

Brandschäden an Stahlbetonbauwerken

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider

1. Einleitung und Problemstellung

Wird eine Stahlbetonkonstruktion durch ein Schadenfeuer beschädigt, so ist die Frage: Sanierung oder Neubau – sowohl unter wirtschaftlichen als auch technischen Gesichtspunkten zu prüfen. Die Frage, ob eine Sanierung noch wirtschaftlich vertretbar ist, wird entscheidend vom technisch erforderlichen Aufwand bestimmt, weiterhin richten sich die zu ergreifenden notwendigen Maßnahmen nach der zukünftigen wirtschaftlichen Nutzung des Objekts. Dies schließt die Überlegung ein, ob eine technisch realisierbare Sanierung für eine veraltete Konstruktion überhaupt sinnvoll und nicht statt dessen ein, wenn auch wesentlich teurer, aber die künftige Nutzung besser berücksichtigender Neubau vorzuziehen ist. Dabei muß allerdings auch beachtet werden, daß ein Neubau jeweils einer neuerlichen Baugenehmigung bedarf. Die Voraussetzungen dafür sind in vielen Fällen gar nicht mehr vorhanden. Insoweit ist es vielfach günstiger, eine nicht genehmigungspflichtige Reparatur durchzuführen und alte Genehmigungen fortgeltend zu lassen, anstatt eine neue Baugenehmigung zu beantragen. Falls alle Überlegungen eine Sanierung als zweckmäßig und sinnvoll erscheinen lassen, ist das technische Konzept unter Einhaltung der derzeit gültigen technischen und bauaufsichtlichen Bestimmungen zu erarbeiten.

Grundsätzlich wird man versuchen, durch Entfernung aller durch das Feuer direkt oder indirekt (z. B. Chloridverseuchung) geschädigten Teile der Konstruktion, durch neuen Beton und ggf. neue Bewehrungsstähe, den alten, dem ursprünglichen Festigkeitsnachweis zugrunde liegenden Zustand wieder herzustellen. Häufig wird dies nicht möglich sein, z. B. dann, wenn die im ungeschädigten Beton liegenden Bewehrungsstähe durch das Feuer einen Teil ihrer Festigkeit eingebüßt haben oder wenn an sich noch tragfähige Teile der Konstruktion durch die infolge Erhitzung zeitweilig aufgetretenen Zwangungsspannungen unzulässige Rißaufweitungen aufweisen. In diesen Fällen wird man sich nicht mit der Wiederherstellung des alten Zustandes begnügen können, sondern wird durch zusätzliche Maßnahmen (Zulagebewehrung, Querschnittsverstärkung, Rißinjektionen, zusätzliche Verankerungen usw.) dafür sorgen müssen, daß eine den techni-

schen Sicherheitsbestimmungen entsprechende Tragfähigkeit einschließlich der erforderlichen Sicherheitsreserve wieder hergestellt wird. Der erneute Nachweis der Standsicherheit wird dabei grundsätzlich auf der Grundlage der Stahlbetonbestimmungen nach DIN 1045 geführt werden müssen.

2. Schadenbeurteilung und Schadenklassifizierung

2.1 Allgemeines

Im Brandfall hängt das Ausmaß der Zerstörung einer Stahlbetonkonstruktion nicht nur von der Höhe der erreichten Temperaturen ab, sondern auch von der Dauer der Brandeinwirkung, dem statischen System, den Querschnittsabmessungen, der Belastung und einer Reihe anderer Einflußgrößen. Der Verlust an Tragfähigkeit wird dabei von einer Vielzahl sich jeweils überlagernden Faktoren bestimmt, dies sind im wesentlichen:

- Verlust der Festigkeitseigenschaften des Betons,
- Verlust der Festigkeitseigenschaften des Stahls,
- Verlust des Verbundes Stahl/Beton,
- übermäßige Verformung der Konstruktion durch temperaturbedingte Längenänderungen und Durchbiegungen.

