

# Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung

## 1 Einleitung

Die meisten Normenwerke im Bauingenieurwesen beruhen auf semi-probabilistischen Sicherheitskonzepten. Dabei werden Bemessungswerte für Einwirkungen und Widerstände mit Hilfe von charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten, die aus probabilistischen Untersuchungen abgeleitet wurden, so definiert, dass ein gewünschtes Sicherheitsniveau der Bemessung innerhalb vorgegebener Toleranzen eingehalten wird.

Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz in Braunschweig wurde in den letzten Jahren ein neues Sicherheitskonzept für den Brandfall entwickelt (vgl. [2] bis [5]). Es basiert auf den vereinfachten Verfahren des Eurocodes unter Ansatz von Naturbrandszenarien. Es wurde in den deutschen, nationalen Anhang des Eurocodes 1 Teil 1-2 [1] aufgenommen. Hier ist es gelungen, ein angemessenes und für die Gesellschaft akzeptables Sicherheitskonzept zu etablieren, das eine Brücke zwischen den bestehenden bauaufsichtlichen Regelungen und den ingenieurmäßigen Bemessungsmethoden der Eurocodes bildet. Nur so können brandschutztechnische Nachweismethoden, die Naturbrandszenarien berücksichtigen, Eingang in das normale Genehmigungsverfahren finden. Für eine genauere Betrachtung, hat bauforumstahl e.V. ein Forschungsvorhaben initiiert, bei dem eine Versammlungsstätte, ein Parkhaus und ein Bürogebäude probabilistisch und deterministisch untersucht wurden. Im Zuge dieses Beitrages wird das Parkhaus näher betrachtet. Weitere Informationen sind [11] oder [12] zu entnehmen.

## 2 Methoden

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus einer probabilistischen Berechnungen vorgestellt. Die probabilistischen Berechnungen für die Zuverlässigkeitsanalyse wurden unter Berücksichtigung der streuenden Einflussgrößen mit Hilfe des Antwortflächenverfahrens durchgeführt.

### Zuverlässigkeitsanalyse

Um die praktische Anwendbarkeit des Sicherheitskonzeptes zu überprüfen, wurde in dem Forschungsvorhaben die Zuverlässigkeit der Bauteile ermittelt, die nach dem Sicherheitskonzept und den vereinfachten und allgemeinen Berechnungsverfahren der Eurocodes bemessen wurden. Da die Lösung in diesem Fall mit der Finite

Elemente Methode (FEM) erfolgte, wurde sich im Rahmen dieses Forschungsprojektes der sogenannten Antwortflächenmethode (oder auch Antwortflächenverfahren, engl. response surface method, RSM [10]) bedient.

### **Ermittlung der Tragfähigkeit**

Für die Berechnung der Tragfähigkeit von Bauteilen im Brandfall wurde das FEM-Programm BoFIRE genutzt, das zu den allgemeinen Berechnungsverfahren gemäß EC 4-1-2 [6] zählt. Das Programm enthält Algorithmen zur Berechnung der zeitabhängigen Temperaturfelder in den Bauteilquerschnitten (thermisches Problem). Parallel dazu werden in einer Traglastberechnung (mechanisches Problem) die Verformungen, Schnittgrößen und Steifigkeiten unter Berücksichtigung der temperatur- und dehnungsabhängigen Werkstoffeigenschaften ermittelt. Die Berechnung endet, wenn die Tragfähigkeit des Bauteils z. B. durch Instabilität, Gleichgewichtsverlust oder Überschreitung der Materialbruchdehnung erreicht ist.

### **Berechnung der Gastemperatur**

Zur Berechnung lokaler Brände wurde der Plume-Ansatz aus dem Eurocode 1-1-2 [8] verwendet. Dieses Modell ist für lokale und gut ventilierte Brände geeignet. Weitere Informationen sind [8] zu entnehmen.

