog zu Abschnitt 5.2.2 gewählt und bemessen. Die entsprechenden Angaben sind für den Stahlbetonbalken Bild 11 und Tabelle 17 zu entnehmen. Die Stütze entspricht derjenigen in Abschnitt 5.2.2, so dass auf eine neuerliche Darstellung verzichtet werden kann.

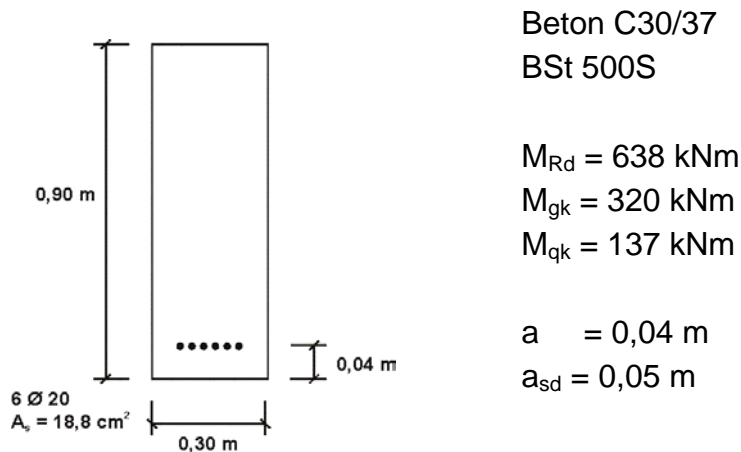


Bild 11: Querschnitt und Beanspruchung des Stahlbetonbalkens

Tabelle 17: Bauteilkenngrößen des Stahlbetonbalkens von 30 x 90 cm²

Parameter	Sym- bol	Einheit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Höhe	h	m	konst.	0,9	-	-	$h = 3 * b$	
Breite	b	m	konst.	0,3	-	-	-	gewählt
Achsab- stand der Bewehrung	a	m	konst.	0,04	-	-	$a_{sd} =$ 0,05 m (seitlich)	[20]
Beweh- rungsquer- schnitt	A_s	cm ²	konst.	18,8 6Ø20	-	-	-	gewählt
Streck- grenze Beweh- rungstahl	f_y	MN/m ²	Gauß- Normal	560	30	0,055	-	[12]
Beton- druckfes- tigkeit	f_c	MN/m ²	Log- Normal	38	5	0,13	C30/37	gewählt
ständige Einwirkung	G	kNm	Gauß- Normal	320	32	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k =$ 70/30	Bemes- sung
veränderli- che Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	709	355	0,5	$Q_k = 95%$ Fraktile von Q	Bemes- sung

5.3.3 Stahlbauteile

Es wurde ein Stahlträger HE400A aus Baustahl S235 gewählt. Für die kastenförmige Bekleidung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten wurde nach Eurocode 3 [21] für R 90 die Bekleidungsdicke $d_p = 19 \text{ mm}$ ermittelt.

Die weiteren Angaben sind der Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 18: Bauteilkenngrößen des Stahlträgers HE400A mit Bekleidung aus Gipskartonfeuerschutzplatten (GKF)

Parameter	Sym- bol	Einheit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Wider- stands- mo- ment	W_y	cm^2	konst.	2310	-	-	-	
Beiwert	α_{pl}	-	konst.	1,109	-	-	-	
Streck- grenze Stahl	f_y	kN/cm^2	Gauß- Nor- mal	28	1,96	0,07	-	[12]
Beklei- dungs- dicke	d_p	m	konst.	0,019	-	-	-	[21]
Verhältnis- wert	A_p/V	1/m	konst.	68	-	-	-	
ständige Einwirkung	G	MNm	Gauß- Nor- mal	242	24	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=$ 60/40	Be- mes- sung
veränderli- che Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	835	418	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemes- sung
Wärmeleit- fähigkeit (GKF)	λ_p	$\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$	konst.	0,2	-	-	-	[21]
Spezifische Wärme (GKF)	c_p	$\text{J}/(\text{kg}^*\text{K})$	konst.	1700	-	-	-	
Dichte (GKF)	ρ_p	kg/m^3	konst.	945	-	-	-	

Die Stahlstütze H240B entspricht der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen, so dass die Angaben in Tabelle 12 auch hier gelten.

5.3.4 Holzbauteile

Die Eingangsdaten für die Untersuchung des Holzbalkens 16/60 sind in Tabelle 19 dargestellt und für die Holzstütze 16/16 in Tabelle 20.

Bei den Holzbauteilen wird, abweichend von den Beton- und Stahlbauteilen, eine Auslegung für die Feuerwiderstandsklasse R 60 vorausgesetzt.

Tabelle 19: Bauteilkenngößen des Holzbalkens 16/60 (rechteckiger Brettschicht-holzquerschnitt)

Parameter	Sym- bol	Einheit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Quer- schnitts- höhe	h	[cm]	konst.	60	-	-	Zeitlich ver- änderlich	Bemes- sung
Quer- schnitts- breite	b	[cm]	konst.	16	-	-	Zeitlich ver- änderlich	Bemes- sung
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	[22]
Biege- zugfes- tigkeit	f_m	kN/cm ²	Log- Normal	35,56	4,978	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ - Fraktile	DIN 1052
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß- Normal	1260	138,6	0,11		
ständige Einwir- kung	G	kNm	Gauß- Normal	61,38	6,138	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k =$ 0,65	Bemes- sung
veränder- liche Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	15,88	7,94	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemes- sung
Zünd- tempera- tur	T_{zuend}	°C	Gauß- Normal	275	50	0,18		
Abbrand- rate	β_n	mm/mi n	Gauß- Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 = 90%-Fraktile	

Tabelle 20: Bauteilkenngrößen der Holzstütze 16/16 (rechteckiger Brettschichtholzquerschnitt)

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	EC 5
Biegezugfestigkeit	f_m	kN/cm ²	Log-Normal	35,56	4,978	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ -Fraktile von f_m	
Druckfestigkeit	$f_{c,0}$	kN/cm ²	Log-Normal	30,85	2,777	0,09	$F_{c,0,k} = 5\%$ -Fraktile von $f_{c,0}$	
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß-Normal	1260		0,11		
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	68,48	6,848	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k = 0,65$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	17,72	8,86	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemessung
Zündtemperatur	T_{zuend}	°C	Gauß-Normal	250	30	0,12		
Abbrandrate	β_n	mm/min	Gauß-Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 = 90%-Fraktile	EC 5
Querschnittshöhe	h	[cm]	konst.	16	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Querschnittsbreite	b	[cm]	konst.	16	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	3	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	1,5	-	-	-	

5.4 Industriegebäude

5.4.1 Brandraum und Brandbeanspruchung

Stellvertretend für Gebäude mit ausgedehnten und hohen Räumen soll eine Industriehalle von 2400 m² Grundfläche und 6 m lichter Höhe untersucht werden. Es wird ein lokaler Brand auf mit einer Brandfläche von 100 m², die stärker streut, mit Hilfe der analytischen Gleichungen nach Anhang C des Eurocodes 1 [4] berechnet. Die geometrischen und brandschutztechnischen Randbedingungen sind in Tabelle 21 und 22 zusammengestellt. Die Brandlastdichte entspricht dem relativ hohen Durchschnittswert für Industriegebäude gemäß Tabelle 6.

Tabelle 21: Geometrie des Brandraums

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Raubbreite	b	m	konst.	40	-	-		gewählt
Raumlänge	l	m	konst.	60	-	-		gewählt
Raumfläche	A	m ²	konst.	2400	-	-	b*l	
Raumhöhe	h	m	konst.	6	-	-		gewählt
gesamte Fläche der Hülle	A _t	m ²	konst.	6000			(2*b+2*l)*h +2*A _f	
Fensterhöhe	h _w	m	konst.	1,7	-	-	-	gewählt
Fensterbrei- te	b _w	m	konst.	60	-	-	-	gewählt
Fensterflä- che	A _w	m ²	konst.	102	-	-	h _w *b _w	

Tabelle 22: Annahmen für die Temperaturermittlung mit einem Plume-Modell

Parameter	Sym- bol	Einheit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Brandlast- dichte	q	MJ/m ²	Gum- bel	1180	354	0,3		[5]
bezogenen Energiefrei- setzung	RHR	kW/m ²	Gauß- Normal	250	50	0,2		
Brand- entwick- lungszeit	t _g	s	konst.	150	-	-	schnelle Wach- stumsrate	[4]
Brandfläche	A _f	m ²	Gauß- Normal	100	25	0,25		

5.4.2 Betonbauteile

Die zu untersuchenden Stahlbetonbauteile wurden analog zu Abschnitt 5.2.2 gewählt und bemessen. Der Stahlbetonbalken entspricht demjenigen in Abschnitt 5.3.2, so dass die Angaben in Bild 11 und Tabelle 15 hier ebenfalls gelten. Die Stütze von 6 m Länge ist in Bild 12 dargestellt. Die Kennwerte für den Nachweis finden sich in Tabelle 23.

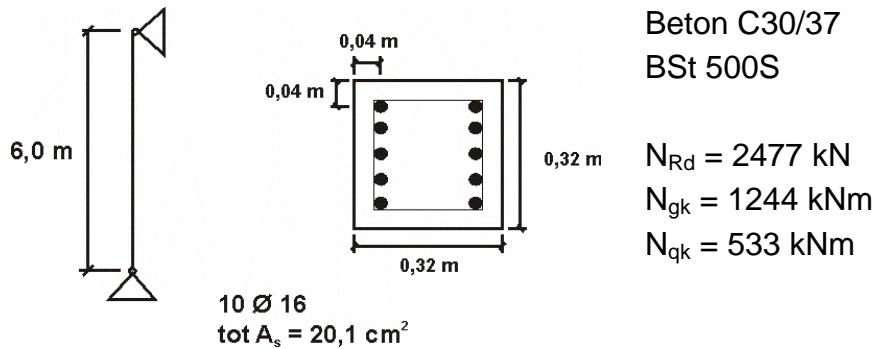


Bild 12: Abmessungen und Beanspruchung der Stahlbetonstütze

Tabelle 23: Bauteilkenngrößen der Stahlbetonstütze von 32 x 32 cm²

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	M	konst.	6	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	M	konst.	3	-	-	-	
Höhe	d	M	konst.	0,32	-	-	-	gewählt
Breite	b	M	konst.	0,32	-	-	-	gewählt
Achsabstand der Bewehrung	a	M	konst.	0,04	-	-	-	gewählt
Bewehrungsquerschnitt	tot A_s	cm ²	konst.	20,1 10Ø16	-	-	-	gewählt
Streckgrenze Bewehrungsstahl	f_y	MN/m ²	Gauß-Normal	560	30	0,055	BSt 500	[12]
Betondruckfestigkeit	f_c	MN/m ²	Log-Normal	38	5	0,13	C30/37	gewählt
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	1244	124,4	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=70/30$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	276	138	0,50	$Q_k = 95\%$ Fraktile	Bemessung

5.4.3 Stahlbauteile

Der Stahlträger entspricht dem in Abschnitt 5.3.3. Hierfür gelten die Angaben in Tabelle 18.

Für die 6 m lange Stahlstütze wurde ein Profil HE340B aus Baustahl S235 gewählt. Die Bemessung nach Eurocode 3 [21] für R 90 ergab eine kastenförmige Bekleidung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten in der Bekleidungsstärke $d_p = 15$ mm. Die weiteren Angaben sind der Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 24: Bauteilkenngrößen der Stahlstütze HE340B mit Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF)

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	6	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	3	-	-	-	
Querschnittsfläche Stahl	A	cm ²	konst.	171				
Streckgrenze Stahl	f_y	kN/cm ²	Gauß-Normal	28	1,96	0,07	-	[12]
Knickbeiwert	χ_{fi}	-	konst.	0,734	-	-	-	Bemessung
Bekleidungsstärke	d_p	m	konst.	0,015	-	-	-	[21]
Verhältniswert	A_p/V	1/m	konst.	75	-	-	-	
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	800	80	0,10	$G_k=G$ $G_k/Q_k=60/40$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	276	138	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktile von Q	Bemessung
Wärmeleitfähigkeit (GKF)	λ_p	W/(m*K)	konst.	0,2	-	-	-	[21]
Spezifische Wärme (GKF)	c_p	J/(kg*K)	konst.	1700	-	-	-	
Dichte (GKF)	ρ_p	kg/m ³	konst.	945	-	-	-	

5.4.4 Holzbauteile

Die Eingangsdaten für die Berechnung des Holzbalkens 20/150 sind in Tabelle 25 und für die Holzstütze 20/20 in Tabelle 26 zusammengestellt.

In diesem Beispiel mit einer erdgeschossigen Halle wird bei den Holzbauteilen lediglich eine Feuerwiderstandsdauer R 30 zu Grunde gelegt.

Tabelle 25: Bauteilkenngrößen für den Holzbalken 20/150 (rechteckiger Brett-schichtholzquerschnitt)

Parameter	Sym- bol	Einheit	Vertei- lung	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Variati- ons- koeffi- zient	Anmerkung	Quelle
Quer- schnitts- höhe	h	[cm]	konst.	150	-	-	Zeitlich veränder- lich	Bemes- sung
Quer- schnitts- breite	b	[cm]	konst.	20	-	-	Zeitlich veränder- lich	Bemes- sung
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	[22]
Biege- zugfes- tigkeit	f_m	kN/cm ²	Log- Normal	35,56	4,98	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ - Fraktil von f_m	DIN 1052
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß- Normal	1260	138,6	0,11		
ständige Einwir- kung	G	kNm	Gauß- Normal	476	47,6	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k =$ 0,65	Bemes- sung
veränder- liche Einwir- kung	Q	kNm	Gum- bel	124	62	0,5	$Q_k = 95\%$ Fraktil von Q	Bemes- sung
Zünd- tempera- tur	T_{zuend}	°C	Gauß- Normal	275	50	0,18		
Abbrand- rate	β_n	mm/min	Gauß- Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 ist 90%-Fraktil	

Tabelle 26: Bauteilkenngößen (rechteckiger Brettschichtholzquerschnitt)

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anmerkung	Quelle
Beiwert	$k_{mod,fi}$	-	konst.	1,0	-	-	-	[22]
Biegezugfestigkeit	f_m	kN/cm ²	Log-Normal	35,56	4,978	0,14	$f_{m,k} = 5\%$ -Fraktile von f_m	
Druckfestigkeit	$f_{c,0}$	kN/cm ²	Log-Normal	30,85	2,777	0,09	$F_{c,0,k} = 5\%$ -Fraktile von $f_{c,0}$	
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	kN/cm ²	Gauß-Normal	1260		0,11		
ständige Einwirkung	G	kN	Gauß-Normal	369	36,9	0,10	$G_k = G$ $G_k/Q_k = 0,65$	Bemessung
veränderliche Einwirkung	Q	kN	Gumbel	95,5	47,7	0,5	$Q_k = 95\%$ -Fraktile von Q	Bemessung
Zündtemperatur	T_{zuend}	°C	Gauß-Normal	250	30	0,12		
Abbrandrate	β_n	mm/min	Gauß-Normal	0,56	0,11	0,2	β_n nach EC 5 ist 90%-Fraktile	[22]
Querschnittshöhe	h	[cm]	konst.	25	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Querschnittsbreite	b	[cm]	konst.	25	-	-	Zeitlich veränderlich	Bemessung
Knicklänge unter Normalbedingungen	l_k	m	konst.	6	-	-	-	gewählt
Knicklänge im Brandfall	l_k	m	konst.	6	-	-	-	

6 Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen für Bauteile

6.1 Allgemeines

Die Zuverlässigkeitsanalysen für die ausgewählten und in Abschnitt 5 beschriebenen Gebäude und Bauteile wurden entsprechend der Vorgehensweise nach Abschnitt 4.1 bis 4.3 durchgeführt.

In den folgenden Abschnitten werden als wesentliche Ergebnisse die Zeitverläufe der Brandraumtemperaturen und des berechneten Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ für den durch Löschmaßnahmen unbeeinflussten natürlichen Brand sowie für den Normbrand nach ETK grafisch gegenübergestellt.

Zum Vergleich und zur späteren Kalibrierung des Sicherheitsniveaus wird vorab der Sicherheitsindex $\beta_{fi,soll}$ für die betreffende Nutzungsart und Raumsituation nach den Vorgaben in Abschnitt 2.3 berechnet.

Im Hinblick auf die im Rahmen des Sicherheitskonzeptes festzulegenden Bemessungswerte bzw. charakteristischen Werte und Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandbeanspruchung von Bauteilen werden zusätzlich Sensitivitätsfaktoren α_i für die maßgebenden Einflussgrößen zum Zeitpunkt des minimalen Sicherheitsindex (d. h. der größten Versagenswahrscheinlichkeit) im natürlichen angegeben.

Auf eine Kommentierung der grafischen Darstellungen wird an dieser Stelle noch verzichtet. Hierauf soll anschließend in der vergleichenden Gegenüberstellung aller Berechnungsergebnisse eingegangen werden.

6.2 Wohn-/Bürogebäude

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} ergibt sich nach Abschnitt 2.3, Gln. (1) bis (6) auf der Grundlage einer Brandentstehung in einer Nutzungseinheit von 200 m² Grundfläche und einer Versagenswahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer oder die Feuerwehr (in Anlehnung an Tabelle 5) von $p_2 \approx 0,2$:

$$p_1(A) = 1 - \exp(\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A = 1 - \exp(2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 200) \approx 4,2 \cdot 10^{-4}$$

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 = 8,4 \cdot 10^{-5} \quad (\text{mit } p_2 \approx 0,2)$$

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ für Geb.-Kl. 5 bzw. } 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ für Kl. } \leq 4$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{8,4 \cdot 10^{-5}} = 1,55 \cdot 10^{-2} \text{ bzw. } 1,55 \cdot 10^{-1}$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) = 2,16 \quad \text{bzw. } 1,02$$

6.2.1 Temperaturzeitkurven

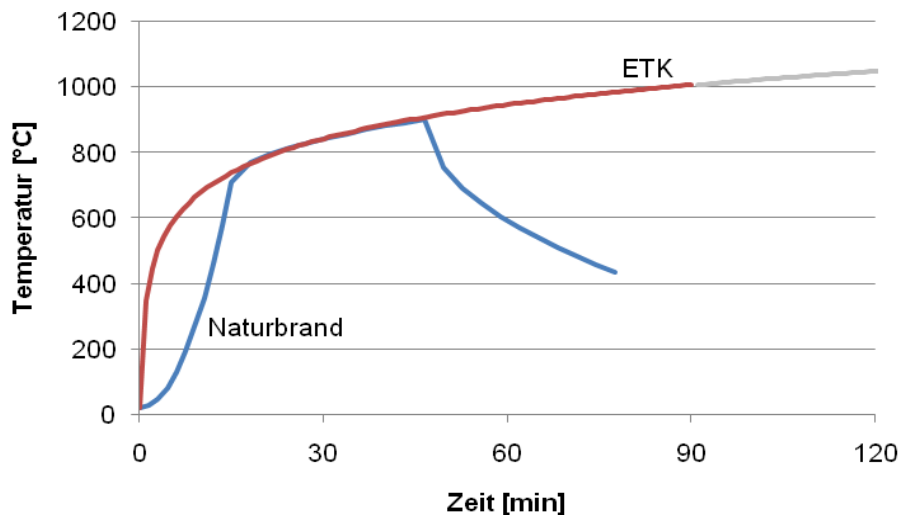


Bild 13: Brandraumtemperatur beim Normbrand nach ETK und beim natürlichen Brand in einem Raum von 36 m² Grundfläche

6.2.2 Betonbalken

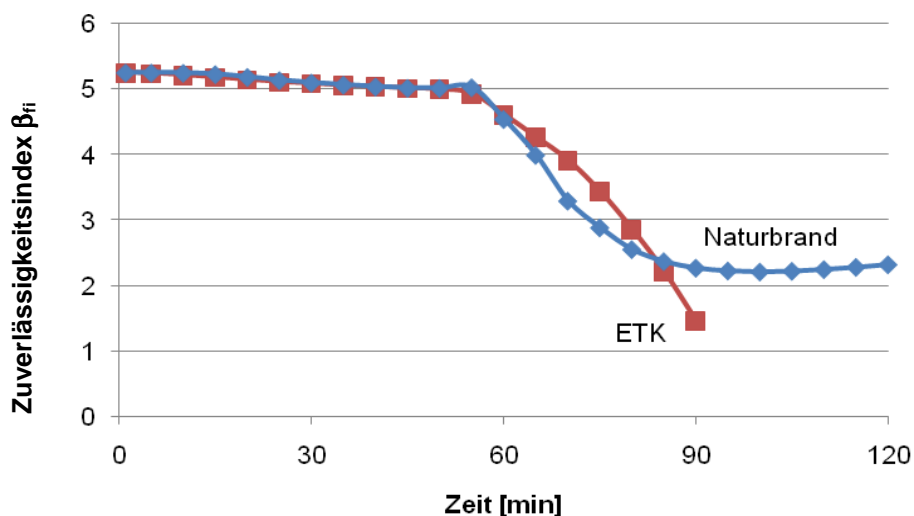


Bild 14: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlbetonbalkens

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird nach Bild 14 beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\beta_{fi,NB} = 2,2$ nach 100 Minuten etwas überschritten. Im Normbrand wird die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 80 Minuten unterschritten; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 1,45$.

Nach Bild 15 sind die für die Brandbeanspruchung maßgebenden streuenden Einflussgrößen die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben keinen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

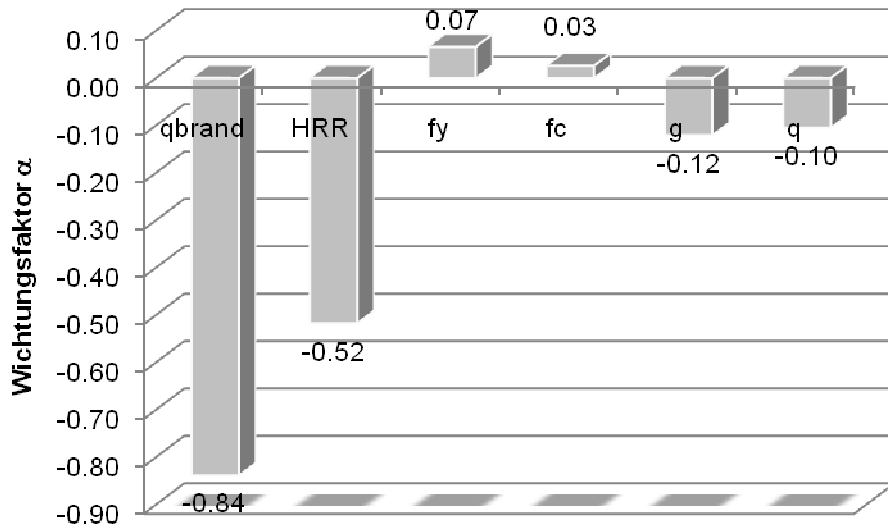


Bild 15: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 100.Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,2$)

6.2.3 Betonstütze

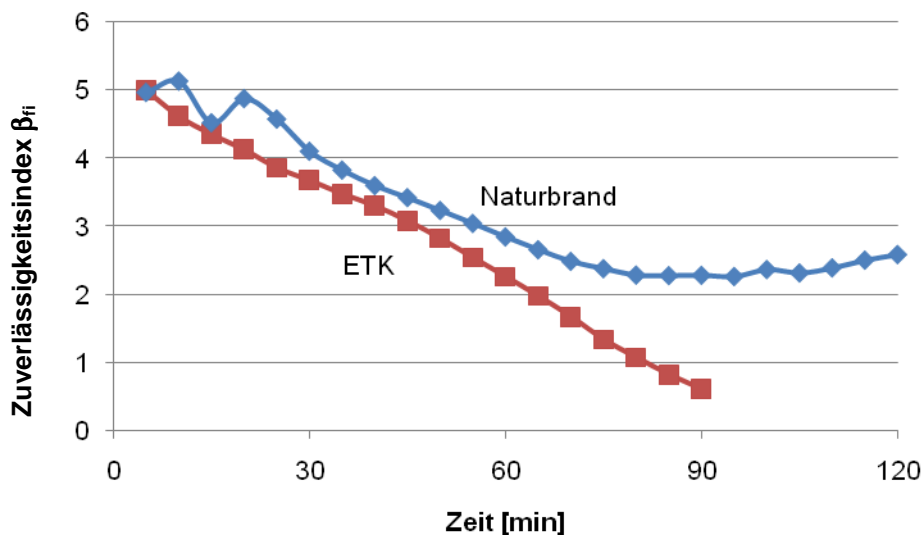


Bild 16: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlbetonstütze

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird nach Bild 16 beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,3$ nach ca. 95 Minuten deutlich überschritten. Im Normbrand wird die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 75 Minuten unterschritten; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 0,6$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden streuenden Einflussgrößen sind nach Bild 17 wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

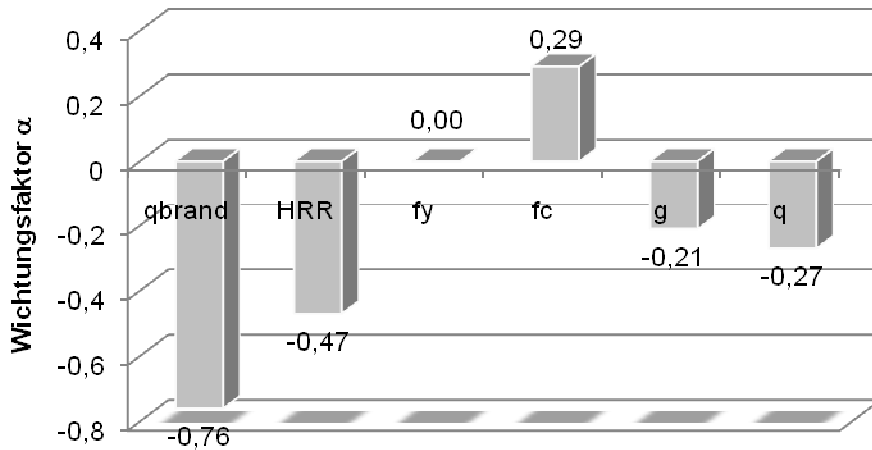


Bild 17: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 95. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,3$)

6.2.4 Bekleideter Stahlträger

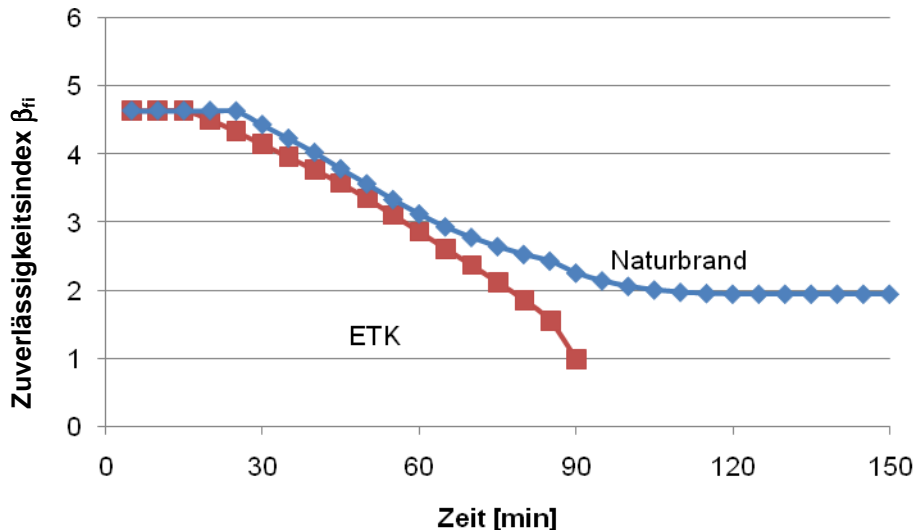


Bild 18: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlträgers

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird nach Bild 18 beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,0$ nach ca. 115 Minuten überschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 85 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 1,0$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind nach Bild 19 die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

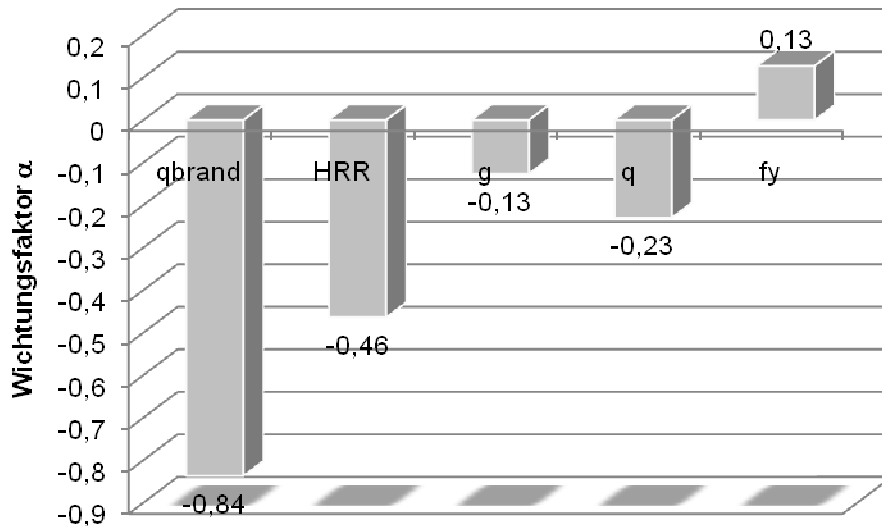


Bild 19: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 115. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,0$)