Zur Abschätzung der Temperaturbelastung sind auf den Bildern 1a und 1b Werte für Platten und Stützen beispielhaft angegeben. Dabei ist eine Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102 Teil 2 von 0,5 bis 4,0 Stunden Dauer unterstellt. In der Praxis, d. h. bei einem Gebäudebrand, sind ähnliche Temperaturverteilungen zu erwarten. Allerdings hängt die Aufheizgeschwindigkeit der Bewehrungsstähe und die Höhe der erreichten Maximaltemperaturen sehr stark von der Intensität des Schadenfeuers ab.

Auf Bild 2 sind die von der Betonoberfläche ausgehenden Betonzerstörungen in Abhängigkeit von der Normbranddauer nach DIN 4102 für Konstruktionsbeton nach DIN 1045 angegeben. Bei Temperaturen oberhalb 350°C sind geringe, ab 450°C sind ausgeprägte und ab 573°C sind gravierende Betonschäden zu erwarten. Diese Grenztemperaturen sind jedoch auch abhängig von dem jeweils verwendeten Betonzuschlag. Dem Bild 2 liegt ein durchschnittlicher Konstruktionsbeton mit Kieszuschlag zugrunde, wie er zu etwa 70% im Hochbau zur Anwendung kommt. Bei einem Schadenfeuer geringer Intensität werden derartige Temperaturen allerhöchstens in oberflächennahen Bereichen erreicht, so daß sich im Mittel nur geringe Betonschäden ergeben.

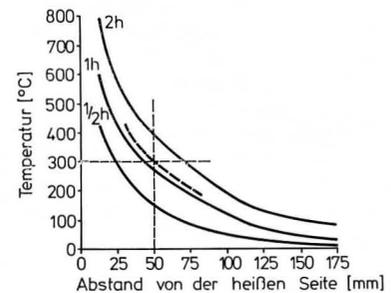


Bild 1a. Temperaturverteilung in einer 175 mm dicken Stahlbetonplatte im Normbrand.

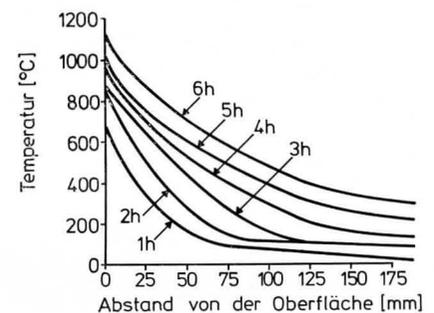


Bild 1b. Temperaturverteilung in einer 380 mm dicken Stütze im Normbrand.

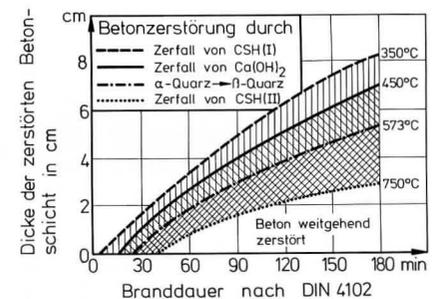


Bild 2. Zerstörung von Beton unter Normbrandbeanspruchung nach DIN 4102.

Zur nachträglichen Ermittlung der im Brandfall erreichten Intensität können

- theoretische Methoden (Wärmebilanzrechnungen)
- praktische Methoden (Brandindikatoren)

herangezogen werden. Beide Methoden stehen konkurrierend nebeneinander und kommen je nach Schadensumfang und geplantem Untersuchungsumfang zur Anwendung.

Die Berechnung der Temperaturverläufe bei einem Schadenfeuer in Wohnungen, Industriegebäuden und Kraftwerken ist auf der Grundlage von sogenannten Wärmebilanzrechnungen möglich, wobei derzeit bereits mehrere Rechenmodelle

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider
 Fachgebiet: Baustoffkunde, Amtl. Prüfstelle für Beton, Universität Gesamthochschule Kassel

existieren, die auf PC-Rechnern betrieben werden können. Ausgehend von dem betroffenen Gebäude bzw. Brandabschnitt wird der Brandverlauf auf der Grundlage eines thermodynamischen Modells rechnerisch nachvollzogen, wobei die vorhandenen Brandlasten, die Ventilation und die Brandausbreitung als Eingabeparameter dienen. Über die Anwendung solcher Modelle wurde bereits mehrfach berichtet, weshalb hier nur darauf hingewiesen werden soll [1, 2]. Ein Ergebnis dieser Brandschadenssimulation ist z. B. der Temperatur-Zeit-Verlauf in dem betroffenen Raumbereich oder Brandabschnitt, so daß eine für die Schadensbeurteilung des Bauwerks wichtige Grundlage vorliegt.