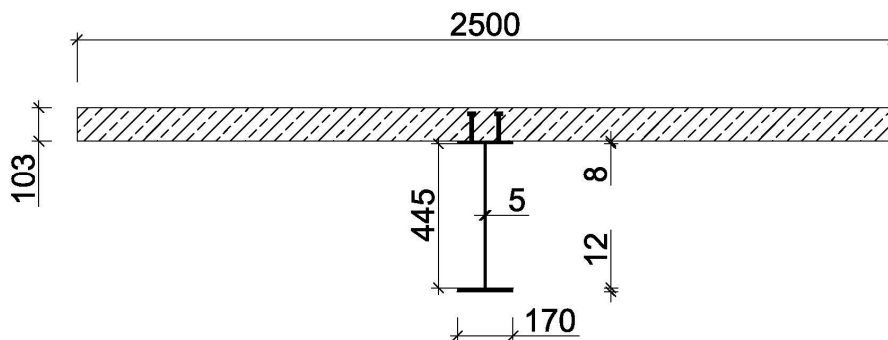
## **3 Berechnungen zum Parkhaus und Ergebnisse**

Das untersuchte Parkhaus ist vom Typ GoBaCar und wurde in Bielefeld errichtet (siehe Abb. 3-1). Durch die offene, oberirdische Bauweise wird für den Brandfall in der Mustergaragenverordnung [9] lediglich die Anforderung „nicht brennbar“ an die tragenden Bauteile gestellt.



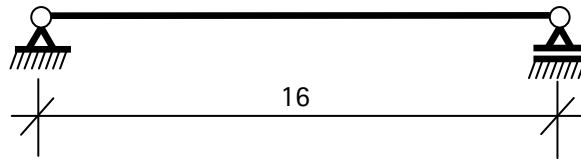
**Abb. 3-1: GoBaCar Parkhaus in Bielefeld (© Goldbeck)**

Das Parkhaus wurde in der Split-Level-Bauweise errichtet, wobei Stahlstützen und Verbundträger als tragende Bauteile genutzt werden. In dem Forschungsprojekt werden die Verbundträger genauer betrachtet. Sie bestehen aus einem geschweißten I-Profil, das mittels zwei Kopfbolzendübelreihen mit der Betondecke verbunden ist (siehe Abb. 3-2).

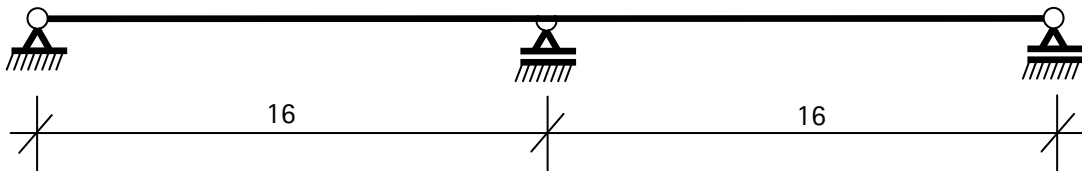


**Abb. 3-2: Verbundträgerquerschnitt Parkhaus (Einheit: mm)**

Als mechanische Einwirkungen werden die charakteristischen Lasten aus der Statik des Parkhauses genutzt. Die veränderlichen Lasten werden in ungünstigster Laststellung angeordnet. Das statische System des Trägers kann vereinfachend als Einfeldträger angenommen werden. Der Einfeldträger wird in einer deterministischen Analyse genutzt. Alternativ wird auch ein Systemwechsel von einem Einfeldträger bei Raumtemperatur zu einem zweifeldrigen Durchlaufträger im Brandfall betrachtet (siehe Abb. 3-3).



a) Einfeldträger im Brandfall und bei Raumtemperatur



b) Durchlaufträger im Brandfall

**Abb. 3-3: Statische Systeme Parkhaus (Einheit: m)**

Hierfür wird der Stützbereich mit Bewehrung ergänzt. Die charakteristischen Werte der Materialfestigkeiten werden aus der Statik übernommen:

- Beton: C 40/50
- Baustahl: S355
- Bewehrungsstahl: BSt 500

Im Hinblick auf die statistischen Daten zur Brandentstehung wird angenommen, dass weder Löschanlage noch Brandmeldeanlage im Parkhaus vorhanden sind. Ferner wird angenommen, dass Personen im Parkhaus nur vorübergehend anwesend sind und daher keinen Beitrag zur Brandbekämpfung leisten.