6.2.5 Bekleidete Stahlstütze

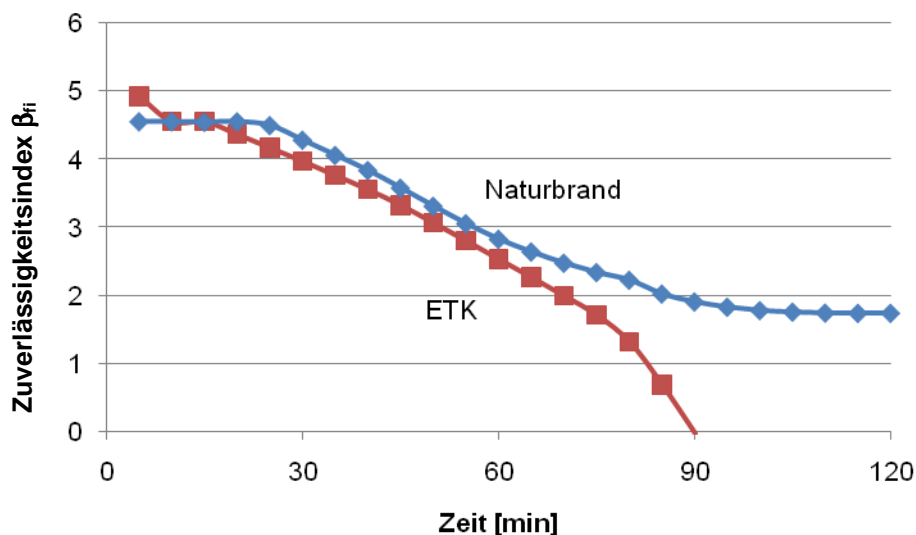


Bild 20: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlstütze

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird nach Bild 20 beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,7$ nach ca. 115 Minuten noch überschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 80 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 0,0$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden streuenden Einflussgrößen sind nach Bild 21 wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

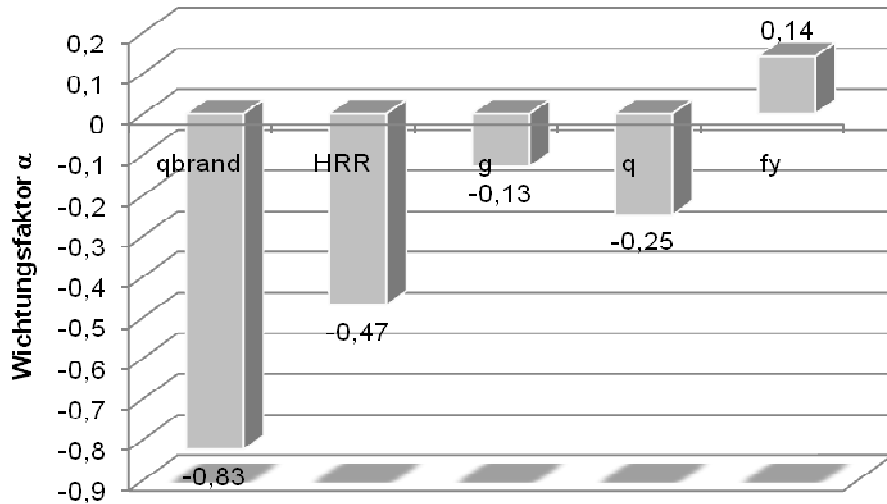


Bild 21: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 115. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,7$)

6.2.6 Holzbalken

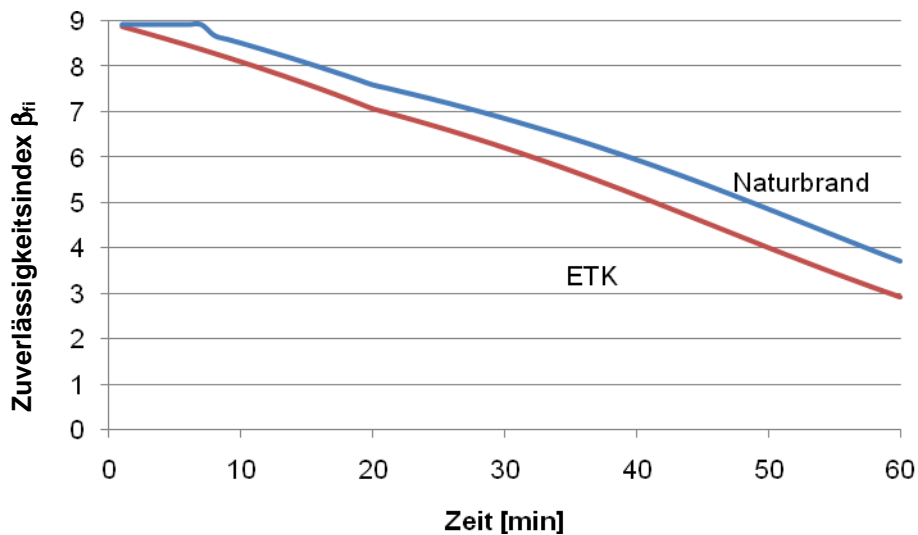


Bild 22 Verlauf des Zuverlässigkeitsindexes $\beta_{fi,ist}$ des Holzbalkens bei Brandbeanspruchung nach ETK bzw. Naturbrand

Nach Bild 22 wird der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum nach 60 Minuten mit $\beta_{fi,NB} = 3,7$ noch deutlich überschritten, während er im Normbrand zu diesem Zeitpunkt bei $\min \beta_{fi,ETK} = 1,9$ liegt.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden streuenden Einflussgrößen sind nach Bild 23 die Abbrandrate (β_n) und die Festigkeit (f_m). Die Streuungen der übrigen Größen (mechanische Einwirkungen und Brandlastdichte) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

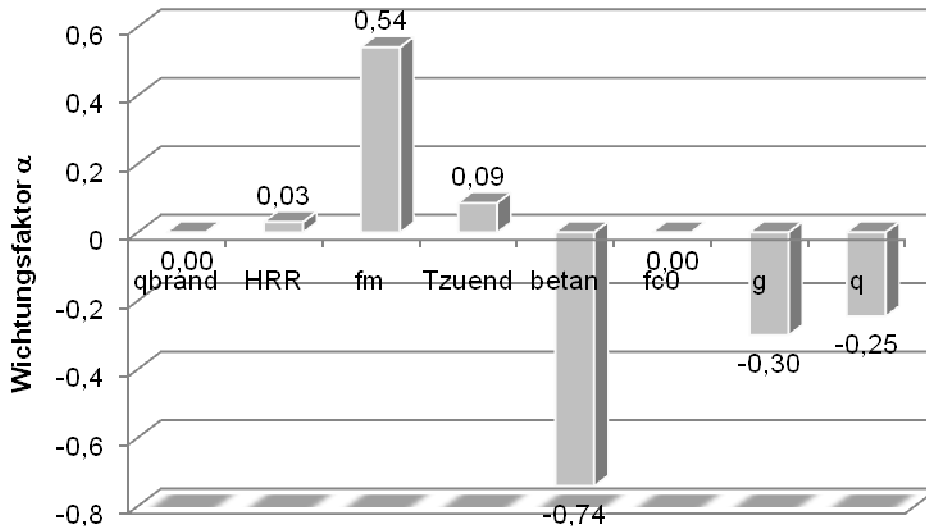


Bild 23 Sensitivitätsfaktoren α zur 60. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 3,7$)

6.2.7 Holzstütze

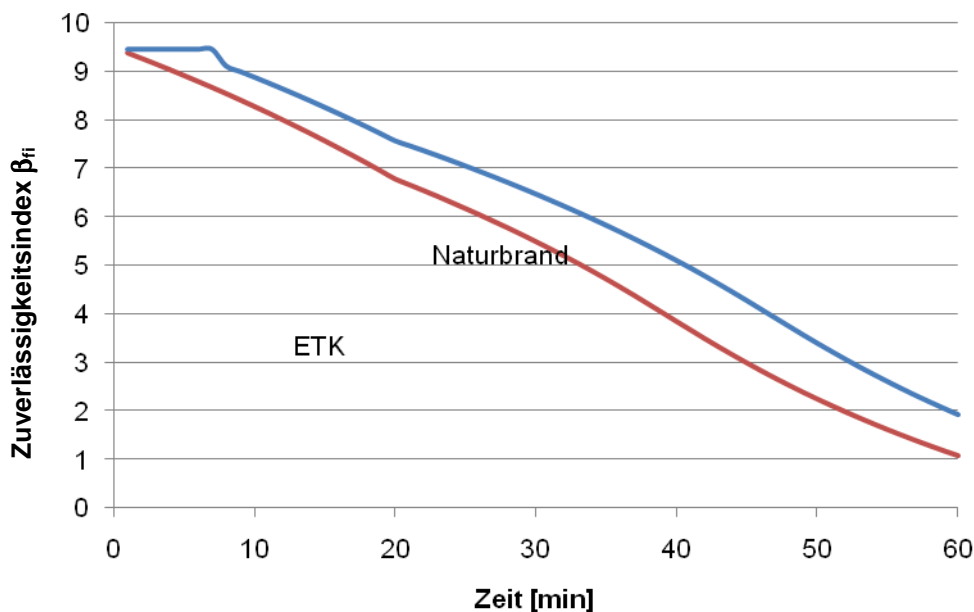


Bild 24 Verlauf des Zuverlässigkeitsindexes $\beta_{fi,ist}$ der Holzstütze bei Brandbeanspruchung nach ETK bzw. Naturbrand

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird nach Bild 25 beim vollentwickelten natürlichen Brand nach 60 Minuten mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,9$ noch überschritten; im Normbrand liegt die Zuverlässigkeit dann bei $\min \beta_{fi,ETK} = 1,0$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebende streuende Einflussgröße ist nach Bild 26 nur noch die Abbrandrate (β_n). Die Streuungen aller übrigen Größen haben praktisch keinen Einfluss mehr auf die Zuverlässigkeit und könnten mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

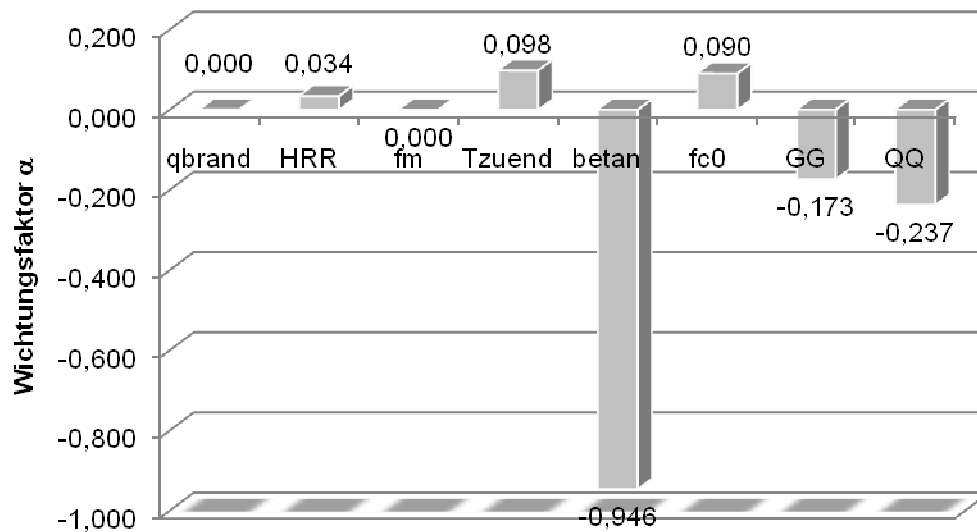


Bild 25: Sensitivitätsfaktoren α zur 60. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,9$)

6.2.8 Vergleichsbetrachtung für andere BauteilAuslegungen

Bei den Untersuchungen für Wohn-/Bürogebäude wurde zunächst von Brandschutzanforderungen für die Gebäudeklasse 5 ausgegangen und eine Auslegung der Beton- und Stahlbauteile für die Feuerwiderstandsklasse R 90 vorgenommen. In diesem Abschnitt soll nun überprüft werden, ob sich an den grundsätzlichen Erkenntnissen zur Zuverlässigkeit bei Naturbrandbeanspruchung im Vergleich zu Normbrandbeanspruchung etwas ändert, wenn bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 eine Auslegung für die Feuerwiderstandsklasse R 60 und bei Gebäuden der Gebäudeklasse 3 für die Feuerwiderstandsklasse R 30 erfolgt.

Die Vergleichsbetrachtung wird exemplarisch für den bekleideten Stahlträger gemäß den Abschnitten 5.3.3 und 6.2.4 durchgeführt. Dabei wird bei sonst gleichen Randbedingungen lediglich die Bekleidungsdicke d_p nach Eurocode 3 [21] neu bemessen:

- R 60 $d_p = 12$ mm
- R 30 $d_p = 6$ mm

Analog zu Bild 14 und Bild 15 sind in den Bildern 26 und 27 die Zuverlässigkeiten für die R 60-Auslegung und in Bild 28 und 29 für die R 30-Auslegung dargestellt.

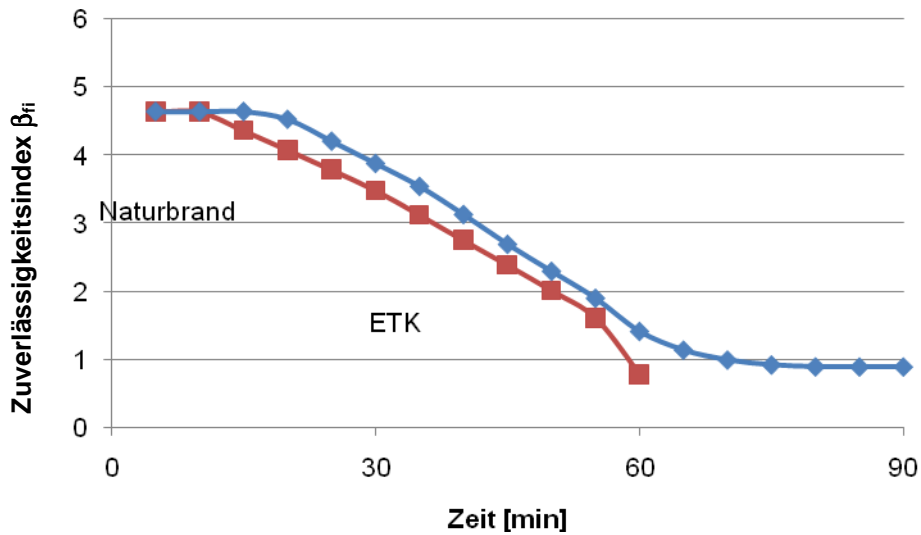


Bild 26: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlträgers bei Auslegung für die Feuerwiderstandsklassen R 60

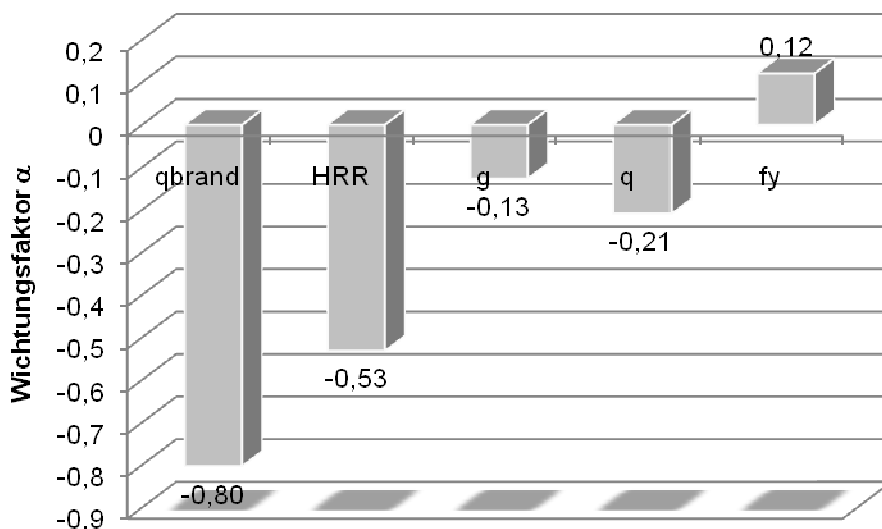


Bild 27: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 85. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 0,9$)

Die Zuverlässigkeit im Normbrand und im Naturbrand nimmt bei Auslegung für R 60 deutlich ab, wobei die Werte für den Normbrand nach 60 Minuten und für den Naturbrand nach ca. 85 Minuten mit $\beta_{fi,ETK} = \beta_{fi,NB} = 0,9$ (d. h. $p_{f,fi} = 0,18$) nahezu gleich sind. Dies bestätigt die Festlegung in der MBO, wonach bei mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Gebäudeklasse 4 die Anforderung „hochfeuerhemmend“ gilt.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind wiederum die Brandlastdichte (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR), wobei der Einfluss der Brandlastdichte leicht abnimmt und der Wärmefreisetzungsrate etwas ansteigt. Die

Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit.

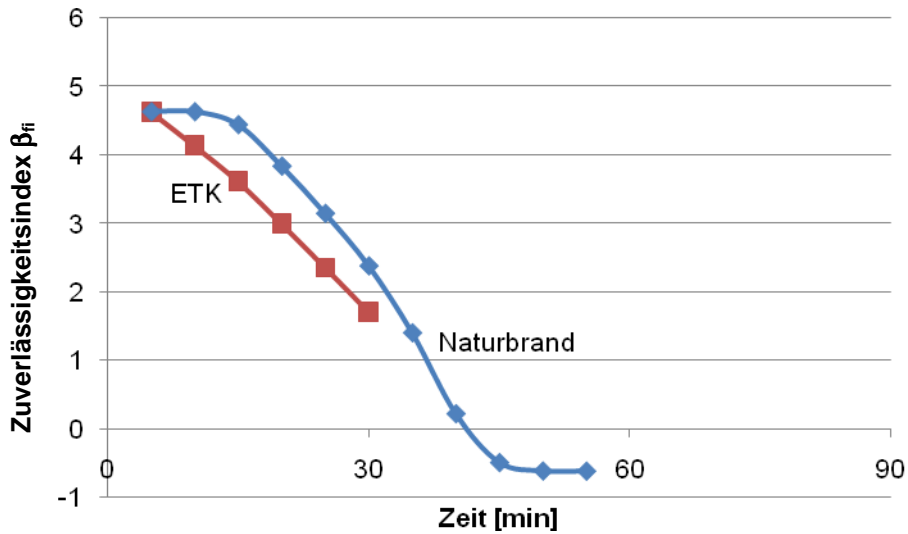


Bild 28: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlträgers bei Auslegung für die Feuerwiderstandsklassen R 30

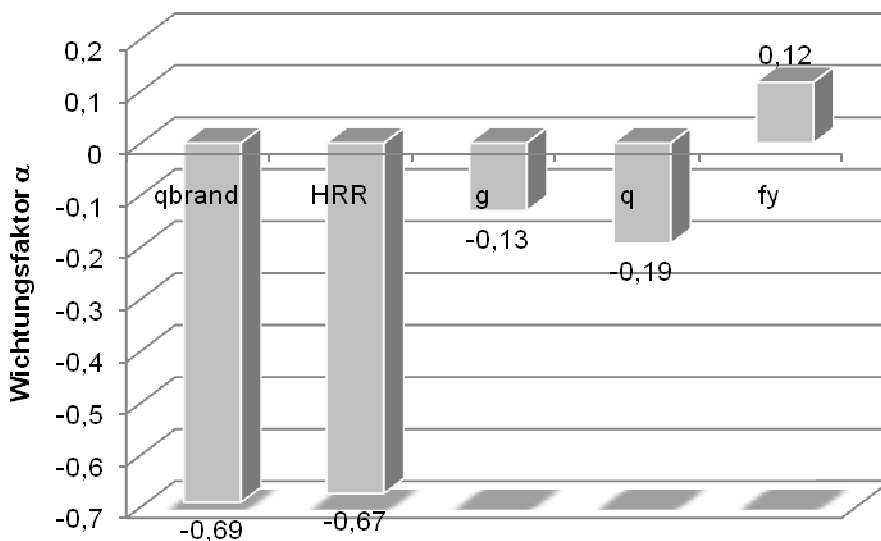


Bild 29: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 55. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = -0,6$)

Die Zuverlässigkeit für den Normbrand nach 30 Minuten Branddauer liegt noch bei $\beta_{fi,ETK} \approx 1,6$, während die Zuverlässigkeit beim Naturbrand auf $\beta_{fi,NB} \approx -0,6$ abfällt, was einer bedingten Versagenswahrscheinlichkeit von 77 % entspricht.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind jetzt mit etwa gleichem Gewicht die Brandlastdichte (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit.

6.3 Verkaufs-/Versammlungsstätten

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} ergibt sich nach Abschnitt 2.3, Gln. (1) bis (5) auf der Grundlage einer Brandentstehung im Brandraum mit 200 m^2 Grundfläche und der Versagenswahrscheinlichkeit für die Brandbekämpfung (nach Tabelle 8) von $p_2 \approx 0,25$:

$$p_1(A) = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A = 1 - \exp(4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 200) \approx 9,4 \cdot 10^{-4}$$

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 = 2,4 \cdot 10^{-4} \quad (\text{mit } p_2 \approx 0,25)$$

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1,3 \cdot 10^{-6} \quad \text{bzw. } 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ für eingesch. Geb.}$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-4}} = 5,5 \cdot 10^{-3} \quad \text{bzw. } 5,5 \cdot 10^{-2}$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) = 2,54 \quad \text{bzw. } 1,60$$

6.3.1 Temperaturzeitkurven

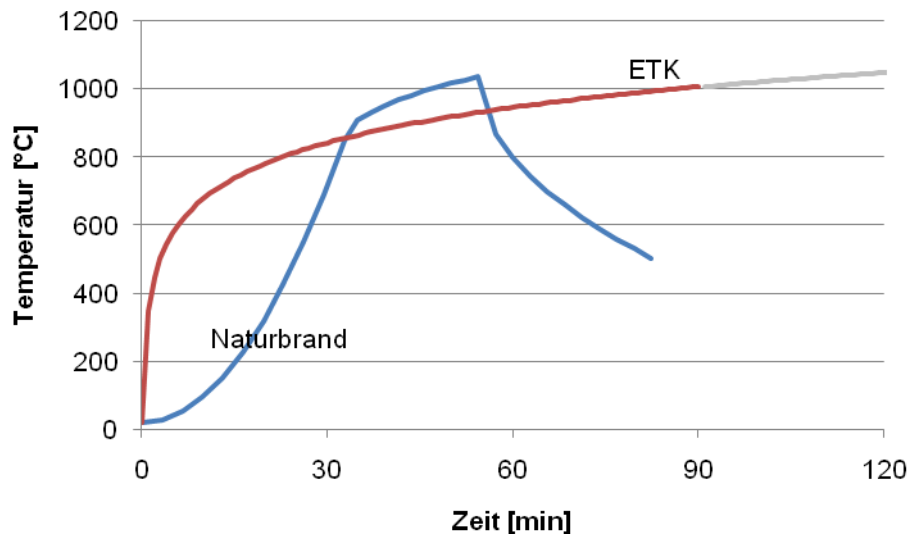


Bild 30: Brandraumtemperatur beim Normbrand nach ETK und beim natürlichen Brand in einem Verkaufsraum von 200 m^2 Grundfläche

6.3.2 Betonbalken

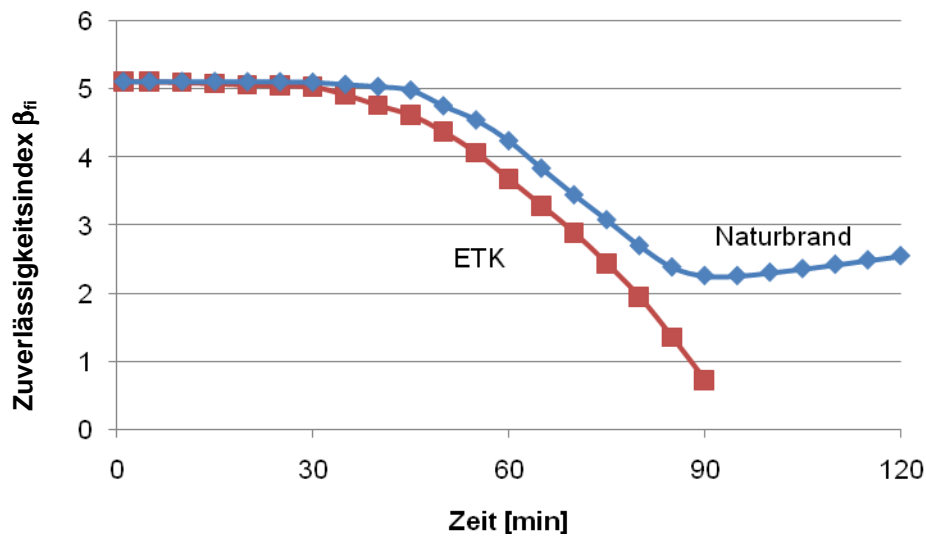


Bild 31: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlbetonbalkens

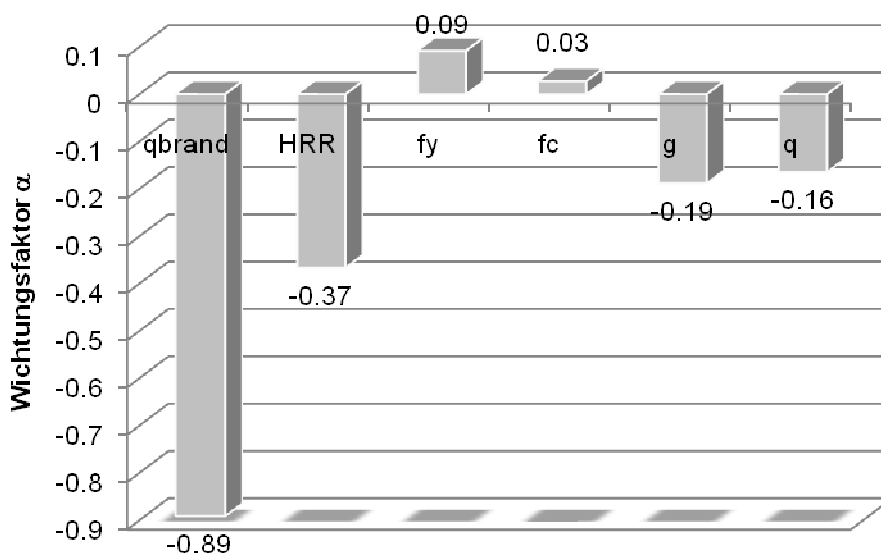


Bild 32: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 95. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,3$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,3$ nach 95 Minuten innerhalb der Toleranzgrenze unterschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 70 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 0,7$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind die Brandbelastung (q_{brand} und die Wärmefreisetzungsrates HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben keinen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.3.3 Betonstütze