In der Praxis begnügt man sich häufig mit der ungefähren Ermittlung der erreichten Maximaltemperaturen durch Brandindikatoren, wozu die Erweichungs- und Schmelzpunkte üblicher Materialien dienen. Auf der Tabelle 1 ist eine Reihe von Materialien zusammengestellt, deren Zustand und Form nach einem Brand Rückschlüsse auf das erreichte Temperaturniveau zulassen. Diese Methode ist naturgemäß sehr ungenau und kann daher nur für grobe Abschätzungen herangezogen werden.

2.2 Restfestigkeit von Stahl und Beton

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß die Brandtemperaturen die Festigkeiten des Betons und der verwendeten Beton- oder Spannstähle negativ beeinflussen können. Die Festig-

keiten nehmen mit zunehmenden Temperaturen allmählich ab und erreichen auch nach der Wiederabkühlung nicht mehr ihre ursprünglichen Werte. Ebenso geht der Verbund zwischen Beton und Stahl bei höheren Temperaturen verloren [3].

Der Beton selbst verliert bei Temperaturen über 100°C zunächst das sogenannte physikalische gebundene Wasser, wobei seine Festigkeit i. allgem. erhalten bleibt, wohingegen der E-Modul bereits um 10 bis 20% zurückgehen kann. Oberhalb 300°C beginnt das im Zementstein enthaltene Calciumsilicathydrat-Gel (CSH-Gel) zu zerfallen. Der damit verbundene Rückgang der Druckfestigkeit ist zunächst gering, steigt dann aber ab etwa 400°C stärker an. Bei Temperaturen ab 450°C zerfällt das Portlandit, wodurch die Festigkeiten weiter zurückgehen. Oberhalb 600°C werden auch einige Zuschlaggesteine angegriffen (Quarzwandlung, Kalkstein wird gebrannt und zerfällt beim Löschen), so daß es zu weiteren Festigkeitseinbußen kommt. Der Festigkeitsverlust der Konstruktion wird meist dadurch in Grenzen gehalten, daß ein temperaturbedingter Abfall der Betonfestigkeit nur in den äußeren 3–5 cm dicken Betonschichten eintreten kann, weil nur diese der hohen Temperatur ausgesetzt sind. Diese Schichten bilden dann gleichzeitig Isolationsschichten und schützen so, auch wenn sie selbst zermürbt sind, den tragenden Kern der Konstruktion vor der vollen Temperatureinwirkung. Die Restfestigkeiten und E-Moduln von Kiesbeton nach einer

erfolgten Temperaturbeanspruchung sind in Tabelle 2 angegeben. In dieser Tabelle sind die Erkenntnisse der internationalen Arbeitsgruppe W14 des Conseil International Du Batiment Pour La Recherche L'Etude Et La Documentation (CIB W14), die sich mit der Reparierbarkeit von Bauwerken befaßt, berücksichtigt [4].

Das Temperaturverhalten von Stahl ist grundsätzlich anderer Art. Schon bei verhältnismäßig geringen Temperaturen beginnt der Stahl sich zu dehnen, dies geschieht um so mehr, je geringer die Betondeckung ist. Durch die Dehnung des Stahls kommt es zur Abspaltung der Betondeckung, vor allem in den Eckbereichen der Bewehrung. Bei Temperaturen etwa ab 500°C erreicht der auf Zug beanspruchte Stahl die Fließgrenze (abhängig von der Spannungsausnutzung und Stahlsorte) und ist dann nicht mehr in der Lage, wesentliche Kräfte aufzunehmen. Bei Spannstahl liegt die kritische Temperatur ggf. knapp über 350°C. Hierbei spielen die Art der Stahlherstellung und Vergütung eine wesentliche Rolle. Wird durch die Brandtemperatur die Fließgrenze des Stahls bis unter die im Stahl vorhandene Spannung herabgesetzt, ist die Tragfähigkeit der Konstruktion i. a. erschöpft, d. h., sie wird zusammenbrechen, soweit Kräfteumlagerungen nicht möglich sind.