Bei der Bemessung des Parkhausträgers wird der Brand über die gesamte Feldlänge angesetzt und die Lasten so verteilt, dass maximale Schnittgrößen entstehen. Dieses Vorgehen ist als konservativ zu betrachten.

Die Verbundmittel werden nicht näher betrachtet. Ferner werden bei dem zweifeldrigen Durchlaufträger Stabilitätsphänomene im Stützbereich nicht betrachtet.

Das Brandszenario wird konservativ gewählt:

1. Alle PKW brennen gleichzeitig.

2. Durch Addition der maximalen Wärmefreisetzungsrates und Brandlast jedes PKW ergibt sich die gesamte maximale Wärmefreisetzungsrates und Brandlast.

### **Stochastisches Modell**

Die stochastische Modellierung für das GobaCar Parkhaus erfolgt auf Basis des Antwortflächenverfahrens. Hierbei wurde die sogenannte statische Versuchsplanung genutzt. Dazu wurden die sechs wichtigsten streuenden Einflussgrößen für die Zuverlässigkeitsberechnung im Brandfall erfasst:

- Ständige Lasten
- Veränderliche Lasten
- Stahlfestigkeit
- Betonfestigkeit
- Brandlast
- Maximale Wärmefreisetzungsrates

Die einwirkenden Lasten wurden aus der statischen Berechnung des Gebäudes entnommen.

Für die Stahl- bzw. Betonfestigkeiten wurden die zugehörigen stochastischen Modelle auf Basis der Eurocodes bzw. auf Basis des Probabilistic Model Codes (JCSS) abgeleitet.

Für das Brandszenario mussten weitergehende Annahmen getroffen werden, da die im nationalen Anhang angegebenen Brandlasten und Wärmefreisetzungsrates einerseits nicht explizit für Parkhäuser angegeben sind und andererseits die Werte, die am ehesten als zutreffend eingestuft werden können (Verkehrsanlagen öffentlicher Bereich), zu geringe Brandlasten vorsehen. Zusätzlich kann in einem offenen Parkhaus nicht von einem Vollbrandszenario ausgegangen werden, wie es dem Sicherheitskonzept zugrunde liegt.

Daher wurde statt des im Sicherheitskonzept beschriebenen pauschalen Ansatzes ein realistisches Bemessungsbrandszenario auf Basis von Literaturangaben angenommen. Um die Anwendbarkeit des Sicherheitskonzeptes bzw. der Teilsicherheitsbewerte zu gewährleisten, wurden lediglich Brandlasten und Wärmefreisetzungsrates konservativ aus der Literatur entnommen und für den  $t^2$ -Ansatz genutzt. Es wurde angenommen, dass drei PKW gleichzeitig im Vollbrand

unter dem zu bemessenden Bauteil stehen. Sind mehrere PKW in einen Brand verwickelt, so werden diese in Realität zeitlich und auch räumlich versetzt brennen. Der angenommene gleichzeitige, vollentwickelte Brand von drei Fahrzeugen kann daher als konservativ und umhüllend bezeichnet werden. In Tab. 3-1 ist das stochastische Modell für Brandlasten und Wärmefreisetzungsraten pro PKW angegeben. Für den Bemessungsbrand mit drei PKW wurden die Werte verdreifacht. Als Projektionsfläche des Brandes wurden drei PKW-Grundflächen gewählt, was ca. 27m<sup>2</sup> entspricht (3·4,5 m·2 m).