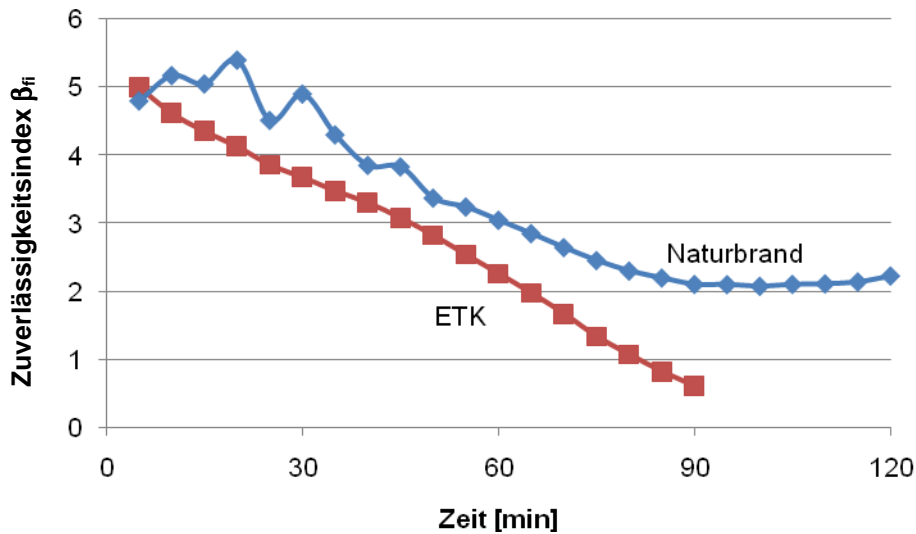


Bild 33: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlbetonstütze

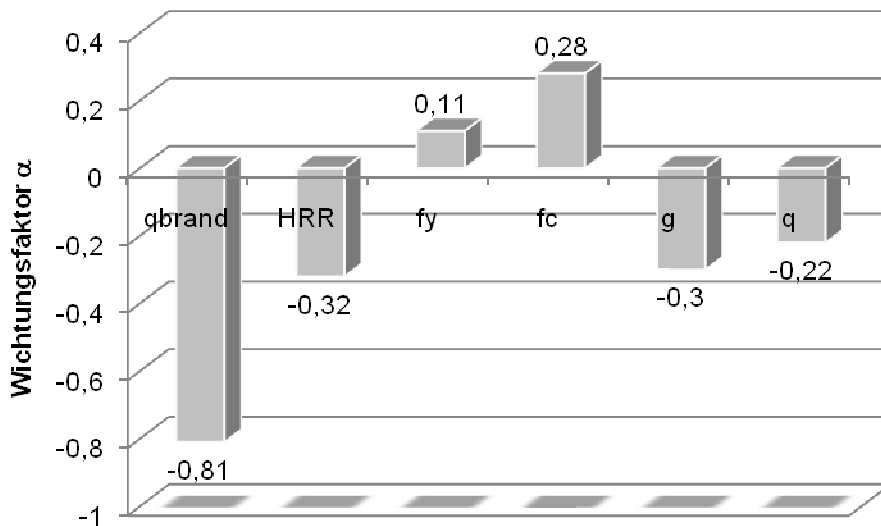


Bild 34: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 100. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,1$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,1$ nach ca. 100 Minuten innerhalb der Toleranzgrenze unterschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 55 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 0,6$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.3.4 Bekleideter Stahlträger

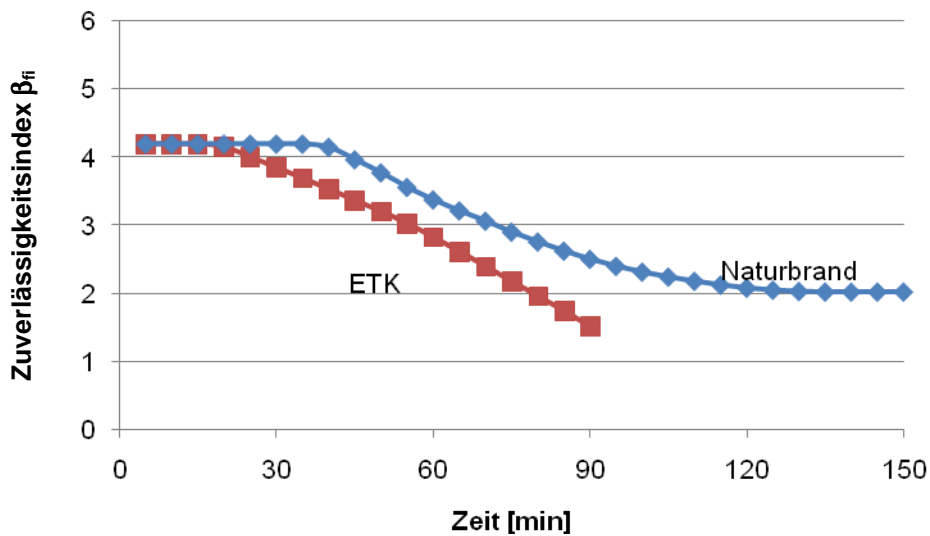


Bild 35: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlträgers

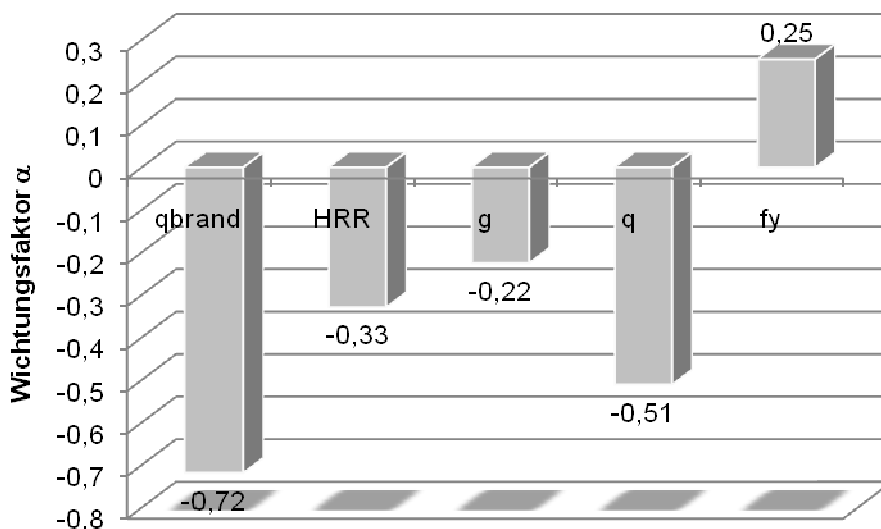


Bild 36: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 130. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,0$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,0$ nach ca. 130 Minuten knapp unterschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 65 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 1,5$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR) sowie in etwas geringerem Umfang die Nutzlast (q). Die Streuungen der übrigen Größen haben durchweg geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.3.5 Bekleidete Stahlstütze

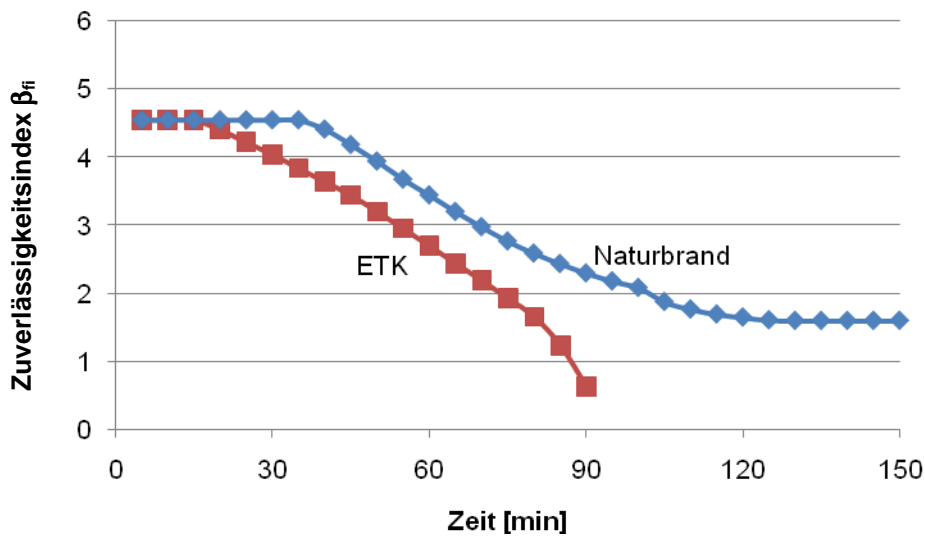


Bild 37: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlstütze

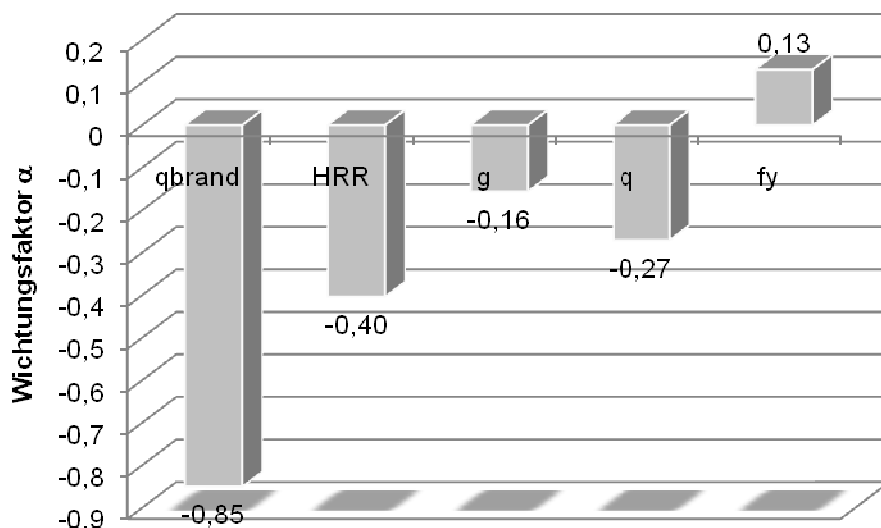


Bild 38: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 130. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,6$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,6$ nach ca. 130 Minuten deutlich unterschritten; die maximal zulässige Toleranz von $\Delta\beta = \pm 0,5$ wird nicht eingehalten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 65 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 0,6$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrates (HRR) sowie in geringerem Umfang die Nutzlast (q). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.3.6 Holzbalken

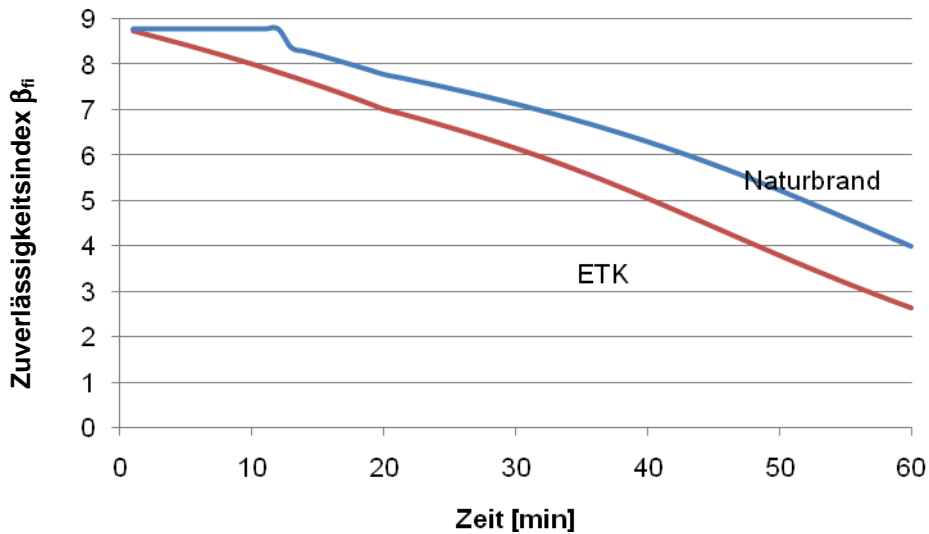


Bild 39: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Holzbalkens

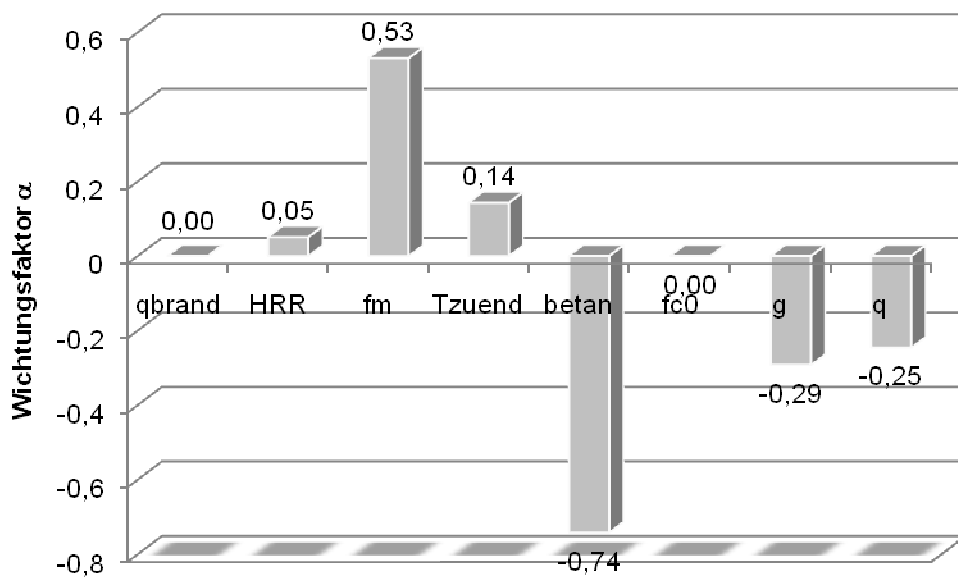


Bild 40: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 60. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 4,0$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum nach 60 Minuten mit $\beta_{fi,NB} = 4,0$ noch deutlich überschritten; auch im Normbrand liegt sich zu diesem Zeitpunkt noch bei $\beta_{fi,ETK} = 2,6$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind hier die Abbrandrate (β_n) und die Festigkeit (f_m). Die Streuungen der übrigen Größen (mechanische Einwirkungen und Brandlastdichte) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.3.7 Holzstütze

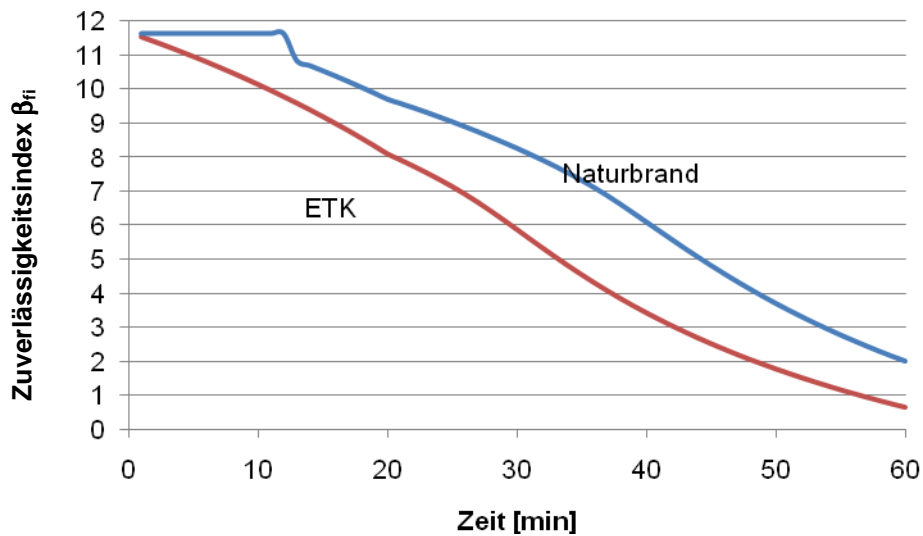


Bild 41: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Holzstütze

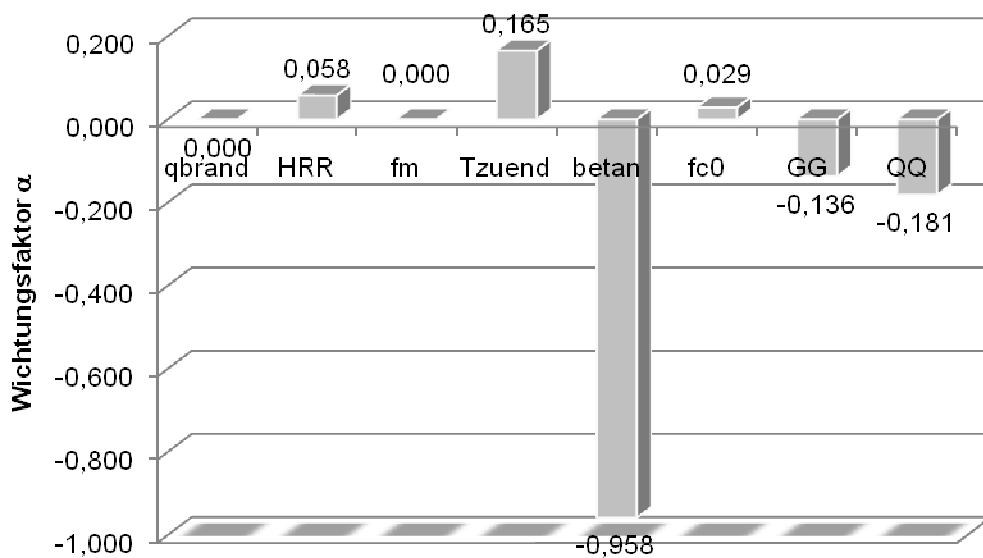


Bild 42: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 60. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,0$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum nach 60 Minuten mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,0$ bereits unterschritten; im Normbrand liegt die Zuverlässigkeit dann bei $\min \beta_{fi,ETK} = 0,6$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebende streuende Einflussgröße ist nur noch die Abbrandrate (β_n). Die Streuungen aller übrigen Größen haben praktisch keinen Einfluss mehr auf die Zuverlässigkeit und könnten mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.4 Industriegebäude

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} ergibt sich nach Abschnitt 2.3, Gln. (1) bis (5) auf der Grundlage einer Brandentstehung in dem Brandraum von 2400 m² Grundfläche und Brandausbreitung auf einer Brandfläche von 100 m² (nach Tabelle 5) von $p_2 \approx 0,15$:

$$p_1(A) = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A = 1 - \exp(6,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2400) \approx 1,54 \cdot 10^{-2}$$

$$p_{f,i} = p_1 \cdot p_2 = 2,3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{mit } p_2 \approx 0,15)$$

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1,3 \cdot 10^{-5} \quad \text{bzw. } 1,1 \cdot 10^{-4} \quad (\text{für eingesch. Geb.})$$

$$p_{f,f,i} = \frac{p_f}{p_{f,i}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{2,3 \cdot 10^{-3}} = 5,65 \cdot 10^{-3} \quad \text{bzw. } 1,18 \cdot 10^{-1}$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,f,i}) = 2,53 \quad \text{bzw. } 1,18$$

Zum Vergleich und zur späteren Kalibrierung des Sicherheitsniveaus wird bei der Versagenswahrscheinlichkeit p_f zusätzlich zur Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC 1 wegen des erfahrungsgemäß geringeren Personenrisikos eine weitere Erhöhung um eine Zehnerpotenz wegen der eingeschossigen Halle betrachtet.

6.4.1 Temperaturzeitkurven

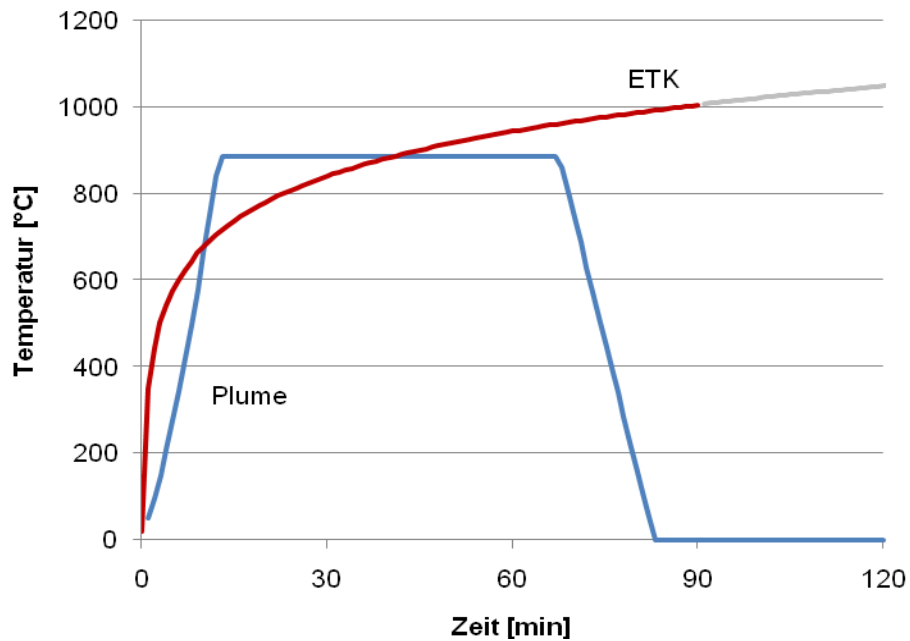


Bild 43: Brandraumtemperatur beim Normbrand nach ETK und beim lokal begrenzten Brand in der Industriehalle von 2400 m² Grundfläche

6.4.2 Betonbalken

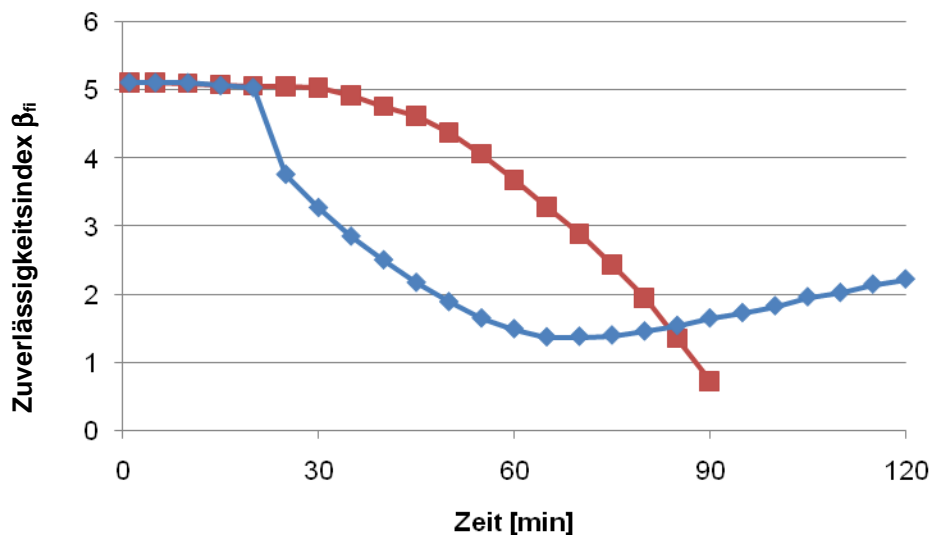


Bild 44: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlbetonbalkens

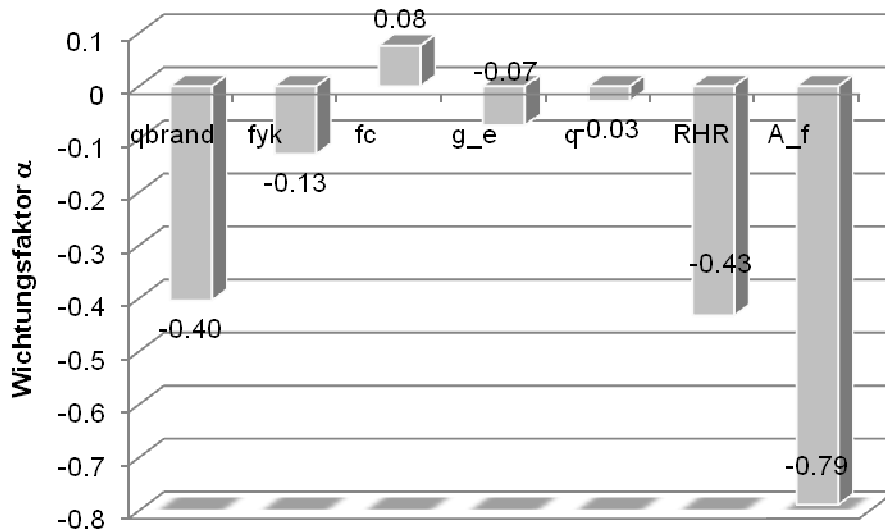


Bild 45: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 65. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,4$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} (RC 2) wird im Brandnahbereich des lokal begrenzten natürlichen Brandes mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,4$ nach ca. 65 Minuten deutlich unterschritten. Diese Betrachtung ist jedoch sehr konservativ, weil das Betonbauteil nach dem vereinfachten Verfahren mit den Temperaturen der Plume-Centerline beaufschlagt wurde. Bei Normbrandbeanspruchung wäre die erforderliche Zuverlässigkeit erst nach ca. 65 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} \approx 0,7$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebende Einflussgröße ist bei dieser vereinfachten Berechnung vor allem die unsichere Brandfläche (A_f), daneben spielen auch die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrates (HRR) eine gewisse Rolle. Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben keinen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.4.3 Betonstütze

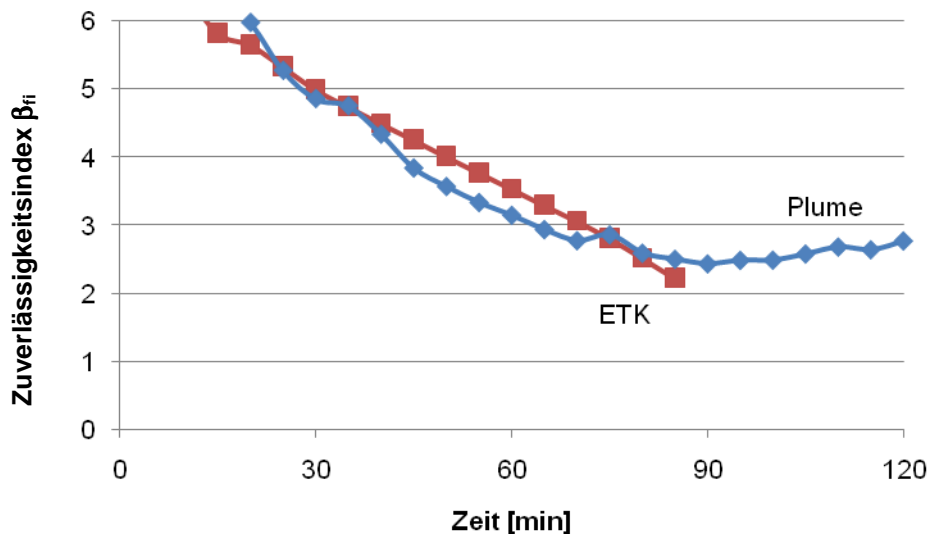


Bild 46: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlbetonstütze

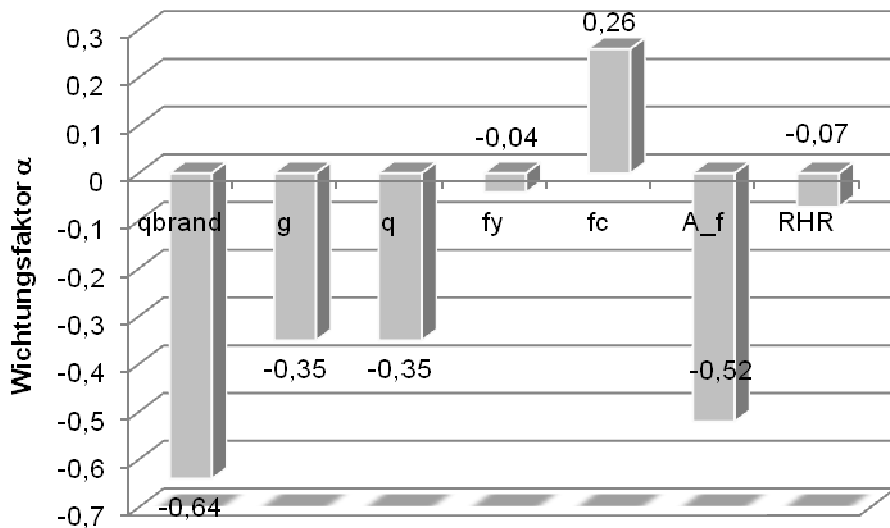


Bild 47: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 90. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 2,4$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird im Brandnahbereich des lokal begrenzten natürlichen Brandes mit $\min \beta_{fi,NB} = 2,4$ nach ca. 90 Minuten innerhalb der Toleranzgrenze unterschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 80 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 2,0$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind die Brandbelastung (q_{brand}) und die Brandfläche (A_f) sowie in geringerem Umfang die Belastung durch Eigengewicht (g) und Nutzlast (q). Die Streuungen der übrigen Größen haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.4.4 Bekleideter Stahlträger