Nach der Abkühlung von höheren Temperaturen erreichen Stähle ihre Ausgangsfestigkeit nicht mehr. Je nach Stahlart und erreichter Maximaltemperatur ergeben sich bleibende Festigkeitsveränderun-

Abschätzung von Temperaturen			
Material	Typische Artikel	Zustand	Temperatur
Polystyrol	dünnwandige Eßgefäße, Behälter	kollabiert	120°C
	Lampenschirm, Gardinenhaken, Radioboxen, Griffe	erweicht geschmolzen	120–140°C 250°C
Polyethylen	Taschen, Tüten, Filme Behälter, Eimer	geschrumpft	120°C
		erweicht geschmolzen	150°C 175°C
Polymethyl- Metacrylat	Griffe, Stiele, Scheiben	erweicht blasig	130–200°C 250°C
Cellulose	Holz, Papier	geschwärzt	200–250°C
Lötmetall	Lötverbindungen	geschmolzen	250°C
Blei	Hautechnik, Rohre, Spielsachen	geschmolzen Ecken gerundet	200–350°C
Zink	Sanitärinstallation	tropfenförmig	400°
Al-Leg.	Beleuchtungsteil, Gehäuse, Konsole	erweicht	400°C
		geschmolzen	650°C
Glas	Gläser, Flaschen	erweicht zertiflossen	500–600°C 850°C
Silber	Ringe, Armbänder	geschmolzen	950°C
Bronze	Fensterverschlüsse, Türklingel	geschmolzen	1000°C
Kupfer Gußeisen	Kabel, Ornamente Radiatoren	geschmolzen	1000–1100°C
		geschmolzen	1100–1200°C

Tabelle 1: Erweichungs- und Schmelzpunkte von Materialien

Materialverhalten von Beton sowie Beton- und Spannstahl nach einem Brand bezogen auf den Ausgangszustand							
Temperatur in °C	200	300	400	500	600	800	1000
Druckfestigkeit in % Kiesbeton B 25	80	70	60	40	20	10	–
E-Modul in % Kiesbeton B 25	60	50	40	30	10	5	–
Zugfestigkeit in % BST 420/500 RU	100	95	90	80	65	50	40
Zugfestigkeit in % BST 500/550 RK	100	95	90	70	60	35	10
Zugfestigkeit in % Spannstahl, gewalzt	100	90	80	65	45	25	–
Zugfestigkeit in % Spannstahl, gereckt	85	70	50	20	10	–	–
Zugfestigkeit in % Spannstahl, vergütet	95	80	50	20	10	–	–
E-Modul in % verschiedene Stähle (heiß)	95	85	75	55	35	10	–

Tabelle 2: Materialverhalten von Beton sowie Beton- und Spannstahl nach einem Brand

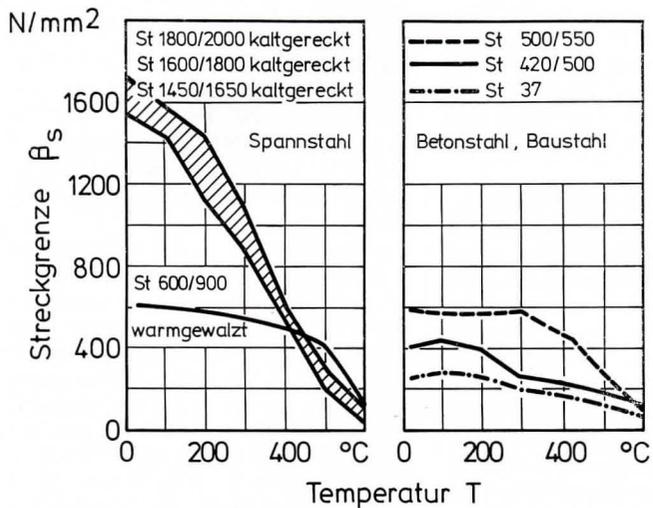


Bild 3a. Streckgrenze β_s von Beton- und Spannstählen in Abhängigkeit von der Stahitemperatur.