**Tab. 3-1: Stochastische Modelle für das Brandszenario**

	Mittelwert	Std. Abw.	Var. Koeff.	Einheit	Verteilung
<b>Brandlast pro PKW</b>	5500	550	0,1	MJ/PKW	Normal
<b>Max. HRR pro PKW</b>	5	0,5	0,1	MW/PKW	Lognormal

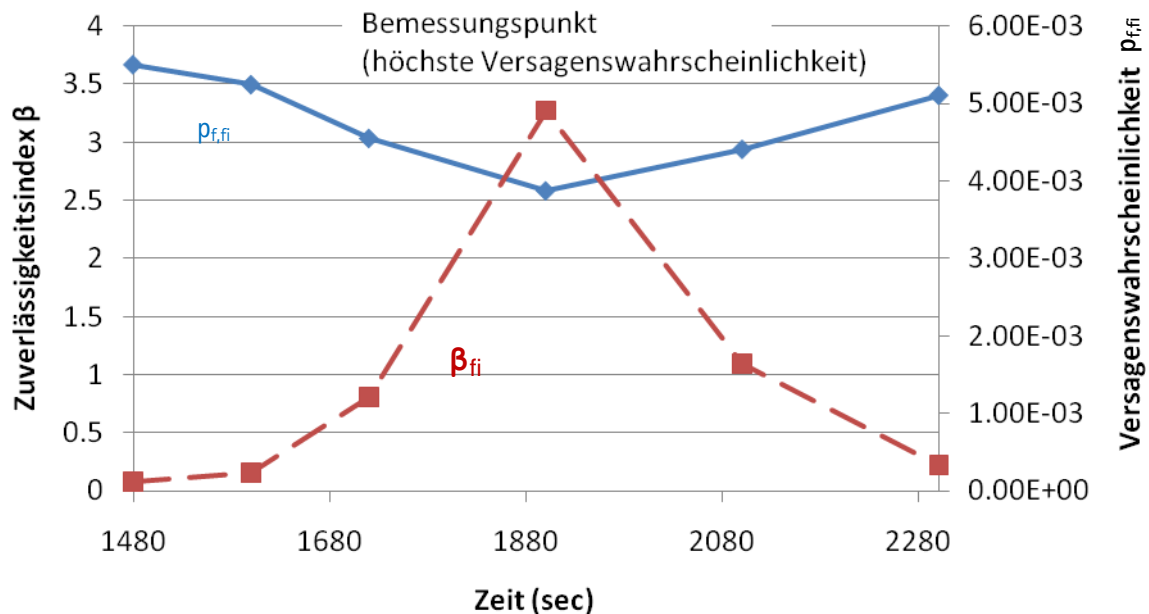
### Zuverlässigkeitsanalyse

Vereinfachend wird angenommen, dass zwischen den Variablen keine Korrelation besteht. Somit ergeben sich für die statistische Versuchsplanung insgesamt 45 benötigte Stützstellen, um eine Repräsentation des Zuverlässigkeitshyperraums zu gewährleisten.

Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurde ein Approximationspolynom gefunden, welches wiederum für die Zuverlässigkeitsanalyse mit FORM verwendet wurde.

Da der Zeitpunkt der höchsten Versagenswahrscheinlichkeit aufgrund der Streuungen der Basisvariablen nicht von vornherein bekannt war, wurden mehrere Zeitpunkte betrachtet, um sich dem Zeitpunkt der höchsten Versagenswahrscheinlichkeit anzunähern. Auf Basis von Voruntersuchungen mit dem deterministischen Modell konnte dieser Zeitraum eingegrenzt und dann iterativ gefunden werden. Diese Auswertung erfordert für jeden betrachteten Zeitpunkt eine komplette Zuverlässigkeitsanalyse, sodass aufgrund des hohen numerischen

Aufwandes nur sechs Zeitpunkte betrachtet werden konnten. Zwischen den Zeitpunkten wurde die Versagenswahrscheinlichkeit vereinfachend linear interpoliert. Der Zeitpunkt der niedrigsten Zuverlässigkeit wird bei ca. 1900 Sekunden erreicht. Die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit betrug hier  $p_{f,fi} = 0,005$ , was einem Zuverlässigkeitsindex von ca.  $\beta_{fi} = 3,5$  entspricht. Der zeitliche Verlauf der Versagenswahrscheinlichkeit ist in Abb. 3-4 dargestellt.