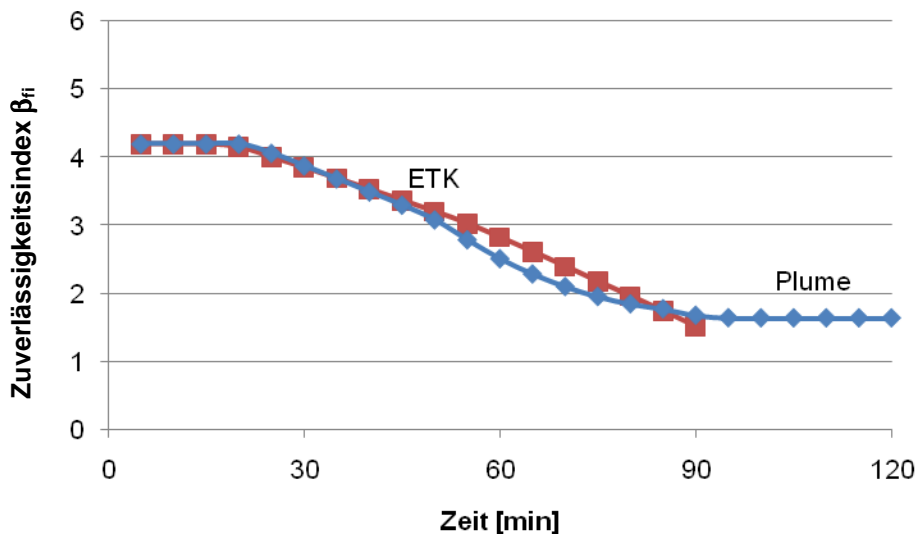


Bild 48: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Stahlträgers

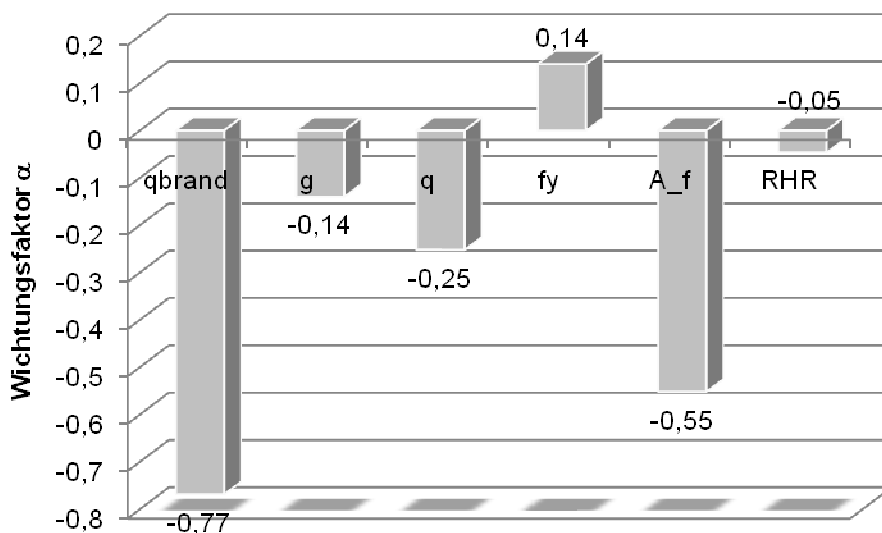


Bild 49: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 100. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,6$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird im Brandnahbereich des lokal begrenzten natürlichen Brandes mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,6$ nach ca. 100 Minuten deutlich unterschritten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 65 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 1,5$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind die Brandbelastung (q_{brand}) und die Brandfläche (A_f) sowie in geringerem Umfang die Nutzlast (q). Die Streuungen der übrigen Größen haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.4.5 Bekleidete Stahlstütze

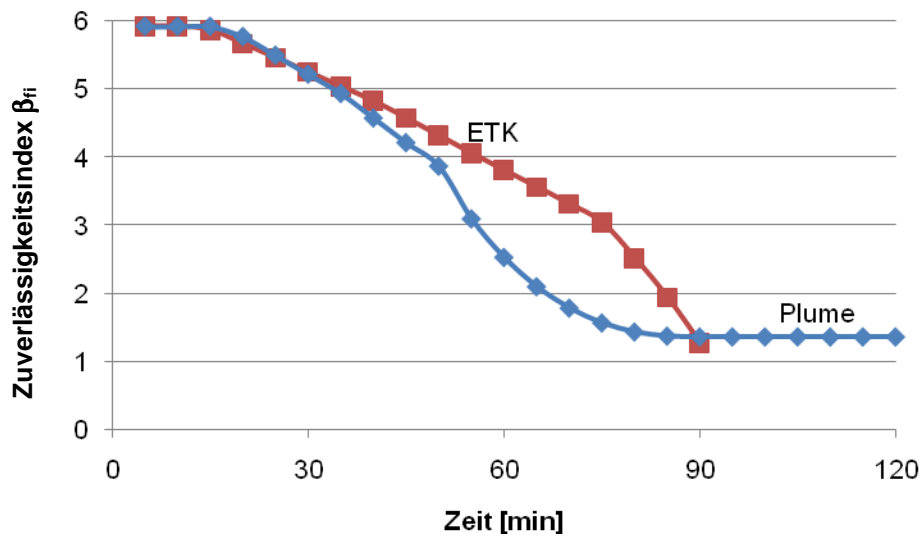


Bild 50: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Stahlstütze

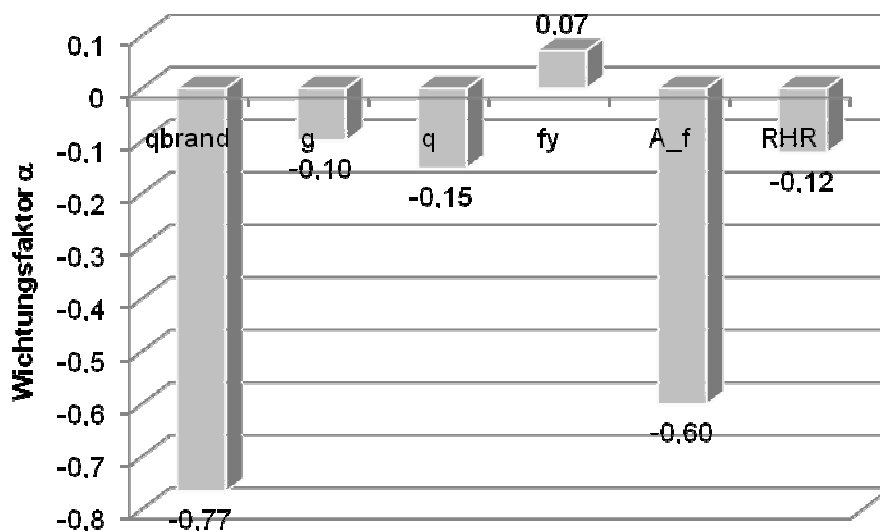


Bild 51: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 95. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 1,4$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum mit $\min \beta_{fi,NB} = 1,4$ nach ca. 95 Minuten deutlich unterschritten; die maximal zulässige Toleranz von $\Delta\beta = \pm 0,5$ wird nicht eingehalten. Im Normbrand ist die erforderliche Zuverlässigkeit nach ca. 80 Minuten nicht mehr gegeben; zur 90. Minute beträgt $\beta_{fi,ETK} = 1,2$.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebenden Einflussgrößen sind wiederum die Brandbelastung (q_{brand}) und die Wärmefreisetzungsrate (HRR) sowie in geringerem Umfang die Nutzlast (q). Die Streuungen der übrigen Größen (Materialkennwerte und mechanische Einwirkungen) haben nur geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten theoretisch mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.4.6 Holzbalken

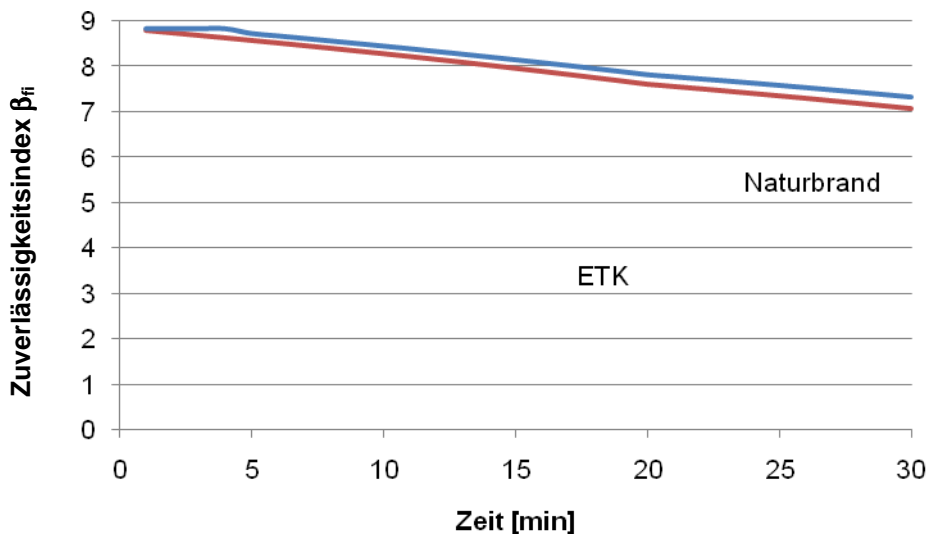


Bild 52: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ des Holzbalkens

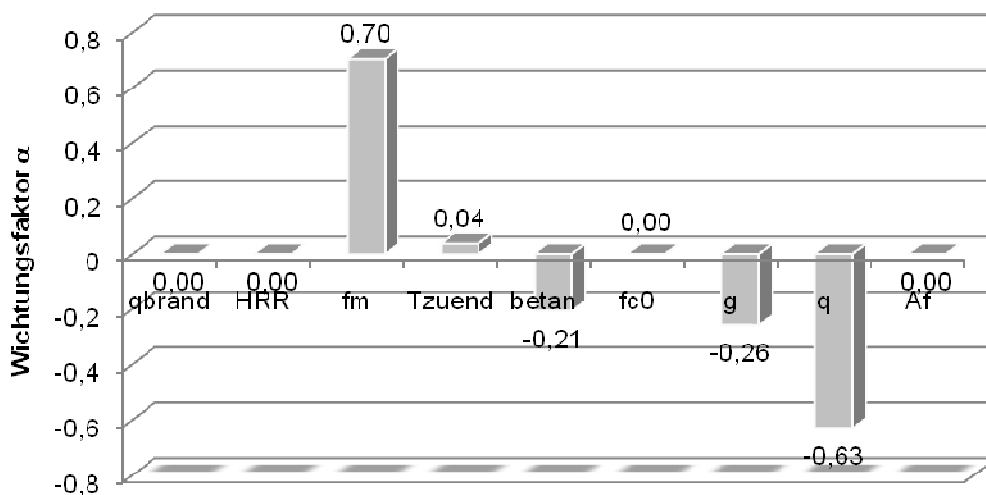


Bild 53: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 30. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = 7,3$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum und auch beim Normbrand nach 30 Minuten mit $\beta_{fi,NB} \approx \beta_{fi,ETK} \approx 7,0$ noch sehr hoch. Das liegt daran, dass ein Stabilitätsversagen des Balkens aufgrund der Verbindung mit der Dachdecke ausgeschlossen wird und der Querschnitt noch nicht nennenswert durch den Abbrand reduziert ist.

Folgerichtig haben die Streuungen der Abbrandrate zu diesem Zeitpunkt nur einen geringen Einfluss, während die Streuungen der Biegezugfestigkeit und der Nutzlast maßgebend sind.

6.4.7 Holzstütze

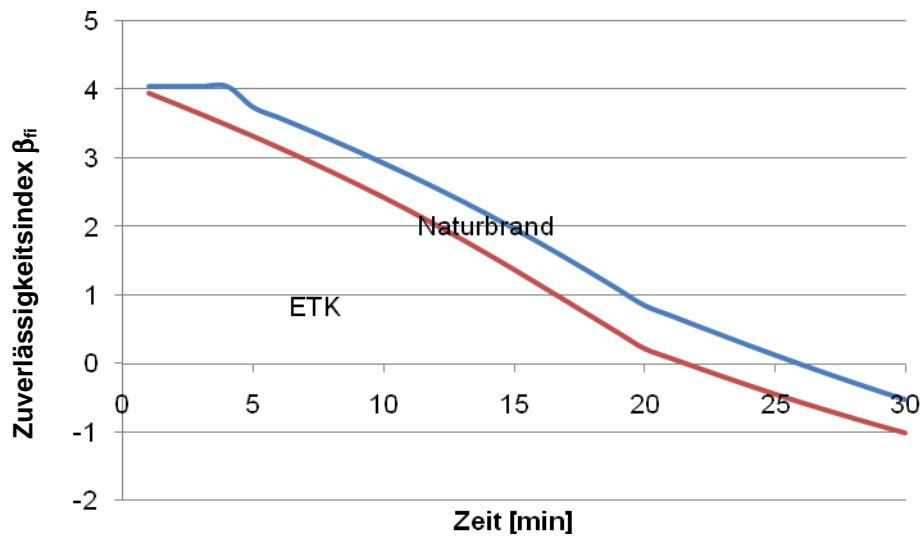


Bild 54: Verlauf des Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ der Holzstütze

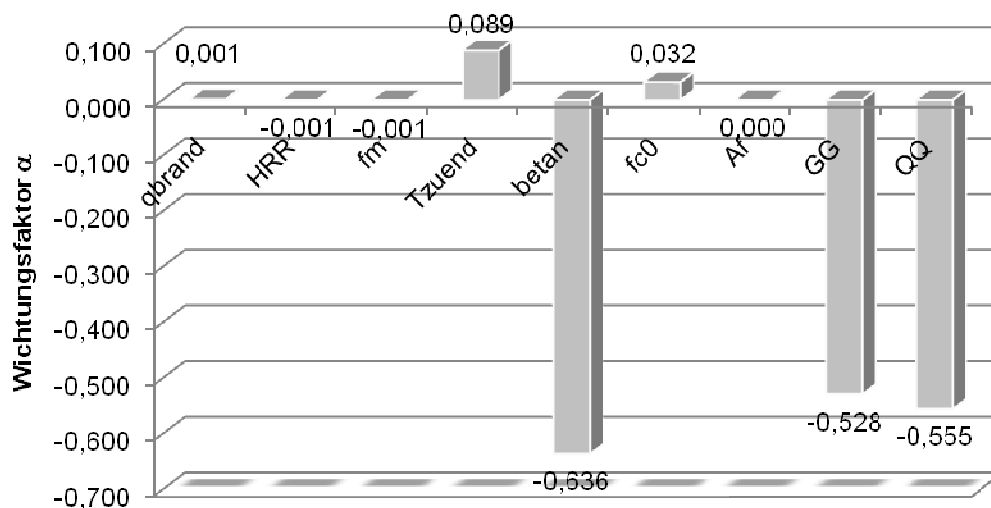


Bild 55: Sensitivitätsfaktoren α_i zur 30. Minute ($\min \beta_{fi,ist} = -0,5$)

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wird beim vollentwickelten natürlichen Brand im Brandraum nach 30 Minuten mit $\min \beta_{fi,NB} = -0,5$ erheblich unterschritten; im Normbrand liegt die Zuverlässigkeit zu diesem Zeitpunkt bei $\min \beta_{fi,ETK} = -1,0$. Die für R 30 ausgelegte Stütze ist aufgrund der Stabilitätsgefährdung im Brandfall nicht ausreichend zuverlässig.

Die für die Brandbeanspruchung maßgebende streuenden Einflussgrößen sind die Abbrandrate (β_n) und die mechanischen Einwirkungen. Die Streuungen der übrigen Größen haben praktisch keinen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und könnten mit ihren Mittelwerten eingesetzt werden.

6.5 Schlussfolgerungen aus den Zuverlässigkeitsanalysen für Einzelbauteile

Die Zuverlässigkeitsnachweise der Einzelbauteile bei den nicht durch anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen beeinflussten Naturbränden haben in allen Fällen ergeben, dass während des gesamten Brandverlaufes das Zuverlässigkeitsniveau höher liegt als bei Normbrandbeanspruchung nach ETK am Ende der bauaufsichtlich geforderten Feuerwiderstandsdauer (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Zusammenstellung der Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen für Einzelbauteile

Nutzung	Bau- stoff	Bauteil	$\beta_{\text{ist,NB}}$	$t_{\text{min } \beta}$	$\beta_{\text{ist,ET}}$ K	max α
Wohn-/Bürogebäude	Beton	Balken R 90	2,2	100	1,5	q_{Brand} , HRR
		Stütze R 90	2,2	90	0,6	q_{Brand} , HRR
	Stahl	Träger R 90	2,0	115	1,0	q_{Brand} , HRR
		Träger R 60	0,9	85	0,9	q_{Brand} , HRR
		Träger R 30	-0,6	55	1,6	q_{Brand} , HRR
	Holz	Stütze R 90	1,7	115	0,0	q_{Brand} , HRR
		Balken R 60	3,7	60	3,0	β_n , f_m
		Stütze R 60	2,0	60	1,0	β_n , Q
Verkaufs-/ Versammlungsstätte	Beton	Balken R 90	2,3	95	0,7	q_{Brand} , HRR
		Stütze R 90	2,1	100	0,6	q_{Brand} , HRR
	Stahl	Träger R 90	2,0	140	1,5	q_{Brand} , HRR
		Stütze R 90	1,6	150	0,6	q_{Brand} , HRR
	Holz	Balken R 60	4,0	60	2,6	β_n , f_m
		Stütze R 60	2,0	60	0,6	β_n , Q
Industriehalle	Beton	Balken R 90	1,4	65	0,7	A_f , RHR
		Stütze R 90	2,4	90	2,0	A_f , q_{Brand}
	Stahl	Träger R 90	1,6	100	1,5	A_f , q_{Brand}
		Stütze R 90	1,4	100	1,2	A_f , q_{Brand}
	Holz	Balken R 30	7,3	30	7,0	f_m , q
		Stütze R 30	-0,5	30	-1,0	β_n , Q

Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei den Beton- und Stahlbauteilen die Brandlastdichte (q_{brand}) meistens den größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit (d. h. den größten Sensitivitätsfaktor α) hat; bei den Holzbauteilen gilt das für die Abbrandrate (β_n). Je nach Brandmodell spielt danach entweder die Wärmefreisetzungsrate (HRR) oder die Brandfläche (A_f) die nächstgrößere Rolle.

7 Ergebnisse der Systemzuverlässigkeitsanalysen

7.1 Grundlagen und Voraussetzungen

Die Untersuchungen zur Systemzuverlässigkeit werden exemplarisch für ein mehrgeschossiges Gebäude mit Wohn-/Büronutzung gemäß Abschnitt 5.2.1 durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wird als Bauteil der Stahlträger gemäß Abschnitt 5.2.3 betrachtet, dessen Zuverlässigkeit bereits in Abschnitt 6.2.4 für den nicht durch Löschmaßnahmen beeinflussten Brand berechnet worden ist. Alle Randbedingungen werden von diesem Beispiel unverändert übernommen.

Hier sollen der Einfluss der Verfügbarkeit und der Wirksamkeit der Brandbekämpfung durch unterschiedlich schlagkräftige Feuerwehren bzw. durch eine automatische Löschanlage sowie die Interaktion dieser Maßnahmen untersucht werden. Dafür sind zusätzliche Annahmen erforderlich, die in Tabelle 28 zusammengestellt sind.

Tabelle 28: *Erweitertes stochastisches Modell*

Parameter	Sym- bol	Ein- heit	Vertei- lung	Mittel- wert	Standard- abweichung	Variati- onskoef- fizient	Quelle
Brandausbreitungs- geschwindigkeit	v_{aus}	m/min	Gauß- Normal	0,4	0,08	20 %	gewählt
Kritische Brand- fläche	$A_{f,\text{grenz}}$	m ²	Gauß- Normal	100	20	20 %	gewählt
Ausfallwahrschein- lichkeit der Sprinkler	$p_{f,\text{Spri}}$	-	-	0,02 / 0,10	-	-	gewählt
Auslösetemperatur der Sprinkler	T_{Spri}	°C	Gauß- Normal	200	50	-	gewählt
Eingreifzeit (Beginn der Löscharbeiten der Feuerwehr)	t_{LA}	min	Gauß- Normal	10 / 20	2 / 5	-	gewählt

Die Versagens- bzw. die Erfolgswahrscheinlichkeit der Löscharbeiten der Feuerwehr wird mit einem vereinfachten Modell in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Löschangriffs abgeschätzt, das in Anhang A näher beschrieben wird.

In den nachfolgenden Untersuchungen werden exemplarisch zwei Varianten mit unterschiedlicher Eingreifzeit (t_{LA}) berücksichtigt, und zwar ein schneller Löschangriff nach 10 Minuten (Werkfeuerwehr) und ein späterer Löschangriff nach 20 Minuten

(öffentliche Feuerwehr). Diese Werte werden jeweils als Mittelwerte angenommen. Die Standardabweichung beträgt 2 (Werkfeuerwehr) bzw. 5 Minuten (öffentliche Feuerwehr). Als beherrschbare Brandfläche $A_{f,grenz}$ wurden 100 m^2 und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit $0,4 \text{ m/min}$ gewählt und jeweils ein Variationskoeffizient von $V=20 \%$ angesetzt.

Als häufigste automatische Löschanlage wird eine Sprinkleranlage gewählt. Hierfür geben die deutschen Sachversicherer eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $p_3 = 0,02$ ($\equiv p_{f,Spri}$) an, während international durchweg mit einer Nichtverfügbarkeit von 10% gerechnet wird. Zum Vergleich wird in einem Szenario diese Ausfallwahrscheinlichkeit ebenfalls berücksichtigt. Als Auslösetemperatur wird konservativ $200 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen.

Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten wirksam werdenden Maßnahmen verändern den bis dahin unbeeinflussten Temperaturzeitverlauf (Bild 57). Nach Beginn der Löscharbeiten der Feuerwehr steigt die Temperatur zunächst noch etwas an, bevor der Brand gelöscht wird. Ähnlich ist es bei der Sprinkleranlage, die jedoch früher (im Beispiel bei ca. $200 \text{ }^\circ\text{C}$) auslöst und den noch kleinen Brand rascher löscht.

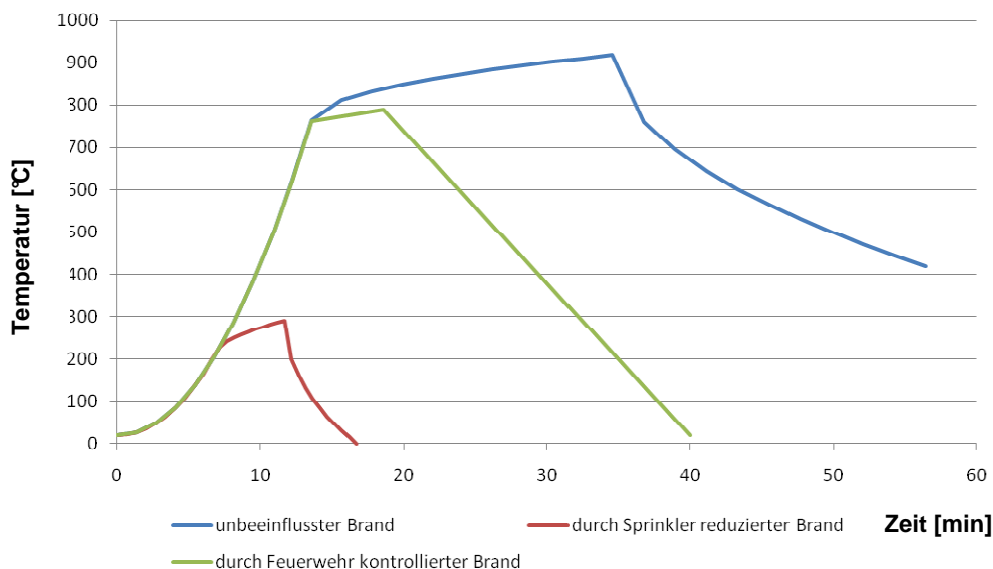


Bild 57: Temperaturzeitkurven für den vollentwickelten Raumbrand ohne Einfluss von Löschmaßnahmen, für den durch Löschmaßnahmen der Feuerwehr bzw. durch die Sprinkleranlage gelöschten Brand

7.2 Bauteilzuverlässigkeit bei Berücksichtigung von Einzelmaßnahmen

Zunächst wird untersucht, wie sich die verschiedenen Maßnahmen der Brandbekämpfung auf den Brandverlauf und die Zuverlässigkeit des bekleideten Stahlträgers auswirken, der in Abschnitt 6.2.4 ohne Berücksichtigung abwehrender und anlagentechnischer Maßnahmen berechnet wurde. Dabei hatte sich im Naturbrand die minimale Zuverlässigkeit rechnerisch nach ca. 120 Minuten ergeben.

Bild 58 zeigt die berücksichtigten Ausfall- und Erfolgswahrscheinlichkeiten der Brandbekämpfungsmaßnahmen. In Bild 59 sind die zeitlichen Verläufe der Zuverlässigkeit des Stahlträgers bei dem unbeeinflussten Brand und bei Wirkung der einzelnen Brandbekämpfungsmaßnahmen gezeichnet. Im Fall der Sprinkleranlage oder eines frühen Löschangriffs zum Zeitpunkt $t_{LA} = 10$ Minuten (Werkfeuerwehr) stellen sich im Brandraum keine Temperaturen ein, die eine Abnahme der mechanischen Kennwerte bewirken könnten, so dass die Zuverlässigkeit in diesen Fällen nicht vom Ausgangsniveau abweicht (grüne Kurve). Bei einem Löschangriff nach $t_{LA} = 20$ Minuten wird die Zuverlässigkeit zwar geringer, bleibt jedoch über dem Verlauf für den nicht durch Löschmaßnahmen beeinflussten Brand (rote Kurve), da durch den Löschangriff keine ähnlich hohen Temperaturen im Brandraum erreicht werden.

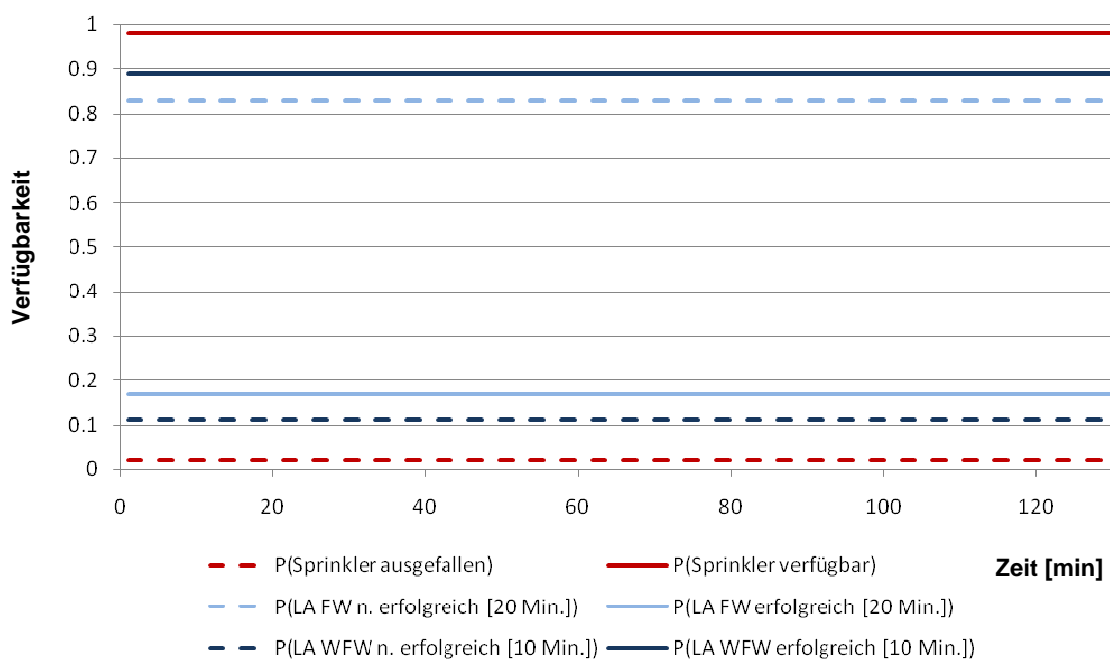


Bild 58: Verfügbarkeit (durchgezogene Linien) bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit (gestrichelte Linien) der verschiedenen Brandschutzmaßnahmen

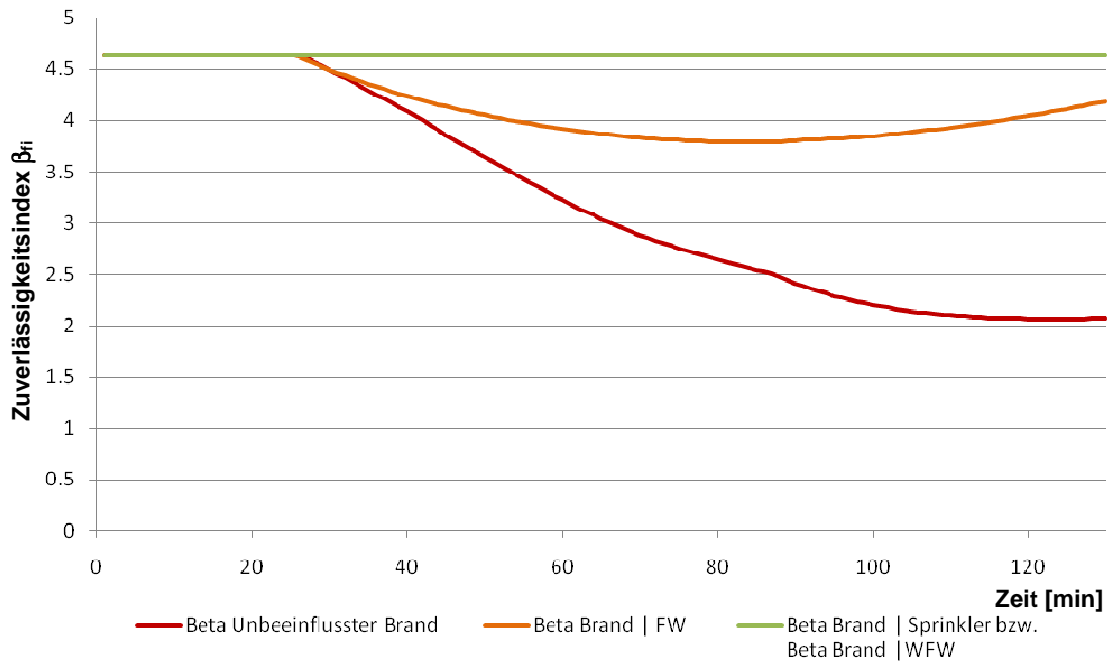


Bild 59: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex der einzelnen Komponenten

7.3 Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen

Das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen kann anschaulich durch Ereignisbäume dargestellt werden (Bild 60 bis 62), in denen die Maßnahmen als Komponenten schrittweise zu einem Gesamtsystem verknüpft werden. Der nicht durch Löschmaßnahmen beeinflusste, vollentwickelte Raumbrand tritt nur dann ein, wenn alle Maßnahmen innerhalb eines Ereignispfades nicht verfügbar sind bzw. versagen. Bei allen anderen Ereignispfaden wird durch die Wirkung von einer oder mehrerer Brandbekämpfungsmaßnahmen der Brandverlauf verändert.