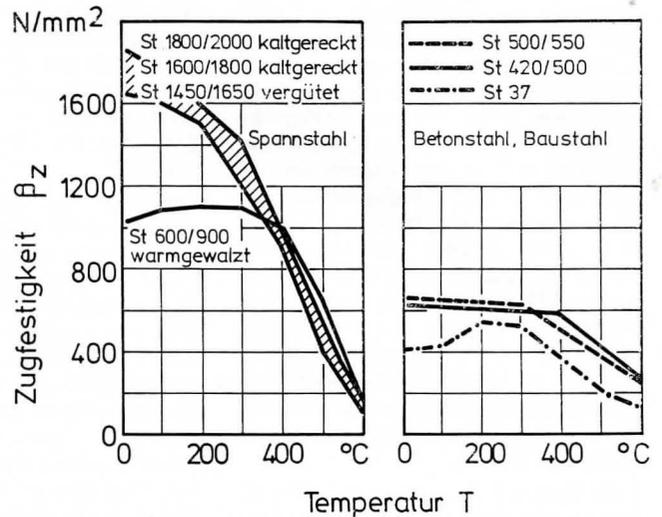


Bild 3b. Zugfestigkeit β_z von Beton- und Spannstählen in Abhängigkeit von der Stahitemperatur.

gen (vergl. Tabelle 2). Bild 3a und 3b zeigen beispielhaft die Streckgrenzen und Zugfestigkeiten von Beton- und Stahlbetonstählen in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur. Insbesondere sind danach bei kaltgereckten, hochfesten Stählen deutliche Festigkeitsabnahmen auch schon bei Temperaturen unterhalb 300 °C zu erwarten. Warmgewalzte Stähle zeigen dagegen ein günstigeres Temperaturverhalten, d. h. ausgeprägte Festigkeitsverluste sind erst dann zu erwarten, wenn der warmgewalzte Stahl über 400 °C erwärmt wurde. Die Ermittlung der jeweils verwendeten Stahlsorte nach einem Brand ist somit für

die Beurteilung des Schadens von erheblicher Bedeutung.

Stahlbetonbauwerke sind auch nach großen Bränden im allgemeinen gut sanierbar. Neuere Entwicklungen auf dem Bau-sektor, vor allem der Einsatz von Kunststoffen für die verschiedensten Anwendungsgebiete haben jedoch den zur Sanierung von Brandschäden an Stahlbetonkonstruktionen erforderlichen Aufwand in den letzten Jahren sprunghaft ansteigen lassen. Das Vorhandensein PVC-haltiger Kunststoffe im Gebäude kann sich im Brandfall in verschiedener Hinsicht negativ auswirken:

- Erhöhung der Brandlast durch brennbare Kunststoffe,
- Entwicklung von Gasen, die nicht nur für Menschen, sondern auch für tragende Konstruktionsteile gefährlich werden können (z. B. Gefährdung der Bewehrungsstähle durch den sich beim Brand von PVC-Materialien entwickelnden Chlorwasserstoff),
- Erhöhung des Sanierungsaufwandes zur Beseitigung von Chloriden oder Chloridschäden.

Gerade der zuletzt genannte Punkt hat in jüngster Zeit Anlaß zur Besorgnis ergeben, weil Brandschäden infolge von

Schadenklasse	Schadenart
Sk I	Kosmetische Zerstörung der Bauteiloberflächen
Sk II	Technische Zerstörung der Bauteiloberflächen
Sk III	Zerstörung von Oberflächenbereichen bzw. Oberflächenschichten
Sk IV	Partielle Zerstörung von tragenden Teilen der Bauteilquerschnitte
Sk V	Zerstörung von ganzen Bauteilen oder Bauwerken