**Abb. 3-4: Verlauf der Versagenswahrscheinlichkeit über die Branddauer**

Hierbei handelt es sich um die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils, wenn der ungehinderte Brand der Fahrzeuge eingetreten ist. Das Sicherheitskonzept sieht mehrere Barrieren bis zum Erreichen eines solchen Szenarios vor. Hierzu zählen u. a. Löschmaßnahmen der Nutzer, die manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr und - soweit vorhanden - die Löschwirkung automatischer Löschanlagen.

Die erforderliche maximal zulässige jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_f = 1,1E-4$  ( $\beta = 3,7$ ) wird aufgrund der Einstufung in Risikoklasse 1 gewählt (siehe [1]). Laut Sicherheitskonzept sind folgende Annahmen zu treffen: Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes in einem Parkhaus wird aus Ermangelung von genauen Daten mit  $p_1 = 1,3E-2$  angenommen, was dem Wert für Industrielager entspricht. Da man in einem Parkhaus nicht davon ausgehen kann, dass Menschen zu jeden Zeitpunkt anwesend sind, um erste Löschversuche zu unternehmen, wird die manuelle Brandbekämpfung der Nutzer nicht angesetzt. Da

eine automatische Brandmeldung in der Regel nicht vorhanden ist, muss auch die Wirksamkeit der Löschmaßnahmen der Feuerwehr mit einer hohen Versagenswahrscheinlichkeit angesetzt werden ( $p_2=0,5$ ). Automatische Löschanlagen sind hier nicht vorhanden.

Insgesamt ergibt somit die jährliche Wahrscheinlichkeit eines ungehinderten Brandes zu

$$p_{fi} = 1,3E-2 \cdot 0,5 = 0,0065.$$

Dieser Wert kann nun mit der berechneten Versagenswahrscheinlichkeit unter der Annahme multipliziert werden, dass keine Korrelation besteht und sich somit die jährliche Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Bauteils im Falle eines Vollbrandes zu

$$p_{f,fi} \cdot p_{fi} = 0,005 \cdot 0,0065 = 3,25E-5 < 1,1E-4 = p_f$$

(berechnete Versagenswahrscheinlichkeit · Wahrscheinlichkeit ungehinderter Brand)

ergibt, was wiederum einem Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  von ca. 4,0 entspricht. Somit ist der vollprobabilistische Nachweis erbracht ( $4,0 > 3,7$ ).

### **Wertung der Zuverlässigkeitsanalysen**

Im Rahmen der vollprobabilistischen Nachweisführung ist es gelungen, die erforderliche Zuverlässigkeit des offenen Parkhauses nachzuweisen. Aufgrund der fehlenden Eingangsdaten aus dem Sicherheitskonzept wurde auf Basis der Literaturrecherchen ein konservatives Bemessungsbrandszenario generiert. Dieses Szenario kann aus mehreren oben genannten Gründen als konservativ bezeichnet werden. Die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit auf Basis dieser konservativen Annahmen und Modelle kann als „operative“ Versagenswahrscheinlichkeit bezeichnet werden. Somit bestehen gegen die hier betrachtete ungeschützte Stahlkonstruktion bei offenen Parkhäusern aus brandschutztechnischer Sicht keine Einwände.

In weiteren Forschungsvorhaben sollten weitere Berechnungen durchgeführt werden, um allgemeine Aussagen zu den Bemessungsbränden in Parkhäusern treffen zu können. Vor allem sollten die Datenbasis und die anzusetzenden Bemessungsbrandszenarien erweitert werden. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführte



probabilistische und deterministische Berechnung liefern lediglich erste Erkenntnisse über mögliche Bemessungsbrandszenarien.