7.3.1 Beeinflussung des Brandes durch die Feuerwehr

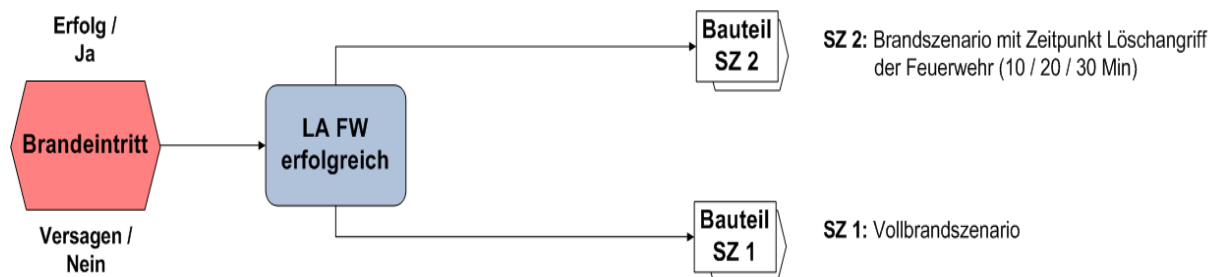


Bild 60: Ereignisbaum unter Berücksichtigung des Löscherfolgs und der Löschwirkung der Feuerwehr (SZ 2) sowie des Vollbrandszenarios (SZ 1)

7.3.2 Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage

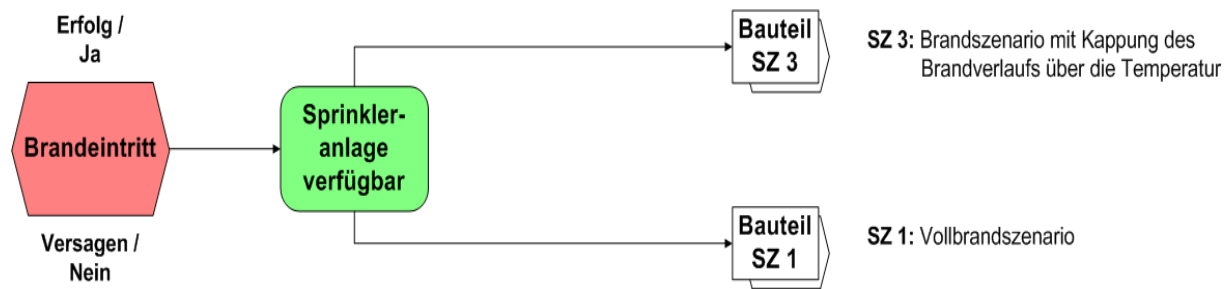


Bild 61: Ereignisbaum unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und der Löschwirkung einer Sprinkleranlage (SZ 3) sowie des Vollbrandszenarios (SZ 1)

7.3.3 Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und die Feuerwehr

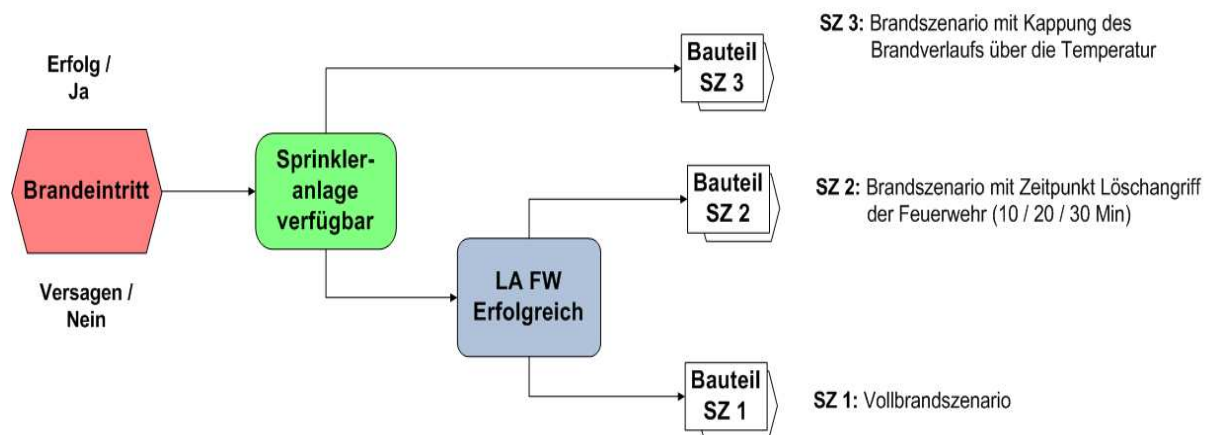


Bild 62: Ereignisbaum für eine Kombination aus den vorhergehenden Szenarien (SZ 1 bis SZ 3)

7.4 Berücksichtigung des Einsatzes der Feuerwehr

7.4.1 Öffentliche Feuerwehr

Der Ereignisablauf (Bild 60) führt auf zwei Brandszenarien zurück. Wie eingangs beschrieben, erfolgt die Abschätzung des Löscherfolgs über die beherrschbare Brandfläche. Bild 63 zeigt die Systemzuverlässigkeit für den Eingreifzeitpunkt der Feuerwehr nach $t_{LA} = 20$ Minuten. Die Systemzuverlässigkeit (blau) wurde unter Berücksichtigung des Gesamtsystems mit SYSREL ermittelt. Neben der mit dem Programm ermittelten Systemzuverlässigkeit wird in Bild 63 auch eine händisch berechnete Systemzuverlässigkeit dargestellt, die durch Verknüpfung der Wahrscheinlichkeit nicht erfolgreicher Löschmaßnahmen mit der Versagenswahrscheinlichkeit im Vollbrandszenario ermittelt werden konnte (lila punktiert). Gegenüber der Systemzuver-

lässigkeit nach SYSREL ergeben sich nur im Zeitfenster des Eingreifens der Feuerwehr Abweichungen, ab der 45. Minute sind die Kurven praktisch identisch.

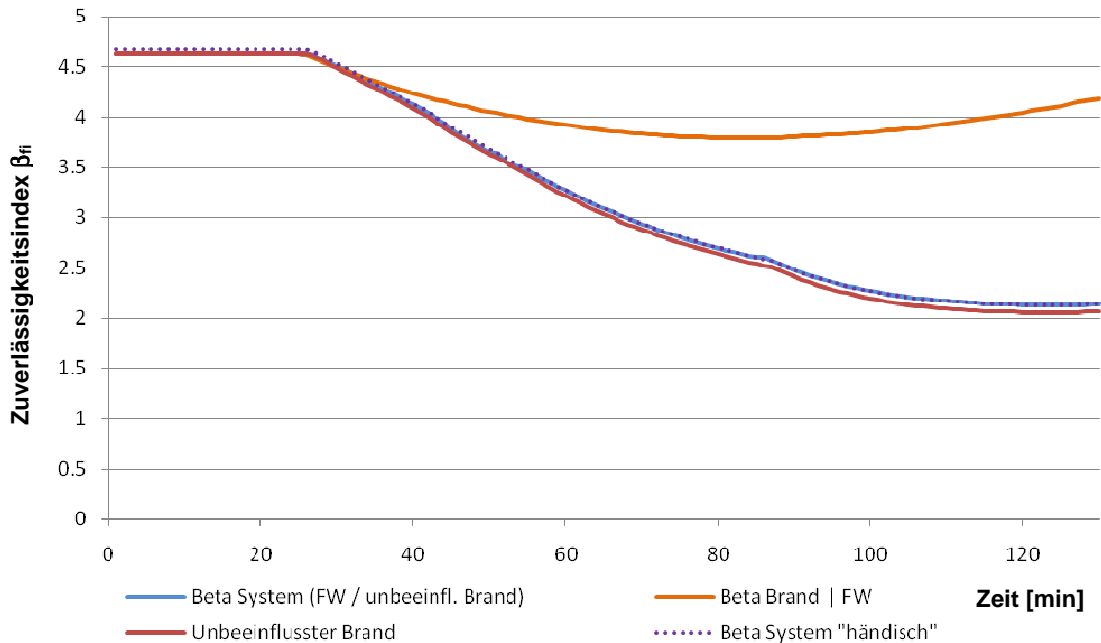


Bild 63 Systemzuverlässigkeitsindex für den durch die Feuerwehr beeinflussten Brand

Bild 64 zeigt die Sensitivitätsfaktoren α für die 120. Minute der Simulation. Die gegenüber der Analyse der Einzelkomponenten hinzugekommenen Größen - beherrschbare Brandfläche $A_{f,grenz}$ ($\equiv A_{LA_erf}$), Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} ($\equiv v_{aus}$) und die Eingreifzeit der Feuerwehr t_{LA} ($\equiv zpkt_LA$) - haben zu diesem Zeitpunkt einen verhältnismäßig geringen Einfluss, da die Versagenswahrscheinlichkeit des Löschangriffs wegen des späten Einsatzes sehr hoch ist ($p_2 = 0,83$). Die Absolutbeträge der Faktoren ändern sich zwar, aber ihre Reihenfolge bleibt in etwa gleich.

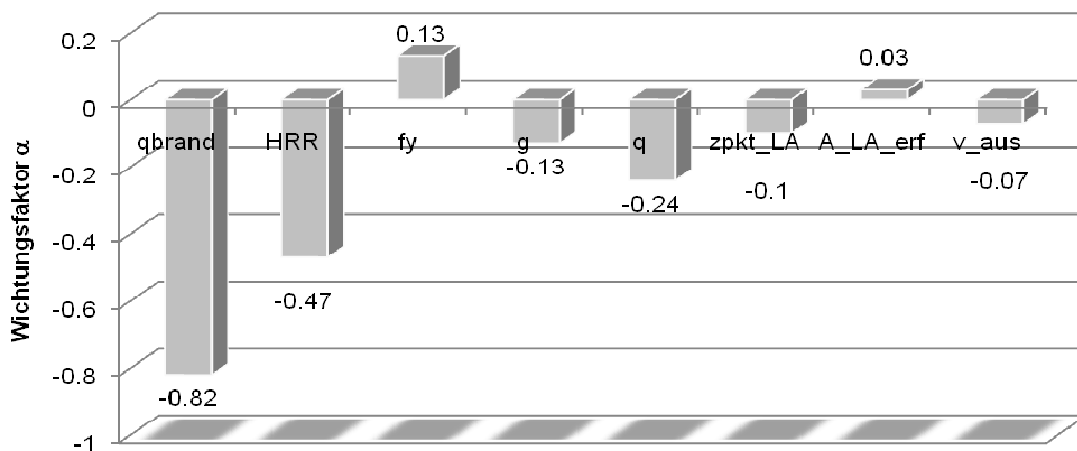


Bild 64: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute ($\min \beta_{ist} = 2,14$)

Das Programm SYSREL ermittelt neben den Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen auch entsprechende Größen für die einzelnen Komponenten. Das folgende Bild 65 stellt die Größen für verschiedene Zeitpunkte zusammen.

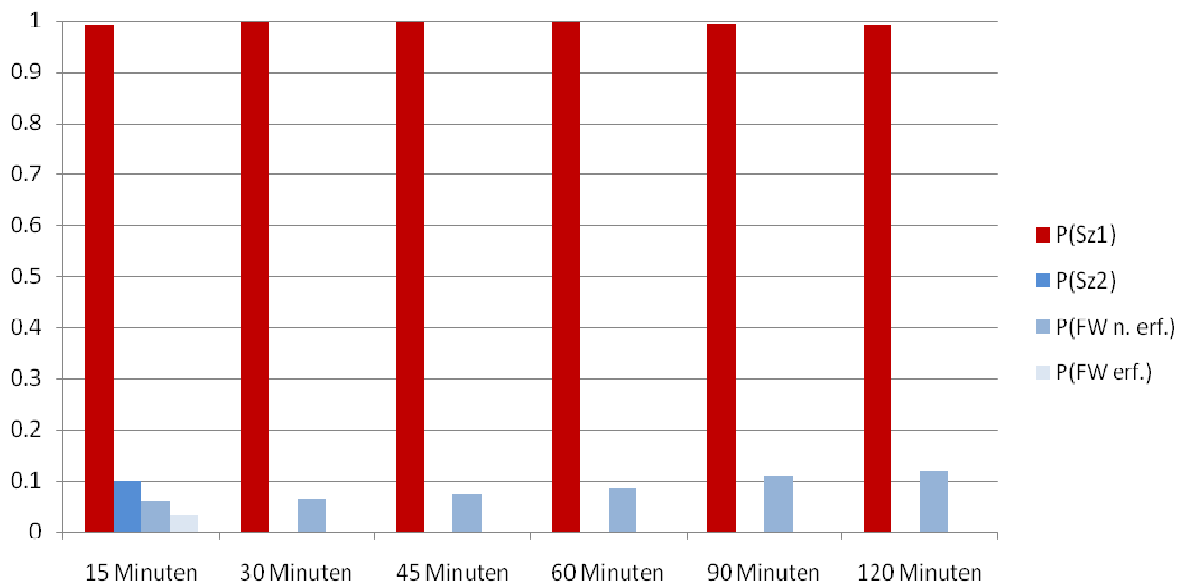


Bild 65: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.4.2 Werkfeuerwehr

Analog zu Abschnitt 7.6.1 wird jetzt der Einfluss einer schlagkräftigen Werkfeuerwehr untersucht. Die zuvor getroffenen Annahmen haben weiter Bestand, der Mittelwert des Eingreifzeitpunktes der Feuerwehr wird auf 10 Minuten herabgesetzt. Zur Berücksichtigung der besonderen Ortskenntnis der Werkfeuerwehr wird die Standardabweichung dieses Werts von 5 Minuten auf 2 Minuten reduziert. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Löschangriffs beträgt unter diesen Randbedingungen und unter Berücksichtigung der Streuungen der Einflussgrößen 17 %.

Bild 66 zeigt die Auswirkung der Werkfeuerwehr auf die Zuverlässigkeit des Stahlträgers im Vergleich zu dem unbeeinflussten Brand (vgl. Bild 63). Die orange Kurve belegt, dass bei erfolgreichem Einsatz der Werkfeuerwehr die Zuverlässigkeit nicht verändert wird. Die berechnete Systemzuverlässigkeit (blau) liegt zwischen den Zuverlässigkeiten aufgrund der beiden Szenarien SZ1 und SZ2. Ab einem Zeitpunkt von ca. $t = 50$ Minuten entspricht die Systemzuverlässigkeit dem Wert, der vereinfacht durch Verknüpfung der Wahrscheinlichkeit nicht erfolgreicher Löschanmaßnahmen mit der Versagenswahrscheinlichkeit im Vollbrandszenario ermittelt wurde (lila punktiert).

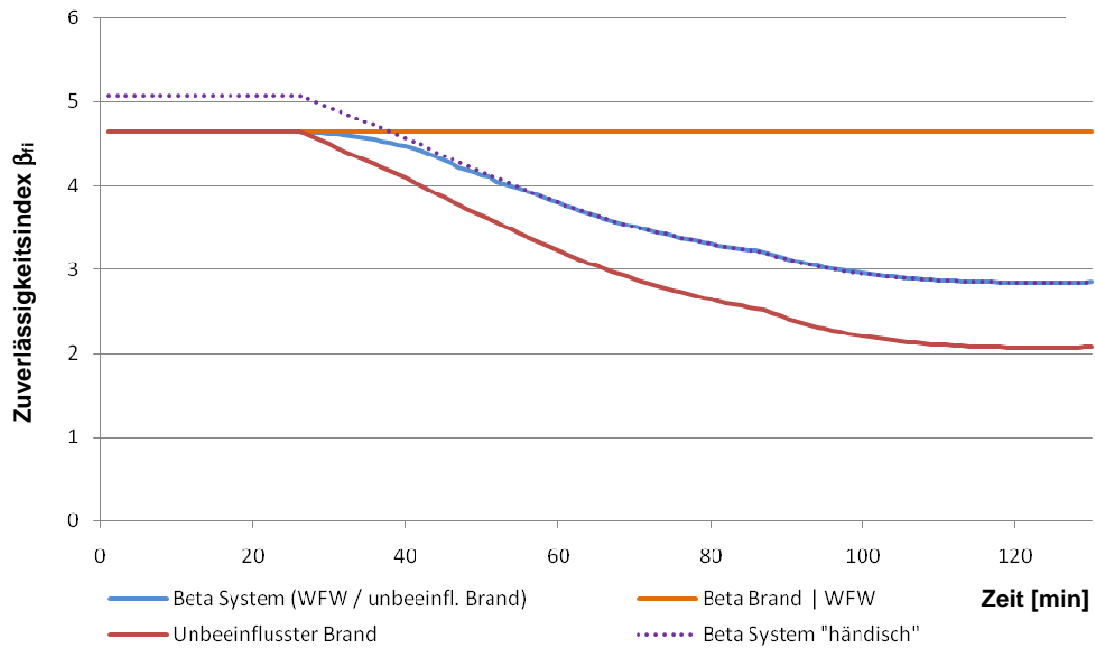


Bild 66: Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex der einzelnen Komponenten

Bild 67 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 120. Minute und Bild 68 darunter wiederum die sich ändernden Gewichte der Komponenten für exemplarische Zeitpunkte.

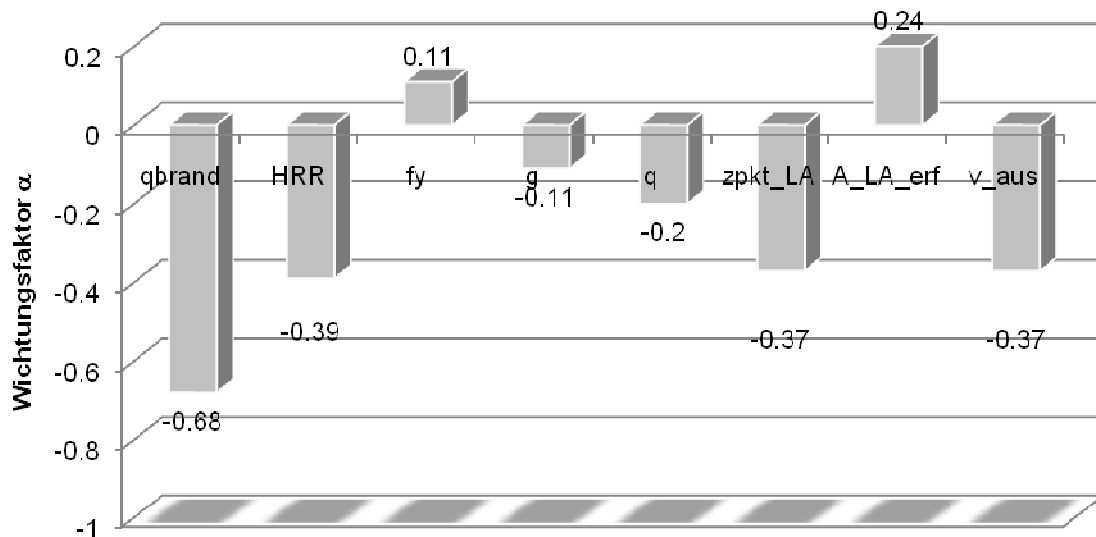


Bild 67: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute ($\min \beta_{ist} = 2,85$); Symbole siehe Erläuterungen zu Bild 64

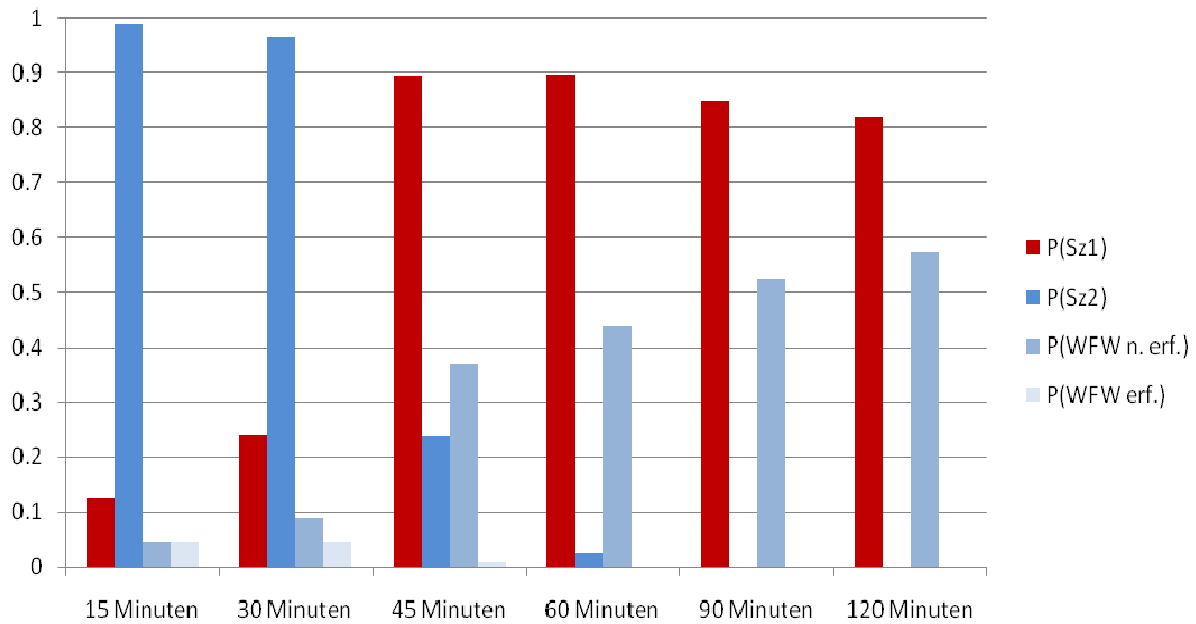


Bild 68: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.5 Berücksichtigung der Wirkung einer Sprinkleranlage

Der Ereignisablauf (Bild 59) führt auf zwei Brandszenarien zurück, die im Unterschied zum Einfluss der Feuerwehr einfacher sind, da eine feste Ausfallwahrscheinlichkeit für die Sprinkleranlage zugrunde gelegt wird. Um den international variierenden Angaben für die Ausfallwahrscheinlichkeiten von Sprinkleranlagen zu entsprechen, enthalten die Auswertungen Darstellungen für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 2% und 10 %.

Bild 69 zeigt die ermittelte Systemzuverlässigkeit (blau bzw. hellblau) im Vergleich mit der Zuverlässigkeit für die beiden Szenarien sowie einer direkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage und dem Vollbrandszenario händisch ermittelten Systemzuverlässigkeit (lila punktiert bzw. strichpunktiert).

Im Vergleich zum vorherigen Abschnitt fällt auf, dass die Auswirkungen der Löschanlage größer sind die der Löschmaßnahmen der Feuerwehr. Dies liegt an der hohen Erfolgswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage im Vergleich zur Wahrscheinlichkeit für erfolgreiche Löschmaßnahmen. Wieder fällt auf, dass die händisch ermittelte Systemzuverlässigkeit für lange Simulationsdauern mit der programmtechnisch ermittelten Systemzuverlässigkeit übereinstimmt.

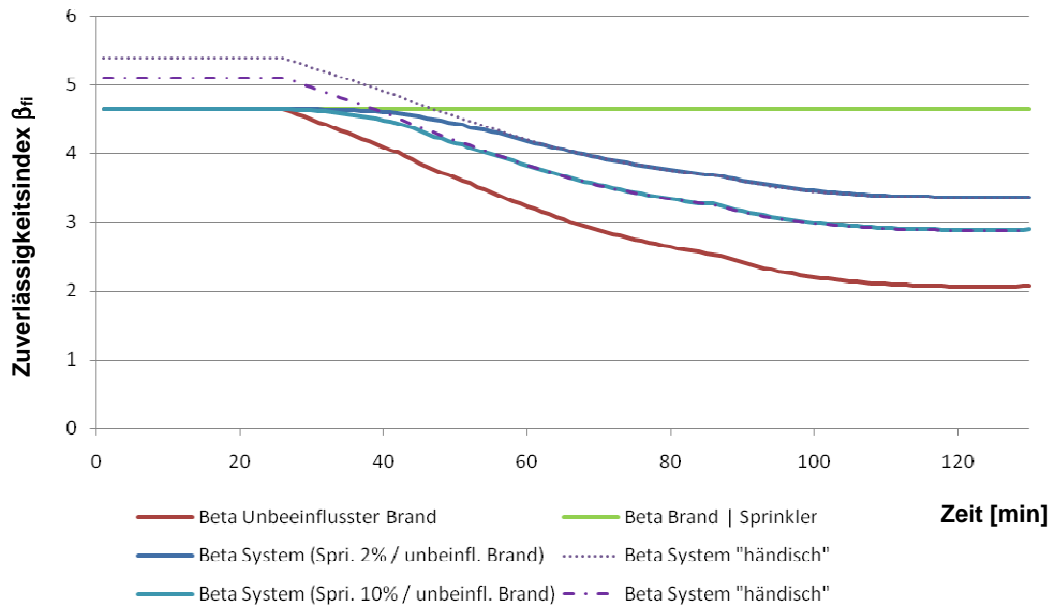


Bild 69: Systemzuverlässigkeit für den durch die Sprinkleranlage beeinflussten Brand

Bild 70 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 120. Minute und die Aufzählung darunter wiederum die Reihenfolge der Komponenten exemplarische Zeitpunkte.

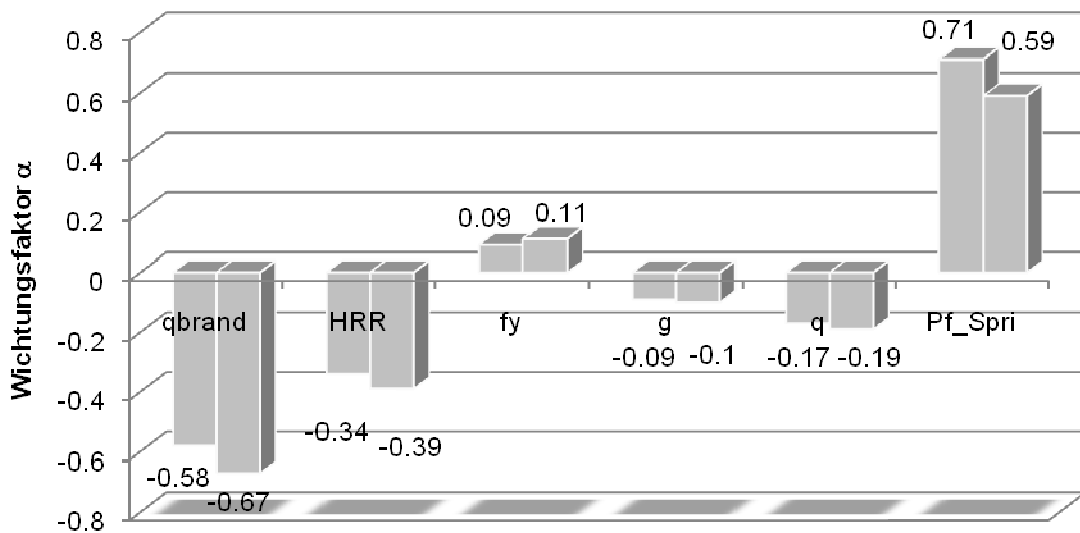


Bild 70: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute für beide Ausfallwahrscheinlichkeiten ($\min \beta_{ist}=2,88$ bzw. $3,36$)

Durch den dominierenden Einfluss der Verfügbarkeit der Sprinkleranlage (Pf_Spri) kommt es zu starken Abweichungen der Sensitivitätsfaktoren gegenüber der Untersuchung der Einzelkomponente, wobei die Reihenfolge der Signifikanz der Basisvariablen gleich bleibt. Bild 71 zeigt die Sensitivitätsfaktoren für die im System vorhandenen Komponenten bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage von 2 %. Bild 72 gilt analog für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 %.