Tabelle 3: Klassifikationssystem für Brandschäden

Charakterisierung der Schadenklassen		
Klasse	Art	Beschreibung
I	Kosmetische Zerstörung der Oberfläche	Rußablagerungen und Verfärbungen, zumindest teilweise abwaschbar, teilweise bleibende Verfärbung, Geruchsveränderung
II	Technische Zerstörung der Oberfläche	Rußablagerungen und Zerstörung der Farben und Beschichtungen, geringe Ausplatzungen, Farben und Spachtelung reparabel
III	Zerstörung der Oberflächenstruktur	Betonfarbe schwarz oder rosa, leichte Betonausplatzungen und Eckabplatzungen bis zur Tiefe der äußersten Bewehrung, geringe korrosive Angriffe und Ausbauchungen der Oberflächen
IV	Zerstörung des Querschnittes	Betonfarbe ggf. „glänzend“, deutliche Abplatzungen an Unter- und Seitenflächen, über 50% der äußeren Bewehrung frei, max. 1 Hauptzugstab gebeult, Risse ca. 1 mm
V	Zerstörung des Bauteils, -werks	Betonfarbe ggf. grau/weiß, starke Zerstörungen an allen Ecken und Flächen, alle Zugstäbe frei, mehrere ausgebeult (teilweise gebrochen), größere Verformungen und Risse

Tabelle 4: Charakterisierung der Schadenklassen

Chlorid durchweg erhebliche Sanierungskosten verursachen. Häufig ist es dabei zu Überreaktionen gekommen, d. h., es wurde versucht, den Chloridgehalt auf sehr kleine Werte, z. B. unter 0,4 % bezogen auf den Zementgehalt, einzustellen. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß handelsübliche Portlandzemente selbst geringe Mengen an Chloriden enthalten, die allerdings völlig harmlos sind, weil sie über bestimmte Aluminatphasen im CSH-Gel fest eingebunden werden. Nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse scheint es möglich, die Frage der zulässigen Chloridgehalte nach einem Brand zu klären. Es fehlt jedoch eine wissenschaftliche Zusammenfassung aller auf diesem Gebiet vorliegenden Erfahrungen und Daten.

2.3 Schadenklassen für Betonbauwerke

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit einer Stahlbetonkonstruktion nach einem Brandfall ist die systematische Erfassung und Bewertung des Feuerangriffs erforderlich. Dafür wurden in jüngster Zeit sogenannte Schadenklassen entwickelt. Die einzelnen Bauteile werden danach, entsprechend dem vorgefundenen Schaden, in fünf Klassen (Klasse I bis V) eingeteilt, so daß eine systematische Beurteilung des Gesamtschadens möglich wird. Die Einteilung der Schadenklassen gemäß Tabelle 3 ist so vorgenommen, daß entsprechend der zu beobachten-

den Zerstörung eine Reihung von I bis V entsteht. Dabei umfaßt die Klasse I nur solche Bauteilschäden, die eine rein kosmetische Zerstörung der Bauteiloberflächen darstellen wie Rußablagerungen und Farbveränderungen. In die höchste Schadenklasse V sind dagegen solche Bauteile einzuordnen, die größere Festigkeitseinbußen der Konstruktion, sehr große Verformungen und starke korrosive Angriffe und Zerstörungen zeigen. Ihre Reparierbarkeit ist nur in wenigen Fällen gegeben.

Eine umfassende Charakterisierung der Schadenklassen ist in Tabelle 4 angegeben. Die Tabelle 4 ist ausgearbeitet für Betonbauwerke bzw. -bauteile. Es sei hier jedoch erwähnt, daß vergleichbare Schadenklassifizierungen auch für Mauerwerk-, Stahl- und Holzkonstruktionen vorliegen. Darüber soll demnächst berichtet werden. Es ist sicherlich problematisch, wenn in den Schadenklassen mit festen Werten in bezug auf Rißbreiten und anteiligen Abplatzungen gearbeitet wird. Insbesondere ist bei Stahlbetonkonstruktionen zu beachten, daß die Bauteile unterschiedliche Funktionen haben und somit im Schadenfall u. U. differenziert beurteilt werden müssen. Es ist deshalb sinnvoll, bei den einzelnen Bauteilen unterschiedliche Kriterien anzuwenden. Unterschieden wird dabei zwischen den Bauteilarten: Balken, Stützen, Wände/Decken. Für Spannbetonbauteile wurde eine geson-

derte Gruppe gebildet, weil sie speziellen Beurteilungskriterien unterliegen. Den Zusammenhang zwischen den so gebildeten Schadenklassen und den zugehörigen Bauteilerstörungen zeigen die Tabellen 5 bis 8.