#### **4 Zusammenfassung**

Mit dem Nationalen Anhang zum Eurocode 1 Teil 1-2 (Einwirkungen auf Tragwerke — Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke) ist ein neues Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung von Tragwerken vorgestellt worden. In diesem Beitrag wurde dieses Sicherheitskonzept auf Verbundträger eines offenen Parkhauses angewendet.

Das Parkhaus wurde probabilistisch betrachtet. Die Berechnungen ergaben Versagenswahrscheinlichkeiten, die den gesetzlichen Anforderungen genügen. Um diese gezeigten Ergebnisse verallgemeinern zu können, sind allerdings noch weitere Studien zu Parkhäusern erforderlich.

Eine Anwendung des Sicherheitskonzeptes auf lokale Brände ist zwar grundsätzlich möglich, dafür müssen aber noch allgemeingültige Brandszenarien zugrunde gelegt werden. Eine direkte Anwendung der im Sicherheitskonzept enthaltenen pauschalen Angaben zur Festlegung eines Bemessungsbrandes, die im Wesentlichen für vollentwickelte Raumbrände kalibriert wurden, führt ggf. zu unrealistischen und unwirtschaftlichen Bemessungen. Andererseits kann ein unzutreffend gewählter Bemessungsbrand auch bei Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte aus dem Sicherheitskonzept unter Umständen zu unsicheren Ergebnissen führen und somit die Anforderungen an die Brandsicherheit unterlaufen.

#### **5 Danksagung**

Die Autoren bedanken sich bei bauforumstahl e. V. für die Initiierung und Finanzierung des Forschungsvorhabens „Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung – Erprobung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau“. Ebenso möchten sich die Autoren bei dem Betreuerkreis, bestehend aus den Herren Dr. Hauke (bauforumstahl), Dipl.-Ing. Kuhnke (Goldbeck), Dr. Upmeyer (Hagen Ingenieure) und Dr. Zehfuß (hhpberlin), für die Unterstützung und den „Blick der Praxis“ bedanken sowie den Co-Autoren für diesen Beitrag, den Herren Dipl.-Ing. Cornelius Albrecht, MSc. (TU Braunschweig/ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Dipl.-Ing. Hans-Werner Girkes

(>>bauforumstahl e.V.), Dipl.-Ing. Jörg Sothmann (Leibniz Universität Hannover/  
Institut für Stahlbau).

## 6 Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.), National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Beuth Verlag GmbH, 2009 (in German)
- [2] Hosser, D.; Weilert, A.: Schutzziele und Sicherheitsanforderungen für Brandschutznachweise, in: vfdb-Jahresfachtagung 2008, S. 295-320
- [3] Weilert, A.; Hosser, D.: Vergleichende Analyse der Brandschutzanforderungen an Sonderbauten, in: vfdb-Jahresfachtagung 2008, S. 389-415
- [4] Hosser, D.: Mehr Flexibilität durch leistungsorientierte Brandschutzvorschriften, in: Braunschweiger Brandschutztage '08, S. 225-248
- [5] Hosser, D.; Weilert, A.; Klinzmann, C.; Schnetgöke, R.; Albrecht, C.: Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung), ZP 52-5-4.168-1239/07, TU Braunschweig, iBMB, 2008
- [6] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 4: Design of composite structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design, CEN, Brussels, 2006, EC4: Part 1-2.
- [7] Schaumann, P., Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 84-4, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 1984
- [8] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, CEN, Brussels, 2006, EC1: Part 1-2.
- [9] Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU: Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen (Muster-Garagenverordnung M-GarVO), Fassung Mai 1993
- [10] Bucher, C. G. and Bourgund, U.; A Fast and Efficient Response Surface Approach for Structural Reliability Analysis. Structural Safety, 7(1):57–66, 1990.
- [11] Fouad, N. A. (Hrsg.), Bauphysik Kalender, 2011, Ernst & Sohn – Verlag, Berlin

- [12] Schaumann, P.; Hosser, D.; Sothmann, J.; Albrecht, C.; Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung – Erprobung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau, Abschlussbericht, 2010, bauforumstahl