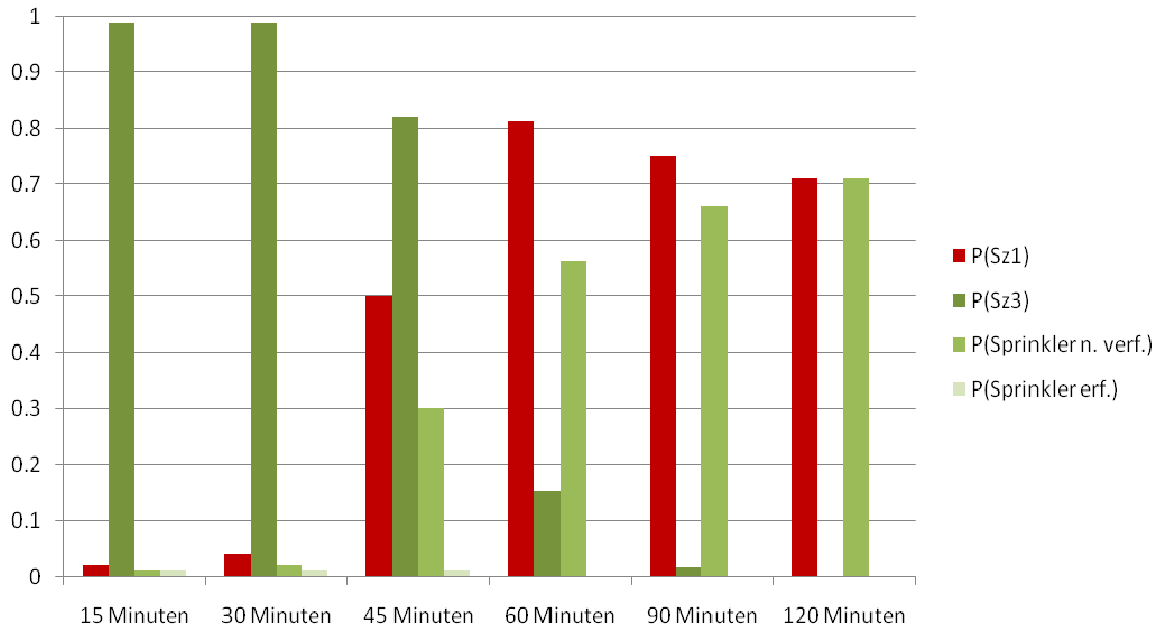


Bild 71: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte für die Ausfallwahrscheinlichkeit von 2%

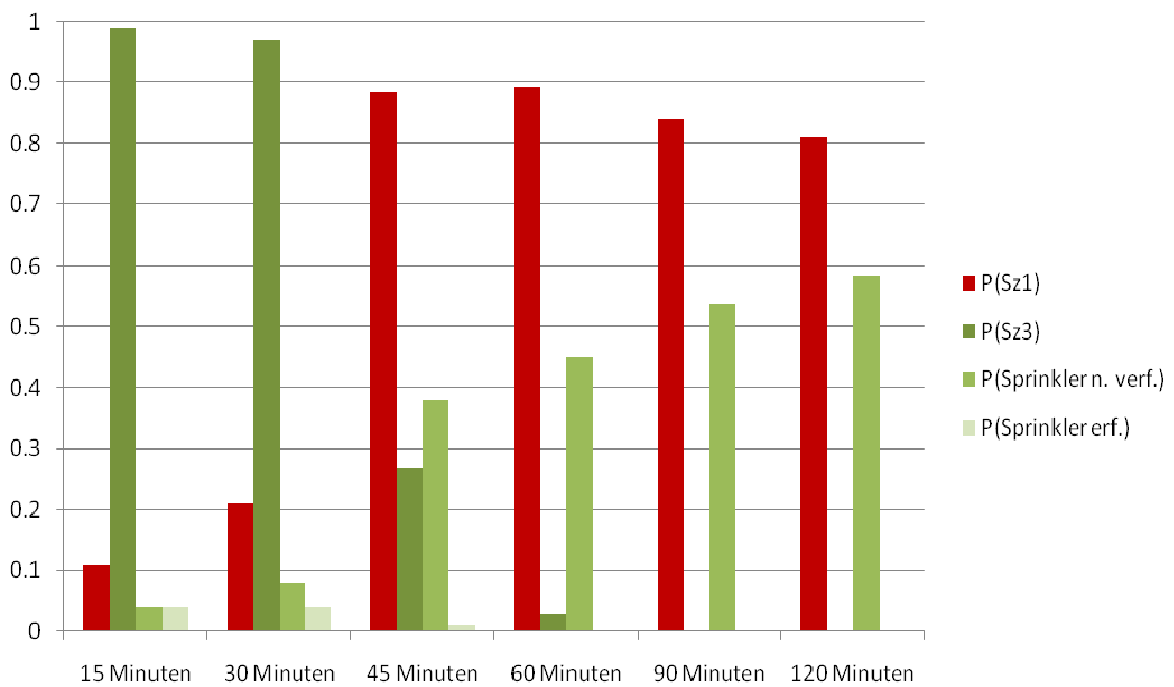


Bild 72: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte für die Ausfallwahrscheinlichkeit von 10%

7.6 Beeinflussung durch Feuerwehr und Sprinkleranlage

7.6.1 Öffentliche Feuerwehr und Sprinkleranlage

In diesem Fall ist der Ereignisablauf komplizierter (Bild 62), da für den Fall des Versagens der Sprinkleranlage noch die Möglichkeit erfolgreicher Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr besteht.

Bild 73 zeigt die ermittelte Systemzuverlässigkeit (blau) im Vergleich mit der Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten sowie einer direkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage (2 %), der Wahrscheinlichkeit für nicht erfolgreiche Löschmaßnahmen und dem Vollbrandszenario ermittelten Systemzuverlässigkeit (lila punktiert).

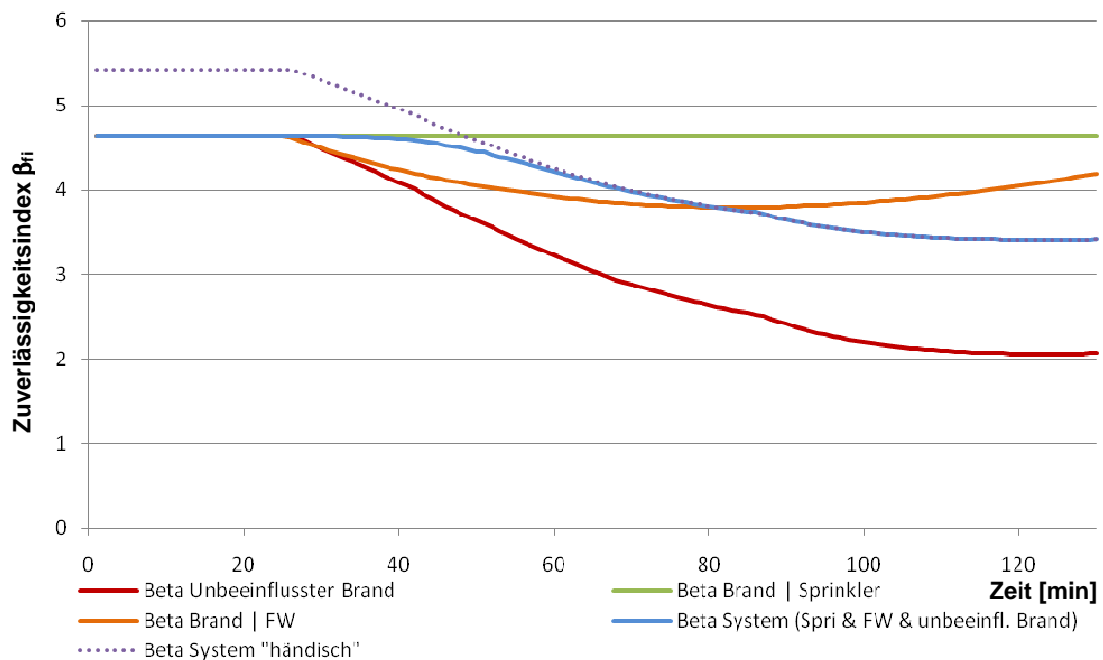


Bild 73 Systemzuverlässigkeit des Stahlträgers für den durch die Sprinkleranlage und die Feuerwehr beeinflussten Brand im Vergleich zu den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelmaßnahmen

Bild 74 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 120. Minute. Dabei spielt neben der Brandlastdichte die Ausfallwahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage (pf_{Spri}) die größte Rolle.

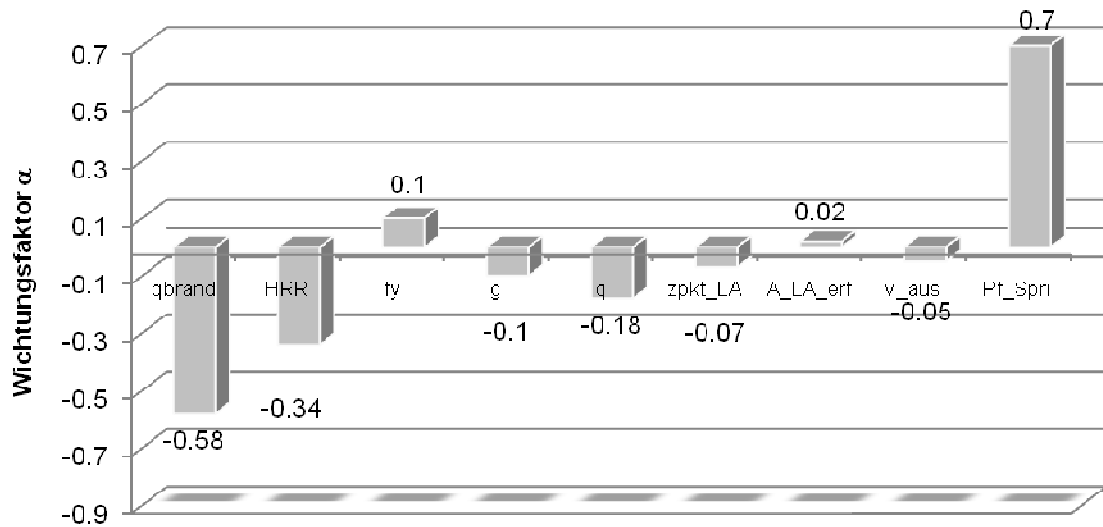


Bild 74: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute ($\min \beta_{ist} = 3,6$); Symbole siehe Erläuterung zu Bild 64

Bild 75 stellt die Sensitivitätsfaktoren für die im System vorhandenen Komponenten für verschiedene Zeitpunkte zusammen.

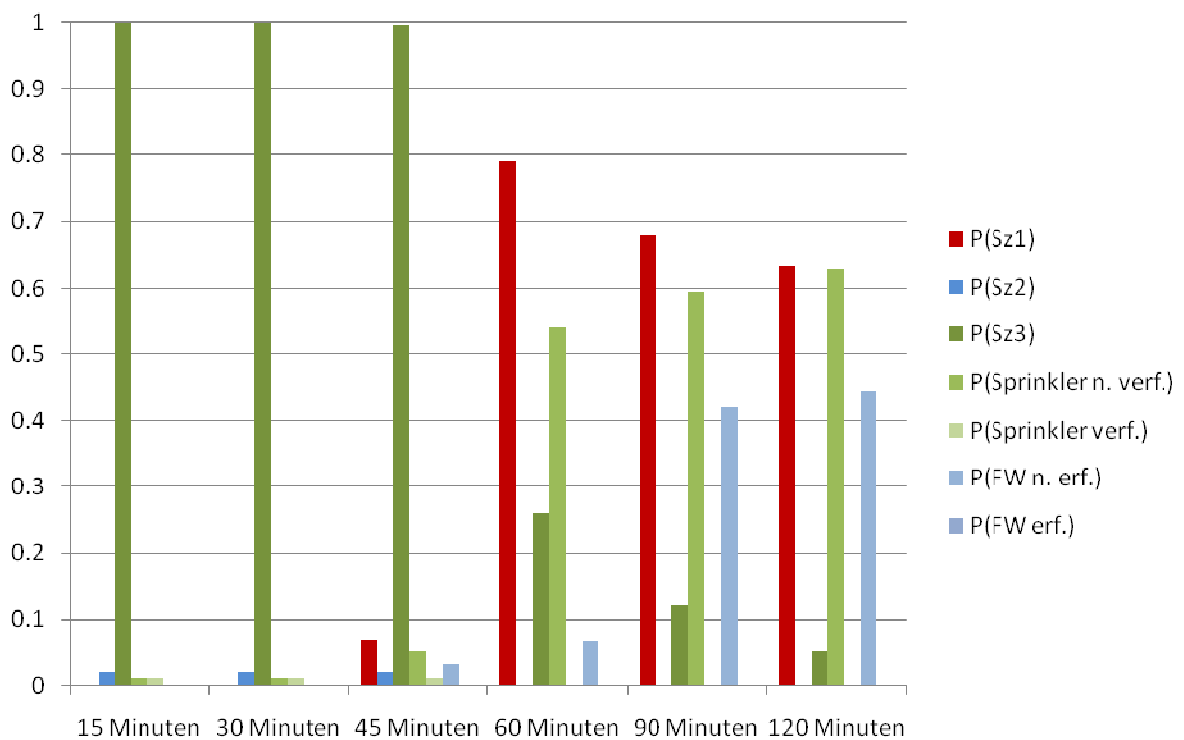


Bild 75: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.6.2 Werkfeuerwehr und Sprinkleranlage

Bild 76 zeigt die ermittelte Systemzuverlässigkeit (blau) im Vergleich mit der Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten sowie einer direkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage, der Wahrscheinlichkeit für nicht erfolgreiche Löschnahmen und dem Vollbrandszenario ermittelten Systemzuverlässigkeit (lila punktiert).

Bild 77 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 120. Minute. Neben der Brandlastdichte und der Ausfallwahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage gewinnen jetzt auch die Eingreifzeit der Feuerwehr t_{LA} ($\equiv zpkt_{LA}$) und die Parameter für den Löscherfolg $A_{f,grenz}$ ($\equiv A_{LA_erf}$) und Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} ($\equiv v_{aus}$) an Bedeutung.

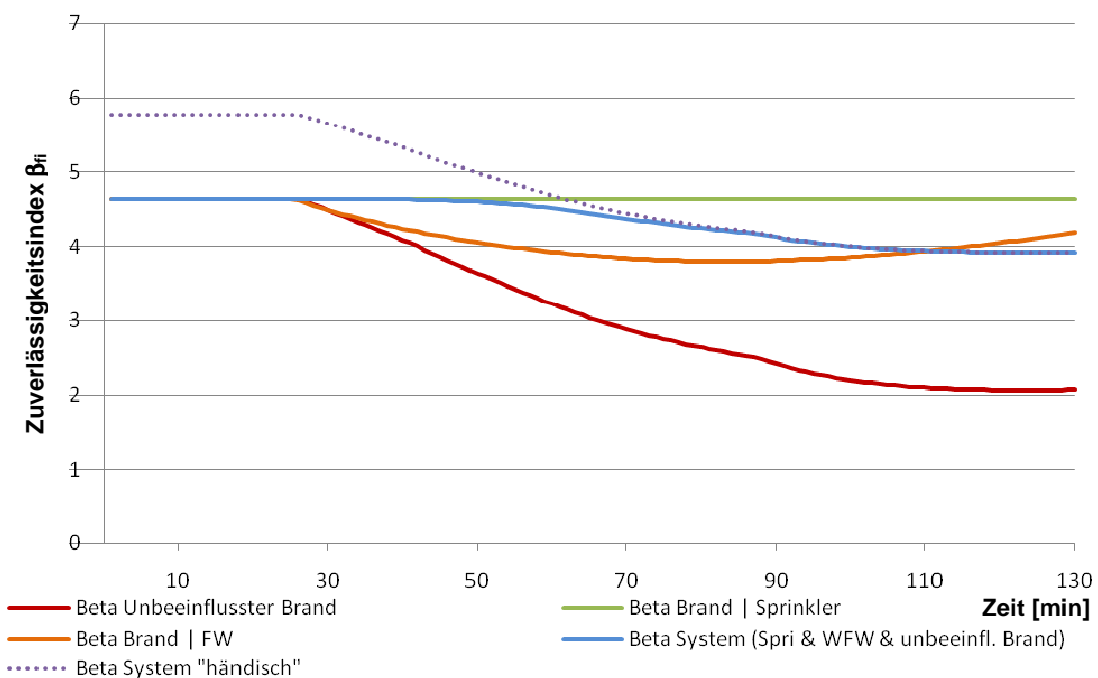


Bild 76 Systemzuverlässigkeit des Stahlträgers für den durch die Sprinkleranlage und die Feuerwehr beeinflussten Brand im Vergleich zu den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelmaßnahmen

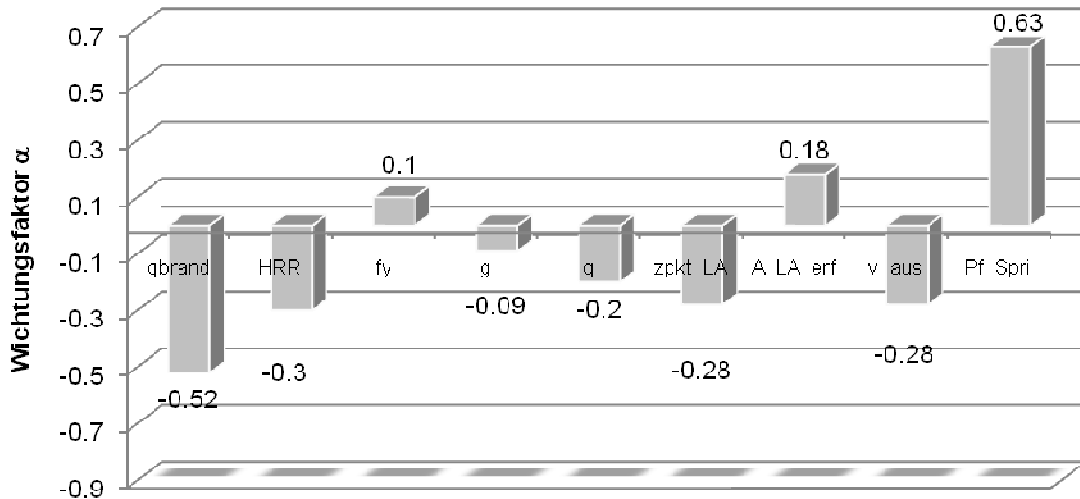


Bild 77: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute ($\min \beta_{ist}=3,9$)

Bild 78 stellt die Sensitivitätsfaktoren für die im System vorhandenen Komponenten für verschiedene Zeitpunkte zusammen.

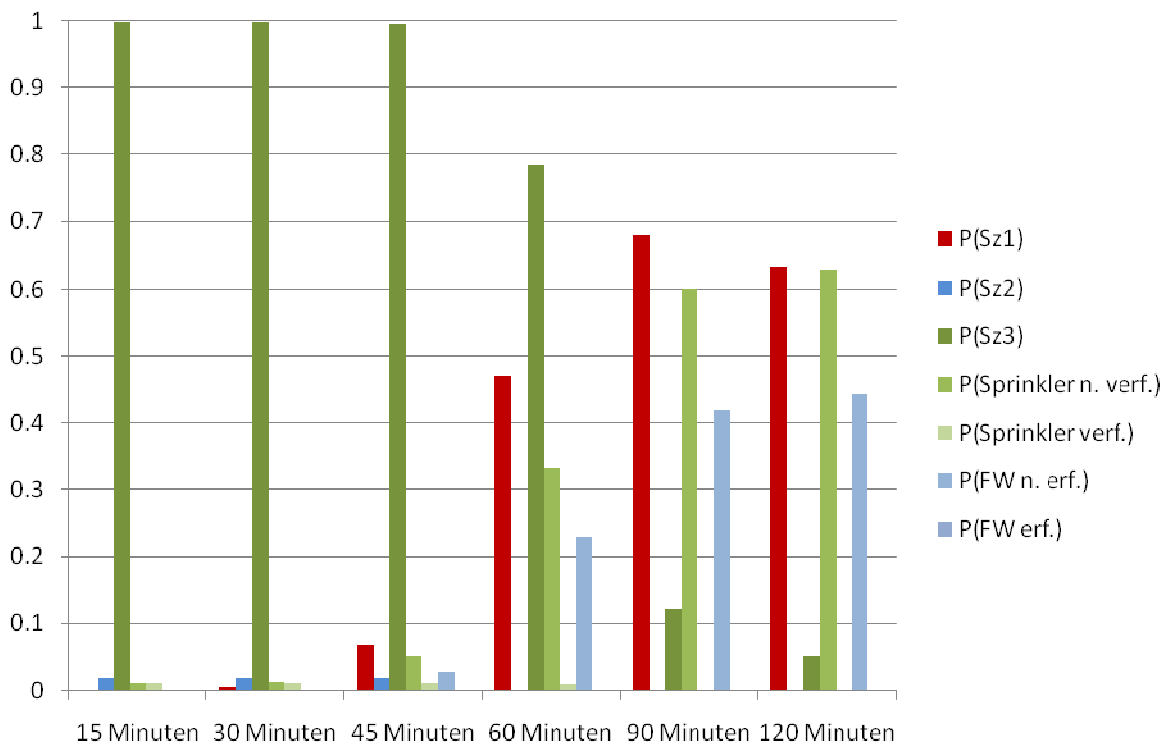


Bild 78: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.6.3 Werkfeuerwehr und öffentliche Feuerwehr und Sprinkleranlage

Abschließend wird die kombinierte Wirkung von öffentlicher Feuerwehr, Werkfeuerwehr und Sprinkleranlage untersucht. Bild 79 zeigt die ermittelte Systemzuverlässig-

keit (blau) im Vergleich mit der Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten sowie einer direkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage $p_{f,Spri}$ ($\equiv p_{f_Spri}$) und den Wahrscheinlichkeiten für nicht erfolgreiche Löschmaßnahmen durch die öffentliche und die Werkfeuerwehr in Verbindung mit dem Vollbrandszenario vereinfacht ermittelten Systemzuverlässigkeit (lila punktiert).

Zum Vergleich ist auch die Systemzuverlässigkeit aus dem vorherigen Abschnitt dargestellt, d.h. die Beeinflussung des Brandes nur durch die Werksfeuerwehr und die Sprinkleranlage (rot punktiert).

Der Löscherfolg sowie die Wirkung auf den Brandverlauf der Werkfeuerwehr und der öffentlichen Feuerwehr wurden in eigenständigen Szenarien simuliert. In Abweichung gegenüber den bisherigen Ausführungen beschreibt in diesem Fall SZ2 die Wirkung der Sprinkleranlage, während SZ3 und SZ4 die Wirkung der Werkfeuerwehr und der öffentlichen Feuerwehr beschreiben.

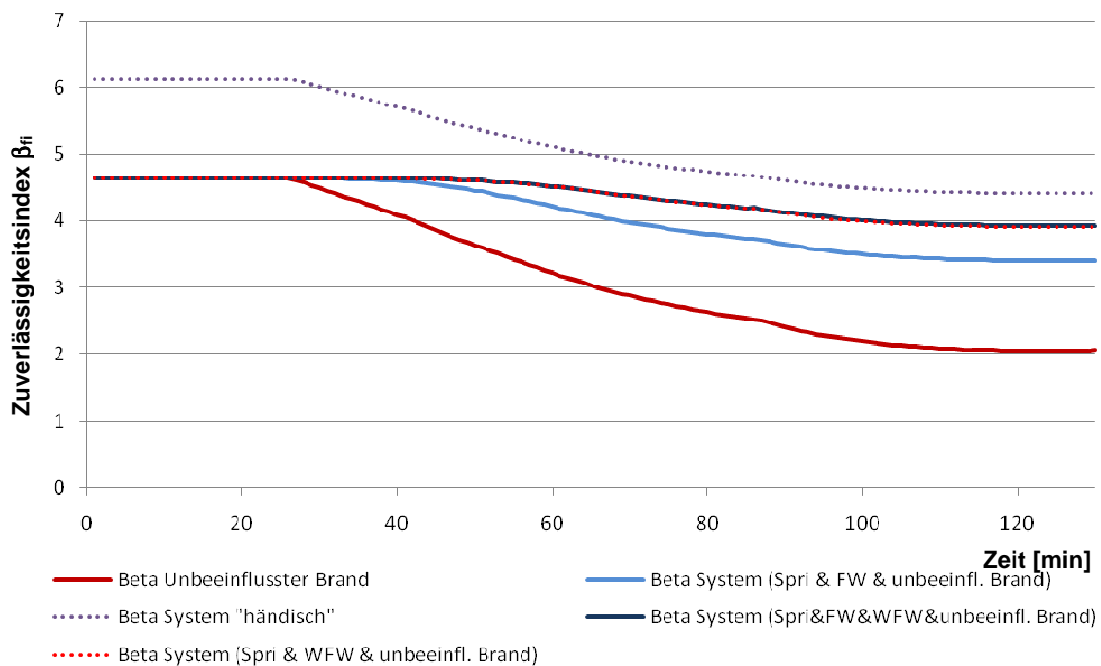


Bild 79 Systemzuverlässigkeit des Stahlträgers für den durch die Sprinkleranlage und die Feuerwehr beeinflussten Brand im Vergleich zu den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelmaßnahmen

Bild 80 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 120. Minute. Man erkennt daran deutlich, dass nur die Werkfeuerwehr aufgrund ihres früheren Eingreifens einen nennenswerten Einfluss hat - t_{LA} ($\equiv z_{pkt_WFW}$ bzw. v_{aus} ($\equiv v_{aus}$)). Hingegen hat der späte Eingreizeitpunkt der öffentlichen Feuerwehr ($\equiv z_{pkt_FW}$) keine Bedeutung

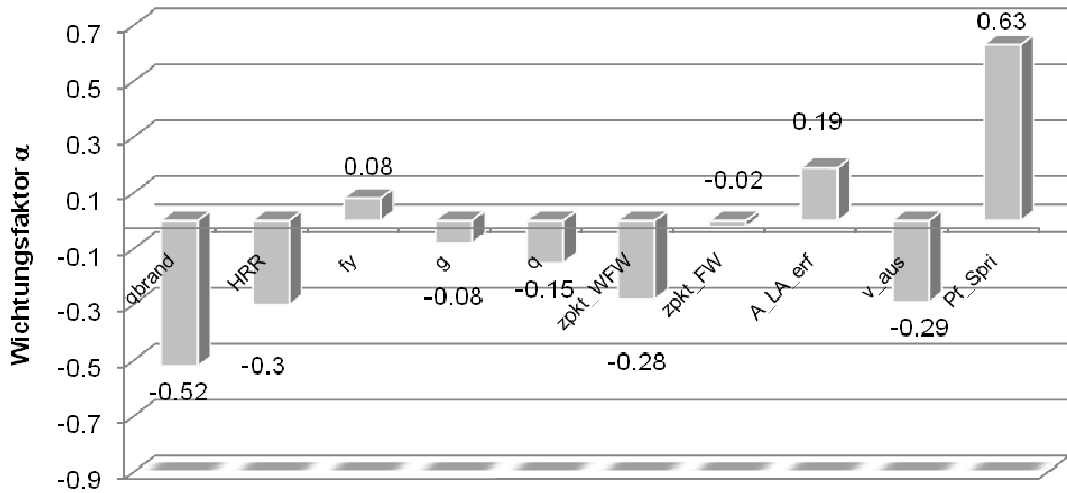


Bild 80: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 120. Minute ($\min \beta_{ist}=3,9$)

Bild 81 stellt die Sensitivitätsfaktoren für die im System vorhandenen Komponenten für verschiedene Zeitpunkte zusammen.