Interessant ist auch der Zusammenhang zwischen der Schadenklassifizierung und den möglichen Schadensursachen (Tabelle 9). Neben den eigentlichen Feuerschäden treten u. U. erhebliche Löschwasserschäden auf, die ggf. bis in die Schadenklassen IV hineinreichen. Daß die Brandnebenwirkungen u. U. einen erheblichen Anteil am Gesamtschaden haben, ist vielen Versicherern aus leidvoller Erfahrung bekannt. Neben dem Löschwasser sind übermäßige Rauch- bzw. Rußbildungen und die Entwicklung aggressiver Gase bei Kunststoffbränden die häufigste Ursache für derartige Nebenwirkungen bzw. Schäden.

Alle Bauteile müssen nach ihren Schadenklassen erfaßt und anschließend entsprechend ihrer Klassifikation untersucht werden. In den jeweiligen Schadenklassen beziehen sich die Untersuchungen vor allem auf die Beurteilung der Tragfähigkeit des Betons und der Stahlbewehrung nach der vorangegangenen Temperatureinwirkung. Bei leichten Schäden, wie Abplatzungen der Betondeckung, wird sich die Untersuchung zunächst auf

Schadenklassen von Stahlbetonbalken	
Klasse	Beschreibung der Zerstörung
I	Rußablagerungen und ggf. Verfärbungen, keine Betonausplatzungen, geringe Ausplatzungen an Farben und Spachtelungen
II	Rußablagerungen, lokale Zerstörung von Farben und Beschichtungen, geringe Betonabplatzungen, Betonverfärbung rosa bzw. blaßgelb
III	Rußablagerungen, Farben etc. vollkommen zerstört, erhebliche Eckabplatzungen bis zur Bewehrung, Verbund intakt, keine deutliche Durchbiegung, Betonverfärbung rosa bzw. blaßgelb, mittlere Säurekonzentration
IV	Bügel und 1. Bewehrungslage frei, etwa 50 % des Verbundes am Umfang gestört, geringe Durchbiegung, keine Versagensgefahr (Abstützungen lokal erforderlich), deutlich sichtbare Risse, hohe Säurekonzentration
V	Erhebliche Querschnittminderung durch Betonzerstörung, alle unteren Bewehrungen frei, Verbund weitgehend verloren, deutliche Durchbiegung, ausgeprägte Risse, Betonfarbe grau/weiß

Tabelle 5: Schadenklassen für Balken

Schadenklassen von Stahlbetonstützen	
Klasse	Beschreibung der Zerstörung
I	Rußablagerungen und ggf. Verfärbungen, keine Betonausplatzungen, geringe Ausplatzung an Farben und Spachtelungen
II	Rußablagerungen, lokale Zerstörung von Farben und Beschichtungen, geringe Betonausplatzungen, Betonverfärbung rosa bzw. blaßgelb
III	Rußablagerungen, Farben etc. vollkommen zerstört, Eckabplatzungen an den Ecken bis zur Bewehrung, Verbund intakt, kein Ausknicken der Bewehrung, Betonverfärbung rosa bzw. blaßgelb, mittlere Säurekonzentration
IV	Abplatzungen um die ganze Stütze, Verbund lokal zerstört, Bewehrung gering verformt, max. 1 Stab ausgeknickt, Stabilität gering gefährdet (Abstützung teilweise erforderlich), starke Säurekonzentration, Betonoberfläche „glänzend“
V	Ausgedehnte Abplatzungen mit erheblicher Querschnittsminderung, Verbund erheblich gestört, mehr als 1 Stab ausgeknickt, Säule sichtbar verformt, Betonoberfläche grau/weiß