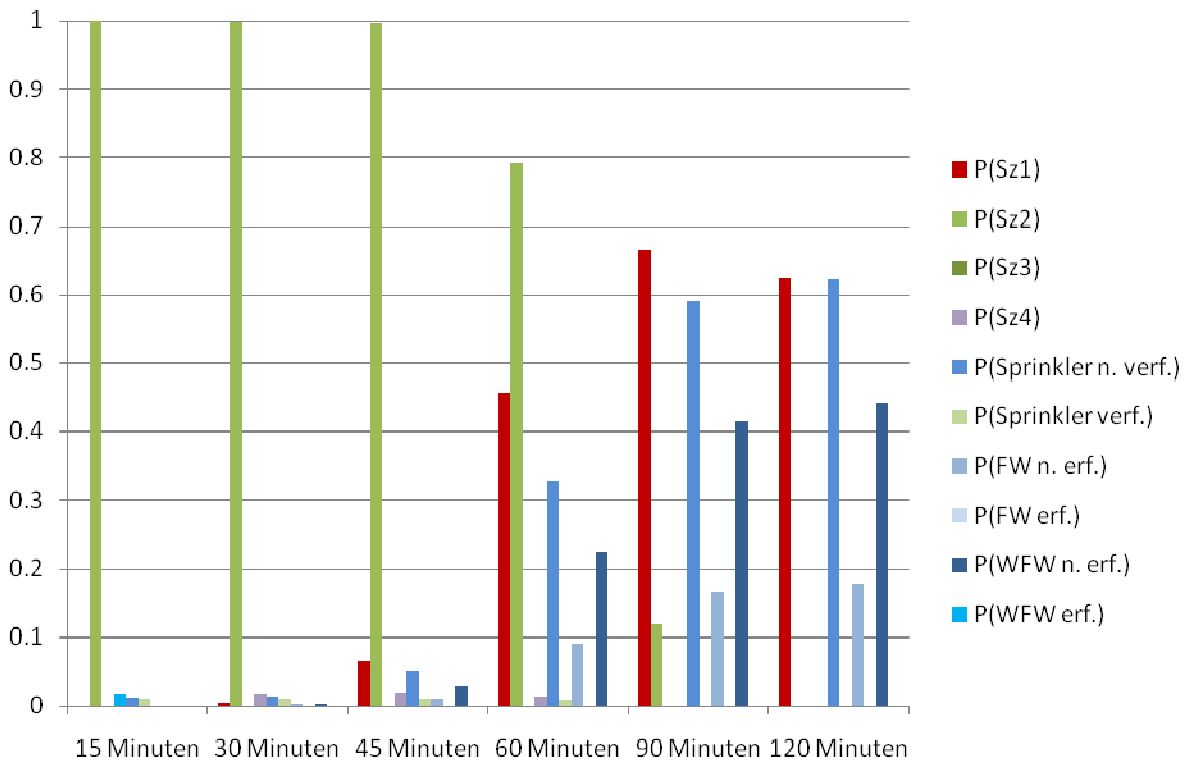


Bild 81: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.7 Reduktion baulicher Anforderungen aufgrund der Infrastruktur

7.7.1 Komponentenzuverlässigkeit

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich eine Reduktion der baulichen Brandchutzmaßnahmen des Stahlträgers von R 90 (19 mm Bekleidungsdicke GKF, vgl. Abschnitt 6.4.2) auf R30 (6 mm Bekleidungsdicke GKF) bei gleichzeitiger Berücksichtigung anlagentechnischer oder abwehrender Maßnahmen in bisheriger Form auswirkt.

Bild 82 zeigt zunächst die Auswirkungen der einzelnen Komponenten und der zugehörigen Brandverläufe auf die Zuverlässigkeit des Stahlträgers.

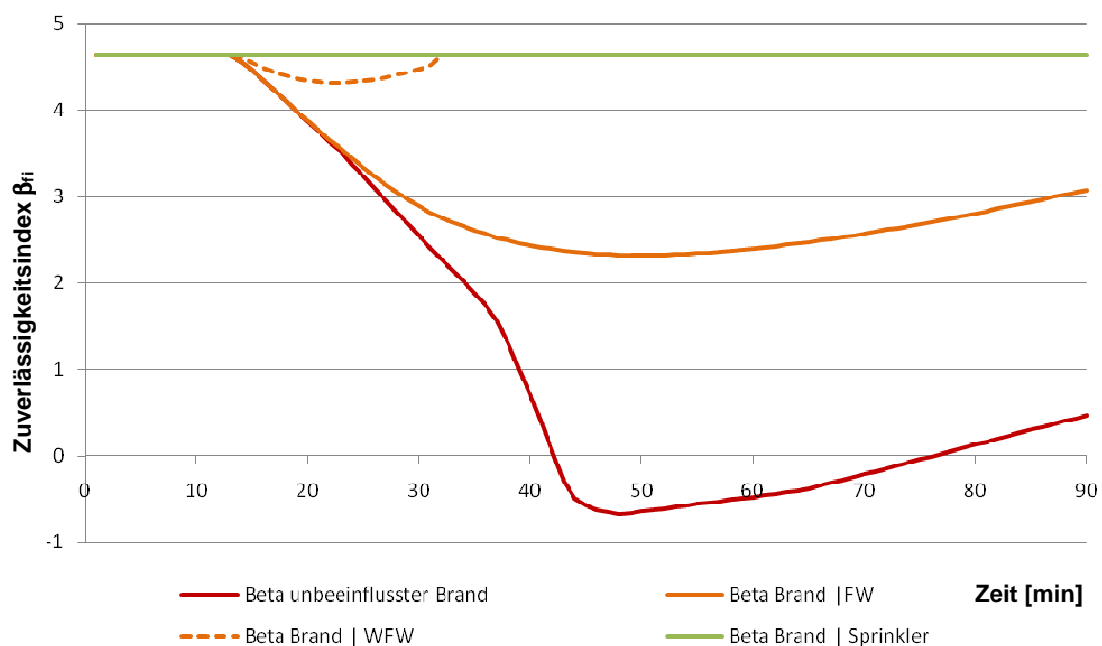


Bild 82: Entwicklung der Zuverlässigkeit des für R 30 bekleideten Stahlträgers aufgrund der Wirkung der einzelnen Komponenten

7.7.2 Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und die öffentliche Feuerwehr

Bild 83 zeigt die ermittelte Systemzuverlässigkeit (blau) im Vergleich mit den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelkomponenten. Zusätzlich ist die Systemzuverlässigkeit (lila punktiert) dargestellt, die vereinfacht aus der Versagenswahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage, der Wahrscheinlichkeit für nicht erfolgreiche Löschmaßnahmen der öffentlichen Feuerwehr und dem Vollbrandszenario ermittelt wurde.

Zum Zeitpunkt $t = 42$ Minuten wird die minimale Systemzuverlässigkeit erreicht, zeitgleich mit dem Minimum beim unbeeinflussten Brand. Sie liegt mit $\min \beta_{\text{ist}} = 2,4$ deutlich über dem Wert 2,0 für den R 90 bekleideten Stahlträger ohne Ansatz der Löschmaßnahmen (vgl. Abschnitt 6.2.4). Damit ist nachgewiesen, dass die Reduktion von

R 90 auf R 30 bei Installation einer Sprinkleranlage keine Einbußen im Sicherheitsniveau zur Folge hat.

Bild 84 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen für die 42. Minute. Sie weichen erheblich von denen der Einzelkomponente (vgl. Abschnitt 6.2.4) ab. Auffällig ist die sehr große Bedeutung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Sprinkleranlage (pf_Spri), für die im internationalen unterschiedlichen Werte angenommen werden (vgl. Abschnitt 7.7).

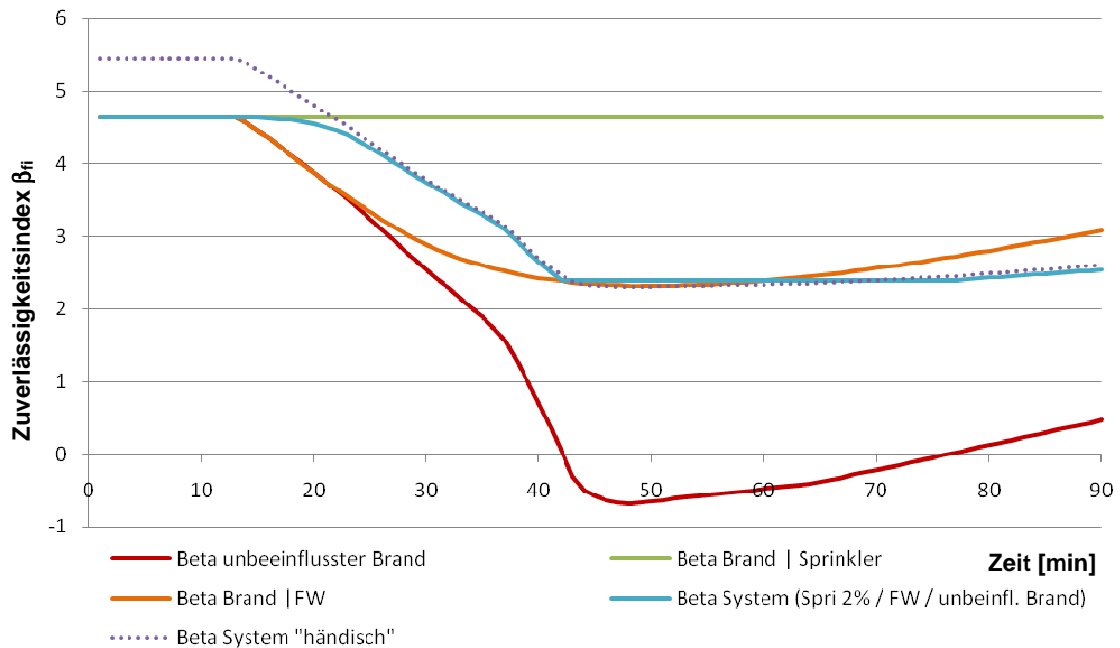


Bild 83: Systemzuverlässigkeit des für R 30 bekleideten Stahlträgers bei dem durch Sprinkleranlage und öffentliche Feuerwehr beeinflussten Brand im Vergleich zu den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelmaßnahmen

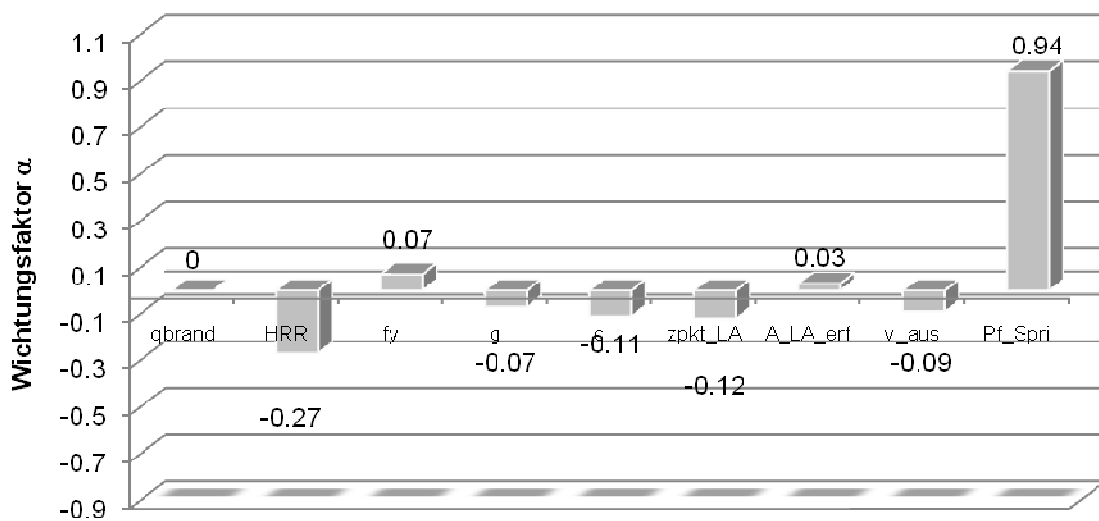


Bild 84: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 42. Minute ($\min \beta_{ist} = 2,4$)

Die zeitliche Veränderung der Sensitivitätsfaktoren für die im System vorhandenen Komponenten ist aus der Darstellung in Bild 85 für verschiedene Berechnungszeitpunkte ablesbar. Sie beruht auf der wechselnden Bedeutung der verschiedenen Szenarien und der zugehörigen Brandverläufe.

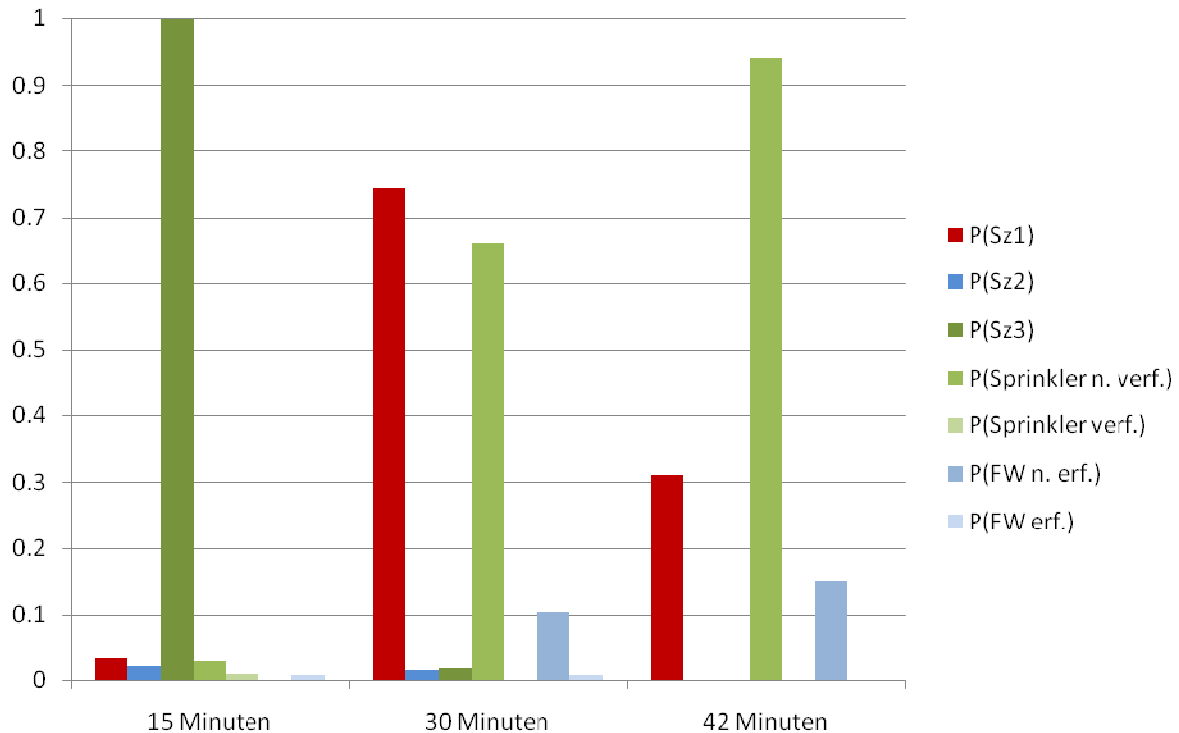


Bild 85: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.7.3 Beeinflussung des Brandes durch eine Sprinkleranlage und eine Werkfeuerwehr

In diesem Abschnitt wird die Kombination der beiden vorherigen Szenarien untersucht. Die Entwicklung der Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten kann daher dem Abschnitt 7.9.1 entnommen werden.

Die in Abschnitt 7.9.2 gemachten Ausführungen zur Systemzuverlässigkeitsanalyse gelten auch für dieses Szenario.

In Bild 86 ist die Entwicklung der Systemzuverlässigkeit dargestellt, die ein Minimum von $\min \beta_{\text{ist}} = 3,0$ erreicht und damit erhebliche Reserven gegenüber dem Referenzwert aus Abschnitt 6.2.4 aufweist.

Bild 87 zeigt die Sensitivitätsfaktoren der Basisvariablen und Bild 88 die zeitliche Veränderung der Sensitivitätsfaktoren der Komponenten. Aufgrund des Einflusses der Werkfeuerwehr gewinnt die Streuung der Eingreifzeit (zpkt_LA) jetzt an Bedeutung.

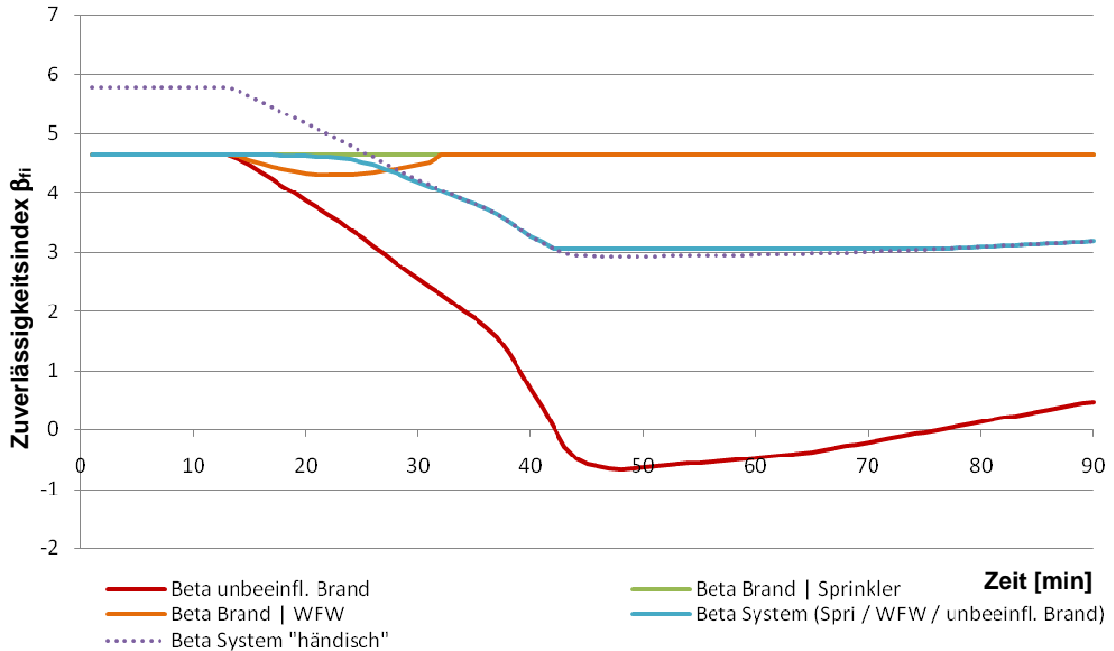


Bild 86 Systemzuverlässigkeit des für R 30 bekleideten Stahlträgers für den durch die Sprinkleranlage und die Werkfeuerwehr beeinflussten Brand im Vergleich zu den Zuverlässigkeiten bei Wirkung der Einzelmaßnahmen

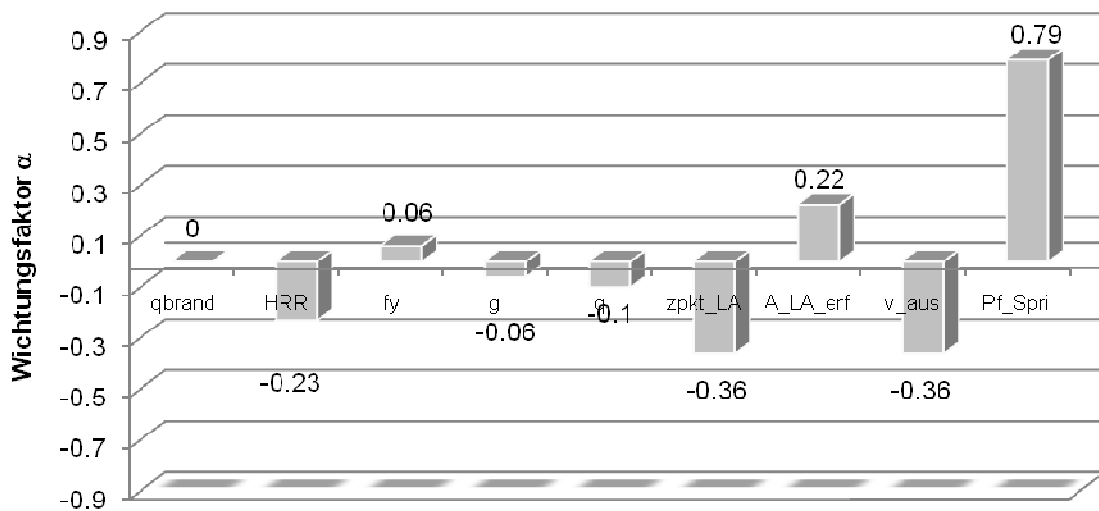


Bild 87: Sensitivitätsfaktoren Alpha für die 42. Minute ($\min \beta_{ist} = 3,0$)

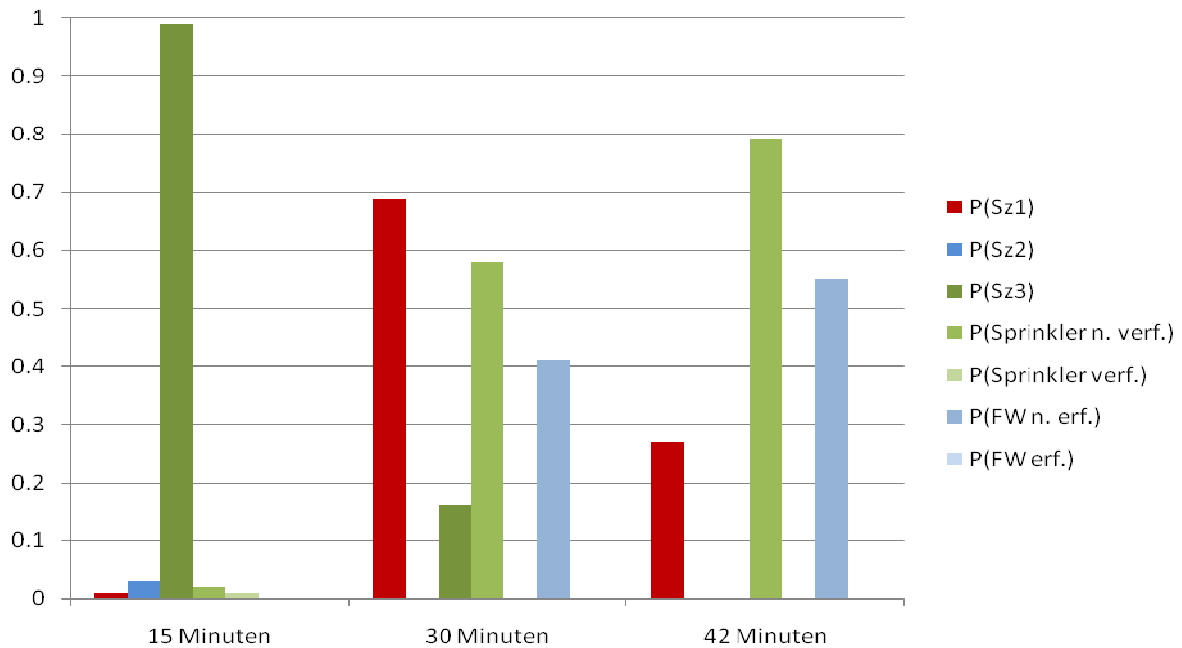


Bild 88: Sensitivitätsfaktoren der Bestandteile des Systems für verschiedene Zeitpunkte

7.8 Schlussfolgerungen aus den Systemzuverlässigkeitsanalysen

Die Ergebnisse der Systemzuverlässigkeitsanalysen sind in Tabelle 29 zusammengefasst. Die Analysen haben gezeigt, dass

- sich die relevanten Brandszenarien mit vereinfachten Ereignisbäumen wie in Bild 60 bis 62 und Wahrscheinlichkeiten für die Funktion bzw. den Ausfall von anlagentechnischen und abwehrenden Maßnahmen identifizieren lassen,
- bei nur einer zusätzlichen Maßnahme in der Regel der unbeeinflusste Brand bei Ausfall der betreffenden Maßnahme (z. B. Sprinkleranlage oder Löscharbeiten der Feuerwehr) maßgebend wird,
- die Wirksamkeit einer Sprinkleranlage mit sehr geringer Ausfallwahrscheinlichkeit ($p_3 = 0,02$) höher einzuschätzen ist als die einer Werkfeuerwehr, die binnen 10 Minuten mit dem Löschangriff beginnt,
- die Einflüsse der Sprinkleranlage und einer Feuerwehr bezüglich der Systemzuverlässigkeit grundsätzlich superponiert werden können, da die Wirksamkeit der Sprinkleranlage vom Brand – und damit auch vom Einfluss der Feuerwehr - näherungsweise unabhängig ist.
- bei gleichzeitiger Beteiligung einer öffentlichen Feuerwehr und einer Werkfeuerwehr nur die Löscharbeit mit der geringeren Ausfallwahrscheinlichkeit für die Systemversagenswahrscheinlichkeit maßgebend wird, also eine Superposition der Wirkung von Werkfeuerwehr und öffentlicher Feuerwehr nicht zulässig ist.

Tabelle 29: Zusammenstellung der Ergebnisse der Systemzuverlässigkeitsanalysen

Maßnahme	$p_{2,\delta}$	$p_{2,W}$	p_3	$\beta_{ist,NB}$	$t_{min \beta}$	max α
R 90 ohne Brandbekämpfung	-	-	-	2,0	115	q_{Brand}, HRR
Feuerwehr						
- Öffentl. Feuerwehr, 20 min	0,83	-	-	2,14	120	$q_{Brand}, HRR, p_{2,\delta}$
- Werkfeuerwehr, 10 min	-	0,11	-	2,85	120	$q_{Brand}, HRR, p_{2,W}$
Sprinkleranlage						
- Nach VdS	-	-	0,02	3,36	120	p_3, q_{Brand}, HRR
- Nach intern. Erfahrungen	-	-	0,1	2,88	120	p_3, q_{Brand}, HRR
Feuerwehr + Sprinkleranlage						
- Öffentl. Feuerwehr, 20 min	0,83	-	0,02	3,6	120	p_3, q_{Brand}, HRR
- Werkfeuerwehr, 10 min	-	0,11	0,02	3,9	120	$p_3, q_{Brand}, HRR, p_{2,W}$
Öffentl. Feuerwehr + Werkfeuerwehr + Sprinkleranlage	0,83	0,11	0,02	3,9	120	$p_3, q_{Brand}, HRR, p_{2,W}$
R 30 ohne Brandbekämpfung	-	-	-	-0,6	42	HRR
R 30 + öff. FW + Sprinkler	0,83	-	0,02	2,4	42	$p_3, HRR, p_{2,\delta}$
R 30 + WerkFW + Sprinkler	-	0,11	0,02	3,0	42	$p_3, p_{2,W}, HRR$

8 Sicherheitsformat

8.1 Bemessungskonzept

In den Zuverlässigkeitsanalysen für die Bauteile konnten die Brandlast und die Wärmefreisetzungsrate als wichtigste Einflussgrößen identifiziert werden. In den Zuverlässigkeitsanalysen für Systeme haben diese Parameter ebenfalls hohe Sensitivitätsfaktoren, daneben haben allerdings die Verfügbarkeiten der abwehrenden und anlagentechnischen Maßnahmen einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 29).

Für die Bemessung der baulichen Brandschutzmaßnahmen wird ein Sicherheitsformat vorgeschlagen, bei dem für die wesentlichen Einflussgrößen der Brandeinwirkung, die Brandlastdichte q_{Brand} und Wärmefreisetzungsrate HRR Bemessungswerte als Produkt aus charakteristischem Wert und Teilsicherheitsbeiwert ermittelt werden. Wenn besondere Maßnahmen für die Brandbekämpfung wie eine automatische Löschanlage oder eine besonders schlagkräftige Werkfeuerwehr berücksichtigt wer-

den sollen, sind deren Ausfallwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen, die aufgrund von statistischen Auswertungen oder Erfahrungswerten angegeben werden.

Der Bemessung nach Eurocode liegt grundsätzlich eine Grenzzustandsgleichung $Z = R - S$ ($R = \text{Resistance/Widerstand}$ und $S = \text{Stress/Einwirkung}$) zugrunde. Die Bemessungswerte werden dabei so gewählt, dass der erforderliche Zuverlässigkeitsindex global aufgespalten wird, so dass der Anteil für die Widerstandsseite $\alpha_R \cdot \beta$ und für die Einwirkungsseite $\alpha_S \cdot \beta$ beträgt. Die sog. globalen Sensitivitätsfaktoren für die Widerstands- und Einwirkungsseite werden mit $\alpha_R = 0,8$ und $\alpha_S = 0,7$ angenommen. Damit wird nachweislich bei den praktisch vorkommenden Streuungsverhältnissen von Widerstand und Einwirkung der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β mit der zulässigen Toleranz von $\Delta\beta = \pm 0,5$ eingehalten.

Bei der Bemessung für den Brandfall als außergewöhnliche Einwirkung entsprechen die Bemessungswerte für die Einflussgrößen der Widerstandsseite den charakteristischen Werten, weil die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,fi}$ einheitlich mit 1,0 vorgegeben wurden. Weiterhin werden für die mechanischen Einwirkungen die reduzierten Bemessungswerte entsprechend der Kombinationsregel für außergewöhnliche Einwirkungen verwendet, die ebenfalls nicht zur Disposition stehen.

Damit sind auf der Einwirkungsseite lediglich noch die Bemessungswerte für die maßgebenden Einflussgrößen der Brandeinwirkung, die Brandlastdichte q_{Brand} und die Wärmefreisetzungsrate HRR über geeignete charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte zu definieren. Die anteilige Zuverlässigkeit für diese Einflussgrößen wird aus dem Zuverlässigkeitsindex für den Brandfall β_{fi} , dem o. g. globalen Sensitivitätsfaktor $\alpha_S = 0,7$ sowie dem in Abschnitt 6.5 ermittelten ungünstigsten Sensitivitätsfaktor $\alpha_{q, \text{Brand}}$ für die Brandlastdichte bzw. α_{HRR} für die Wärmefreisetzungsrate ermittelt und ergibt sich zu

$$\alpha_{q, \text{Brand}} \cdot \alpha_S \cdot \beta = 0.6 \text{ für die Brandlastdichte } q_{\text{Brand}} \text{ bzw.}$$

$$\alpha_{\text{HRR}} \cdot \alpha_S \cdot \beta = 0.4 \text{ für die Wärmefreisetzungsrate HRR.}$$

In Anlehnung an das Sicherheitskonzept zur DIN 18230-1 [11] werden die charakteristischen Werte für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrate jeweils als 90 %-Quantil definiert.

Da es sich bei der Brandlastdichte q_{Brand} ebenso wie bei der Wärmefreisetzungsrate HRR im Sinne des Eurocodes um stärker streuende veränderliche Einwirkungen handelt, die sich im Laufe der Nutzungsdauer eines Gebäudes mehrfach ändern, wurde in [4, 5] als Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Gumbel-Verteilung zu Grunde gelegt. Für die Brandlastdichte wurde vereinfachend für alle Nutzungen derselbe Variationskoeffizient $V = 0,3$ angenommen, für die Wärmefreisetzungsrate wurde bei sonst gleichen Annahmen $V = 0,2$ angesetzt.

Mit diesen Annahmen können die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} mit Gleichung (10) berechnet werden.

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot \left[0,5772 + \ln \left(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi})) \right) \right]}{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot \left[0,5772 + \ln(-\ln(0,9)) \right]} \quad (10)$$

Dabei ist $\Phi(\)$ die Funktion der Standard-Normalverteilung.

Wird die Brandlastdichte für ein bestimmtes Gebäude mit definierter Nutzung im Einzelfall genauer erfasst, so wie dies im Industriebau nach DIN 18230-1 geschieht, dann kann anstelle der Extremwertverteilung (für variierende Nutzung) eine Normalverteilung mit einem geringeren Variationskoeffizienten $V = 0.2$ zu Grunde gelegt werden. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} für die individuell erfasste Brandlastdichte ergibt sich dann aus Gleichung (11):

$$\gamma_{fi,q} = \frac{1 + \alpha \cdot \beta_{fi} \cdot V}{1 + 1,28 \cdot V} \quad (11)$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte nach Gl. (10) und Gl. (11) sind in Bild 89 grafisch aufgetragen. Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{fi} kann in Abhängigkeit von der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall $p_{f,fi}$ nach Gl. (5) aus der angefügten Tabelle entnommen werden.

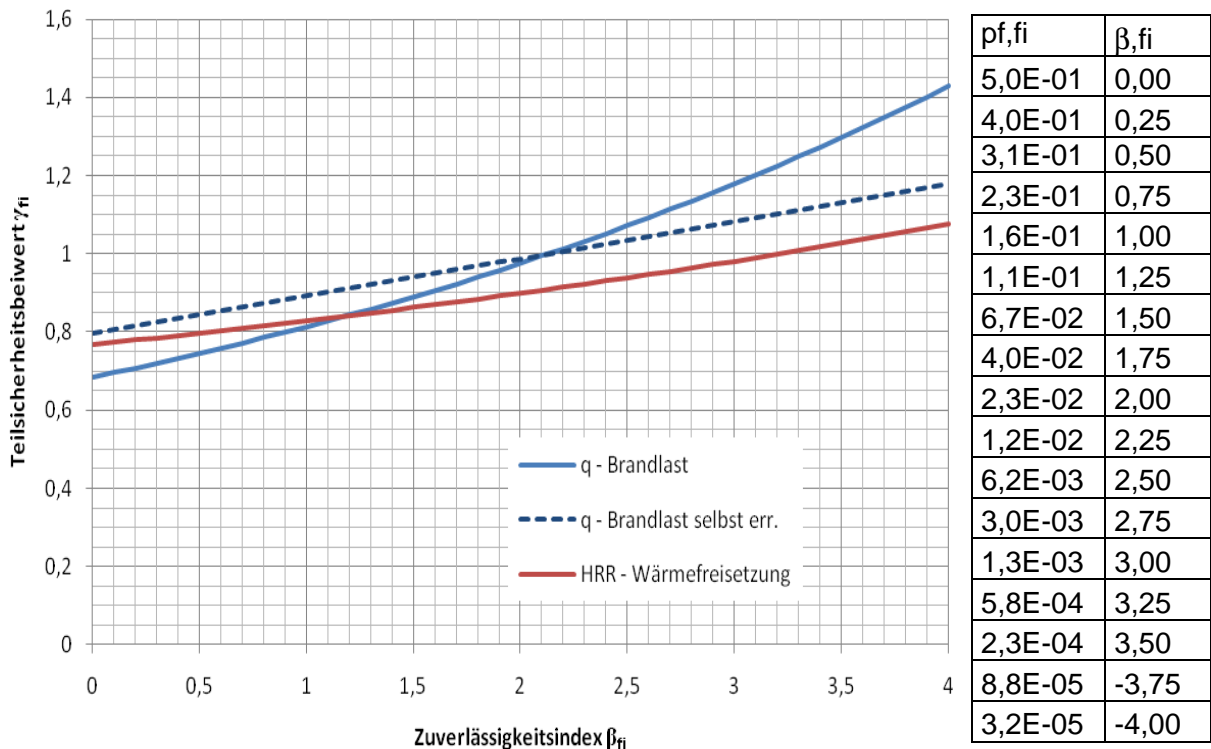


Bild 89: Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandeinwirkung in Abhängigkeit von der erforderlichen Zuverlässigkeit

8.2 Erprobung und Validierung

8.2.1 Bemessung von Einzelbauteilen für natürliche Brandeinwirkung ohne besondere Brandbekämpfungsmaßnahmen

Einige exemplarisch ausgewählte Bauteile für die in Abschnitt 5 untersuchten Wohn-/Bürogebäude und Verkaufsstätten werden zunächst unter Verwendung der in Abschnitt 8.1 vorgeschlagenen charakteristischen Werte und Teilsicherheitsbeiwerte für die maßgebenden Einflussgrößen der natürlichen Brandeinwirkung bemessen. Dabei werden alle Abmessungen und Randbedingungen entsprechen den Vorgaben in Abschnitt 5 beibehalten.

Aufgrund der Bemessungsergebnisse wird dann bei den Betonbauteilen (nur Balken) die theoretische Belastung und bei den Stahlbauteilen (Balken und Stützen) die theoretische Bekleidungsstärke ermittelt, mit der gerade der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht würde. Dafür wird der vorhandene Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ berechnet und mit dem erforderlichen Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,erf}$ verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

Tabelle 30 Ergebnisse der Rückrechnungen mit angepassten Beiwerten

Nutzung	Baustoff	Bauteil	$\beta_{fi,erf}$	$\gamma_{q,brand}$	γ_{HHR}	$\beta_{fi,ist}$	Differenz	$\Delta\beta \leq 0,5$
Wohnen	Beton	Balken	1,87	0,95	0,89	1,97	0,1	ja
Wohnen	Beton	Balken	0,5	0,74	0,8	1,66	1,16*	nein*
Wohnen	Stahl	Balken	1,87	0,95	0,89	1,57	-0,3	ja
Wohnen	Stahl	Balken	0,5	0,74	0,8	0,59	0,09	ja
Wohnen	Stahl	Stütze	1,87	0,95	0,89	1,74	-0,13	ja
Wohnen	Stahl	Stütze	0,5	0,74	0,8	0,8	0,3	ja
Verkauf	Beton	Balken	2,55	1,08	0,94	2,05	-0,5	ja
Verkauf	Beton	Balken	1,6	0,91	0,8	1,74	0,14	ja
Verkauf	Stahl	Balken	2,55	1,08	0,94	2,63	0,08	ja
Verkauf	Stahl	Balken	1,6	0,91	0,8	1,723	0,12	ja
Verkauf	Stahl	Stütze	2,55	1,08	0,94	2,2	-0,35	ja
Verkauf	Stahl	Stütze	1,6	0,91	0,87	1,47	-0,13	ja

*) Bei dem geringen Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,erf} = 0,5$ ergeben sich kleine Teilsicherheitsbeiwerte γ_i und somit nur geringe Brandeinwirkungen. Deshalb wird die Bemessung für Normaltemperatur maßgebend und die Abweichung $\Delta\beta > 0,5$ im Brandfall ist nicht relevant.

Aus der Tabelle 30 ist erkennbar, dass bei Bemessung mit den Vorgaben in Abschnitt 8.1 der erforderliche Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,erf}$ bei allen betrachteten Bauteilen mit der zulässigen Toleranz $\Delta\beta = \pm 0,5$ eingehalten wird. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt $\Delta\beta_m = -0,06$; damit wird das angestrebte Zuverlässigkeitsniveau im Mittel über die untersuchten Bauteile erreicht..

8.2.2 Bemessung von Einzelbauteilen für natürliche Brandeinwirkung mit besonderen Brandbekämpfungsmaßnahmen

Grundlage für die Überprüfung des Sicherheitskonzeptes bei vorhandener automatischer Löschanlage oder besonders schlagkräftiger Feuerwehr (Werkfeuerwehr) sind die Angaben in Abschnitt 7 dieses Abschlussberichts. Wegen des großen Aufwandes der probabilistischen Systemzuverlässigkeitsanalysen werden die Untersuchungen – wie bereits in Abschnitt 7 - exemplarisch auf das mehrgeschossige Wohn- und Bürogebäude in Stahlskelettbauweise beschränkt und es wird nur der bekleidete Deckenträger stellvertretend für das Tragsystem untersucht.

Das für die Bemessung maßgebliche Brandszenario lässt sich aufgrund des größten Beitrages zum Risiko identifizieren. Die Risikobeiträge ergeben sich bei vollprobabilistischer Nachweisführung für jeden Ast des Ereignisbaums (Bild 60 bis 61) als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bauteilschadens und dem Schadensumfang. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Bauteilschadens entspricht dem Produkt aus der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes, den Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. Erfolgswahrscheinlichkeiten der Brandschutzmaßnahmen entlang des betreffenden Ereignispfades und der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils unter der für das Brandszenario ermittelten Brandeinwirkung.

Die probabilistischen Analysen in Abschnitt 7 haben gezeigt, dass in Bezug auf das Bauteilversagen in der Regel der nicht durch Löschmaßnahmen beeinflusste fortentwickelte Brand maßgebend wird, sofern der durch die Löschanlage oder die Feuerwehr gelöschte oder kontrollierte Brand die Standsicherheit des Stahlträgers nicht gefährdet. Im vorliegenden Fall wird angenommen, dass kein Bauteilschaden eintritt, wenn die Brandraumtemperatur im jeweiligen Szenario unterhalb von 300 °C bleibt; dann leistet das Szenario keinen nennenswerten Risikobeitrag. Treten dagegen mehr als 300°C auf, können die einzelnen Brandverläufe nicht mehr als voneinander unabhängig angesehen werden, was Auswirkungen auf die Systemzuverlässigkeit hat. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten voneinander abhängiger Maßnahmen wie die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr und durch eine Werkfeuerwehr dürfen dann bei der Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Bauteilschadens nicht mehr mit einander multipliziert werden.

Zur Überprüfung des Sicherheitskonzeptes wird analog zu Abschnitt 8.1 zunächst eine deterministische Bemessung für den Stahlträger unter Annahme voller Lastausnutzung bei Normaltemperatur ($E_d/R_d = 1.0$) durchgeführt. Bei der Bestimmung der erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte wird nach Gl. (1) die mit der Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung (p_2 bzw. p_3) reduzierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines fortentwickelten Brandes zu Grunde gelegt. Der Träger mit der durch die Bemessung ermittelten (theoretischen) Bekleidungsstärke wird anschließend probabilistisch nachgewiesen, um den vorhandenen (System-)Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ zu bestimmen.

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,erf}$ wird in diesem Fall nach Abschnitt 2.3, Gln. (1) bis (5) auf der Grundlage einer Brandentstehung in einer Nutzungseinheit von 200 m² Grundfläche mit Wohn- oder Büronutzung vorgegeben.

Folgende Szenarien werden untersucht:

- Öffentliche Feuerwehr vorhanden (Eingreifzeit $t_{LA} = 20$ min),
- Öffentliche Feuerwehr und Löschanlage ($p_3 = 0,1$) vorhanden,

Öffentliche Feuerwehr und Werkfeuerwehr (Eingreifzeit $t_{LA} = 10$ min) und Löschanlage vorhanden.

Die Ergebnisse der Systemzuverlässigkeitsanalysen sind in Tabelle 31 zusammengestellt. Die mittlere Abweichung des ermittelten Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi,ist}$ von der Sollzuverlässigkeit $\beta_{fi,erf}$ beträgt $\Delta\beta_m = -0,12$.

Tabelle 31 Ergebnisse der Systemrückrechnungen für den Stahlträger

System	p_2	p_3	$\beta_{fi,erf}$	$\beta_{ist,ist}$	$\Delta\beta$
Bauteil + öffentl. Feuerwehr	0,5	-	1,87	1,57	-0,30
Bauteil + öffentl. Feuerwehr + Löschanlage	0,5	0,1	0,50	0,59	+0,09
Bauteil + öffentl. Feuerwehr + Werkfeuerwehr + Löschanlage	0,05	0,1	0,00 (-0,49)*	-0,15	-0,15* (+0,34)

*) Da sich eine negative Zielzuverlässigkeit ergibt, werden die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} auf Basis eines Mindestwertes des Zuverlässigkeitsindex $\min \beta_{fi,erf} = 0$ berechnet. Der theoretisch erforderliche Zuverlässigkeitsindex ist in Klammern angegeben.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsvorhaben wurde ein übergreifendes Sicherheitskonzept für Nachweise des vorbeugenden baulichen Brandschutzes nach den Methoden der Eurocodes unter Berücksichtigung von Naturbrandbeanspruchungen erarbeitet. Das Sicherheitskonzept soll für unterschiedliche Bauweisen, unterschiedliche Gebäude- und Nutzungsarten, verschiedene Definitionen der Brandeinwirkungen und verschiedene Nachweisarten gleichermaßen anwendbar sein.

Für diese Nachweise sind Bemessungswerte bzw. charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte für Eingangsgrößen, die stärker streuen und maßgeblichen Einfluss haben, so festzulegen, dass die vorgegebenen Leistungskriterien mit der erforderlichen Zuverlässigkeit eingehalten werden. Als Maß für die Zuverlässigkeit dient der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} für die außergewöhnliche Situation Brand. Die erforderliche Zuverlässigkeit richtet sich einerseits nach dem Schadenspotenzial bei Nich-

teinhaltung der Leistungskriterien und andererseits nach der Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem fortentwickelten Brand im betrachteten Gebäude oder Gebäudeabschnitt).

Die Vorgehensweise wurde auf die brandschutztechnische Bemessung von ausgewählten Beton-, Stahl- und Holzbauteilen für Gebäude unterschiedlicher Nutzung – Wohn-/Bürogebäude, Verkaufs-/Versammlungsstätten, und Industriegebäude – angewendet. Dabei wurden die Bauteile nach dem tabellarischen Verfahren des Eurocodes 2-1-2 bzw. den vereinfachten Verfahren des Eurocodes 3-1-2 und des Eurocodes 5-1-2 bemessen. Das Trag- und Verformungsverhalten wurde je nach Bauteil mit dem vereinfachten Nachweisverfahren für Stahl- und Holzbauteile oder mit dem allgemeinen Rechenverfahren für die Stahlbeton- und Stahlstützen nachgewiesen.

Die Zuverlässigkeit unter Brandbeanspruchung wurde im Zeitschrittverfahren entweder mit der FORM/SORM-Methode oder bei den mit dem allgemeinen Rechenverfahren berechneten Bauteilen mit einem optimierten Monte-Carlo-Simulationsverfahren ermittelt und mit der Zuverlässigkeit bei Normbrandbeanspruchung verglichen.

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex wurde nach den grundsätzlichen Festlegungen für alle Eurocodes bestimmt, wobei für die Nutzungen Wohn-/Bürogebäude sowie Verkaufs-/Versammlungsstätte von mittleren Schadensfolgen und bei Industriegebäuden wegen des geringeren Personenrisikos von geringeren Schadensfolgen ausgegangen wurde. Die statistischen Daten zur Brandhäufigkeit und zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit sowie zu den Brandlastdichten in den betreffenden Nutzungen wurden der internationalen Literatur entnommen, da solche Zahlen in Deutschland bisher nicht systematisch erfasst werden.

Insgesamt haben die Zuverlässigkeitsnachweise der nach heutigen Vorgaben für Normbrandbeanspruchung bemessenen Einzelbauteile bei Berücksichtigung einer realistischen Naturbrandbeanspruchung mit streuenden Einflussgrößen durchweg die theoretisch erforderlichen Zuverlässigkeiten ergeben. Es ist daher davon auszugehen, dass sich das brandschutztechnische Sicherheitsniveau bei Bauteilauslegungen für Naturbrandbeanspruchung im Vergleich zur heutigen Auslegung nach Feuerwiderstandsklassen nicht nennenswert verschieben wird, wenn die Bemessungswerte der streuenden Einflussgrößen entsprechend der erforderlichen Zuverlässigkeit und den ermittelten Sensitivitäten festgelegt werden.

Als Sicherheitsformat wird vorgeschlagen, die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsratesrate grundsätzlich mit charakteristischen Werten vorzugeben, die einem 90 %-Quantil der jeweiligen statistischen Verteilung entsprechen. Für die mechanischen Einwirkungen sind die Kombinationswerte für außergewöhnliche Situationen gemäß DIN EN 1900 bzw. DIN 1055-100 und für die thermischen und thermo-mechanischen Materialkennwerte die charakteristischen Werte entsprechend den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 6 und 9 anzusetzen.

Zusätzlich sind Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} für die Brandlastdichte q_{Brand} und die Wärmefreisetzungsrate HRR zu berücksichtigen, die von der Gebäudenutzung und der Größe der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit abhängen. Über das erforderliche Sicherheitsniveau und die Differenzierung nach den unterschiedlichen Nutzungsarten der Gebäude muss abschließend in den Gremien der ARGEBAU entschieden werden. Dabei ist im Hinblick auf die derzeit noch nicht ausreichend abgesicherte brandstatistische Datenbasis und die Anwenderfreundlichkeit und Prüffähigkeit der Nachweise von einer allzu feinen Differenzierung – wie derzeit im Anhang E der DIN EN 1991-1-2 vorgesehen – abzuraten.

Das Zusammenwirken von baulichen, anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen wurde mit Hilfe von Systemzuverlässigkeitsanalysen untersucht. Dazu wurde exemplarisch für ein mehrgeschossiges Bürogebäude in Stahlskelettbauweise die Zuverlässigkeit der Stahlbauteile für unterschiedliche Brandszenarien ohne und mit Brandbekämpfungsmaßnahmen durch öffentliche Feuerwehr, Werkfeuerwehr oder Sprinkleranlage berechnet und verglichen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sprinklerung eine Reduktion der Feuerwiderstandsklasse um mehr als eine Stufe rechtfertigt, sofern die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage im Brandfall entsprechend den Erfahrungen der deutschen Sachversicherer auf 2 % begrenzt ist.

Wenn anstelle der Sprinkleranlage eine besonders schlagkräftige (Werk-)Feuerwehr vorhanden ist, hängt der Gewinn an Zuverlässigkeit maßgeblich von der Eingreifzeit ab. Beträgt die Eingreifzeit auf Grund von automatischer Brandmeldung und kurzer Anfahrt nur ca. 10 Minuten, werden ähnlich gute Ergebnisse wie bei Sprinklerung erzielt.

Die Einflüsse einer Sprinkleranlage und einer schlagkräftigen Feuerwehr dürfen bezüglich der Systemzuverlässigkeit grundsätzlich superponiert werden, da die Wirksamkeit der Sprinkleranlage vom Brand – und damit auch vom Einfluss der Feuerwehr - näherungsweise unabhängig ist. Bei gleichzeitiger Beteiligung einer öffentlichen Feuerwehr und einer Werkfeuerwehr wird dagegen nur die Löschmaßnahme mit der geringeren Ausfallwahrscheinlichkeit für die Systemversagenswahrscheinlichkeit maßgebend, d. h. eine Superposition der Wirkung von Werkfeuerwehr und öffentlicher Feuerwehr ist nicht zulässig.

10 Literaturhinweise

- [1] Hosser, D. und vfdb (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 1. Auflage Mai 2006. Altenberge, Braunschweig: vfdb, 2006
- [2] EN 1990: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung. April 2002
- [3] EN 1991-1-1: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. April 2002
- [4] DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke; Teil1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke; September 2003
- [5] Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concept, Final Report, RPS Report n°32, CEC-Agreement 7210-SA/125,126,213, 214,323,423, 522, 623,839,937, Profil Arbed, Centre de Recherches, März 1999
- [6] Rahikainen, J.; Keski-Rahkonen, O.; Statistical Determination of Ignition Frequency of Structural Fires in Different Premises in Finland; Fire Technology 40; S. 335-353; 2004
- [7] Tillander, K.; Keski-Rahkonen, O.; The Ignition Frequency of Structural Fires in Finland 1996-99; Fire Safety Science – Proceedings of the seventh international symposium; 2003; ISBN 0-9545348-0-8; S. 1051-1062
- [8] Baldwin, R.: A statistical approach to the spread of fire in buildings. Fire Research Note 900, November 1970
- [9] BSI, PD 7974-1:2003: Application of fire engineering principles to the design of buildings; Part 1: Initiation and development of fire within the enclosure of origin
- [10] Implementation of Eurocodes, Handbook 5: Design of buildings for the fire situation. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/BF/PP-134007, Luxembourg, 10/2005
- [11] Bub, H.; Hosser, D.; Kersken-Bradley, M.; Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz, 1. Auflage. Berlin: E. Schmidt, 1983
- [12] Joint Committee on Structural Safety (JCSS): Probabilistic Model Code, 12th draft, 2002. <http://www.jcss.ethz.ch>
- [13] Jones, W. W.; Peacock, R. D.; Forney, G. P.; Reneke, P. A.; CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), Technical Reference Guide; NIST Special Publication 1026; Dezember 2005
- [14] Zehfuß, J.; Hosser, D.: A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings, Fire Safety Journal 42 (2007) 115-126
- [15] Klinzmann, C.: Methodik zur computergestützten, probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring, Dissertation, TU-Braunschweig, Braunschweig, 2008

- [16] DIN 18230-1: 1998-03: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe März 1998
- [17] Quast, U.; Hass, R.; Rudolph, K.: STABA-F – Berechnung des Trag- und Verformungs-verhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1984
- [18] Becker, J.; Bizri, H.; Bresler, B.: FIRES-T, A computer Program for the fire response of structures – thermal. Report No. UCB FRG 74-1, Fire Research Group, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1974
- [19] Hosser, D.; Kampmeier, B.; Zehfuß, J.: Überprüfung der Anwendbarkeit von alternativen Ansätzen nach Eurocode 1 Teil1-2 zur Festlegung von Brandschutzanforderungen bei Gebäuden, Abschlussbericht im Auftrag des DIBt, Berlin, Aktz. ZP 52-5-3.83-1041/03 Dezember 2004
- [20] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Ausgabe Oktober 2006
- [21] DIN EN 1993-1-2: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Ausgabe
- [22] DIN EN 1995-1-2: Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall, Ausgabe Oktober 2006
- [23] Reliability Consulting Programs (RCP) 2004. STRUREL, a Structural Reliability Analysis Program-System, COMREL & SYSREL: Users Manual. Munich: RCP Consult
- [24] Wagner, P.: Brandstatistik – was sie leistet und leisten könnte. In: vfdb-Jahresfachtagung 2008 am 22.-24. April 2008 in Bochum, Tagungsband, 2008
- [25] Holborn, P. G.; Nolan, P. F.; Golt, J.: An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations. Fire Safety Journal 39 (2004), 481-524

Anhang A Modell zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen

Dem Modell liegt eine einfache Grenzzustandsgleichung zugrunde, in der die mit der Branddauer größer werdende Brandfläche A_f einer maximal beherrschbaren Brandfläche $A_{f,grenz}$ gegenüber gestellt wird (Gleichung A.1).

$$Z = A_{f,grenz} - A_f = A_{f,grenz} - \pi * (v_{aus} * t_{LA}) \quad (A.1)$$

Zur Ermittlung der sich einstellenden Brandfläche A_f wird der in [14] zugrunde gelegte, international akzeptierte Ansatz zur Brandentwicklung ($\alpha \cdot t^2$ Ansatz, [4]) umgeformt, indem dem Kennwert für die Brandentwicklung α ein Zahlenwert für die Brandentwicklungsgeschwindigkeit v_{aus} zugeordnet wird. In den Beispielrechnungen dieses Berichts wurde die Brandentwicklungsgeschwindigkeit zu $v_{aus} = 0,4$ m/min ($\equiv v_{aus}$) angenommen.

Belastbare Angaben über die von der Feuerwehr beherrschbaren Brandflächen sind in der Literatur nicht zu finden. Bild A1 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeiten für Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von der Eingreifzeit der Feuerwehr für 3 verschiedene kritische Brandflächen $A_{f,grenz}$ (100 m^2 , 200 m^2 und 400 m^2). Durch die Vorgabe der kritischen Brandfläche können unterschiedlich leistungsfähige Feuerwehren, beispielsweise bedingt durch eine größere Anzahl verfügbarer Staffeln, berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Kapitel 7, bei denen unterschiedliche Standardabweichungen für die verschiedenen Feuerwehren berücksichtigt wurden, liegt diesen Ergebnissen eine feste Standardabweichung von $\sigma = 5$ Minuten der Eingreifzeit t_{LA} zugrunde.

Tabelle A1 Stochastisches Modell der Eingangsgrößen

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Quelle
Brandausbreitungsgeschwindigkeit	v_{aus}	m/min	Gauß-Normal	0,4	0,06	15 %	gewählt
Kritische Brandfläche	$A_{f,grenz}$	m^2	Gauß-Normal	400/ 200/ 100	60 / 30 / 15	15 %	gewählt
Eingreifzeitpunkt	t_{La}	min	Gauß-Normal	10..30	5	17 % - 50 %	gewählt

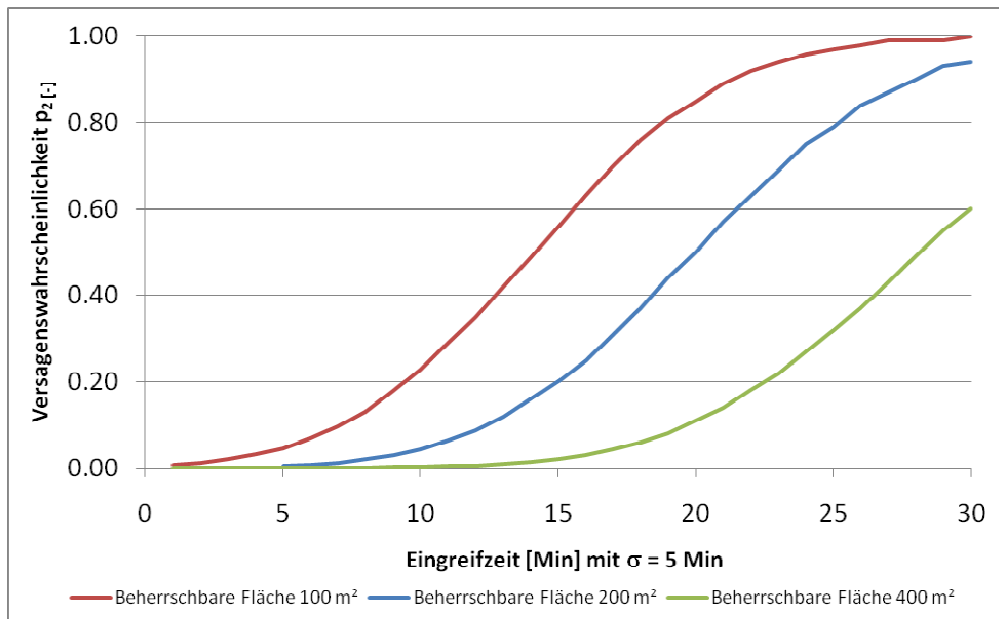


Bild A1 Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von Eingreifzeit und beherrschbarer Brandfläche

Die im Sicherheitskonzept enthaltenen Werte für p_2 wurden auf Grundlage des hier beschriebenen Modells mit den angegebenen Eingreifzeiten ermittelt. Für die kritische Brandfläche wurde der mittlere Wert aus Tabelle A1 ($A_{f, \text{grenz}} = 200 \text{ m}^2$) zugrundegelegt.