Tabelle 6: Schadenklassen für Stützen

Schadenklassen von Decken / Wänden	
Klasse	Beschreibung der Zerstörung
I	Rußablagerungen und ggf. Verfärbungen, keine Betonausplatzungen, geringe Ausplatzungen an Farben und Spachtelungen
II	Rußablagerungen, lokale Zerstörung von Farben und Beschichtungen, geringe Betonabplatzungen, Betonverfärbung rosa/blaßgelb
III	Rußablagerungen, Farben etc. vollkommen zerstört, ausgedehnte Abplatzungen bis zur Hauptzugbewehrung, Verbund nur lokal gestört, keine deutliche Durchbiegung, Betonverfärbung rosa bzw. blaßgelb, mittlere Säurekonzentration
IV	Alle wesentlichen Bewehrungen frei und Verlust des Verbundes (über 20% der Flächen), lose Betonstücke auf der unteren Zugbewehrung, geringe Durchbiegung ohne Schwächung der Tragfähigkeit (Abstützung lokal erforderlich), starke Säurekonzentration
V	Ausgedehnte Abplatzungen, Bewehrungen liegen frei, Beton oberhalb der Bewehrung teilweise gerissen, große Dickenänderungen, deutliche Durchbiegung (lokal oder insgesamt), Betonfarbe grau/weiß

Tabelle 7: Schadenklassen für Decken und Wände

Schadenklassen von Spannbetonbauteilen	
Klasse	Beschreibung der Zerstörung
I	Rußablagerungen und ggf. Verfärbungen, keine Betonabplatzungen, geringe Ausplatzungen an Farben und Spachtelungen
II	Rußablagerungen, lokale Zerstörung von Farben und Beschichtungen, geringe Betonabplatzungen, Betonverfärbung rosa/blaßgelb
III	Rußablagerungen mit schwankender Dicke und Zusammensetzung, Farben etc. vollkommen zerstört, Abplatzungen i. w. entlang von Ecken, lokale Beanspruchung der unteren Spannbewehrung, Betonverfärbung und geringe Ribbildung, keine deutlichen Biegungen, mittlere Säurekonzentration
IV	Erhebliche Abplatzungen an den Flächen, Bügel und untere Spannsthähle frei, wobei > 50% des Umfangs noch Verbund haben, geringe Durchbiegungen möglich, Stabilität nicht gefährdet, hohe Säurekonzentration, lokal abstützen
V	Ausgedehnte Zerstörungen an Ecken, Seitenflächen und Flansche, alle Spannstähle der unteren Lagen frei, Stege durch Ausplatzungen teilweise zerstört, deutlich meßbare Durchbiegungen, deutliche Risse, Einsturzgefahr (abstützen!)

Tabelle 8: Schadenklassen von Spannbetonbauteilen

das Säubern des Betons und die optische Beurteilung erstrecken. Dabei ist Beton, der dem Feuer stark ausgesetzt war und evtl. einen Teil seiner Festigkeit verloren hat, oft daran zu erkennen, daß er eine rötliche Farbe angenommen hat. Ursache dieser Verfärbung ist die unter starker Hitze eintretende Oxydation der im Zementstein enthaltenen Eisenverbindungen.

Auf den Bildern 4, 5 und 6 sind typische Schadenbilder von Stahlbetonkonstruktionen sichtbar, die gemäß den vorherigen Ausführungen zu Einstufungen in die Schadenklasse II und III führen. Die Beurteilung ist auf der Grundlage der Tabellen

4 bis 7 vorgenommen worden, d. h., die Abplatzungen bis zur Tiefe der äußeren Bewehrung und die überwiegende Zerstörung der Oberflächen entsprechen der Charakterisierung gemäß der o. g. Schadenklasse III.

Bei größeren Schäden wird man den Beton mit dem Hammer abklopfen und aus dem unterschiedlichen Klang beim Vergleich mit nicht betroffenem Beton gleicher Güte im Bauwerk Rückschlüsse ziehen können. Beim Abklopfen wird man auch feststellen können, ob stellenweise durch Dehnung der Stähle Hohlstellen entstanden sind, die noch nicht zu Absprengungen geführt haben. Feine

Haarrisse sind meist unbedenklich für die Tragfähigkeit des Bauwerkes, sie können aber evtl. den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen. Soweit Zweifel an der Betonfestigkeit entstehen, gibt eine Untersuchung des Betons mit dem Schmidhammer einen ersten Hinweis über die noch vorhandene Betonfestigkeit. Bei den Bewehrungsstählen kann man in der Regel annehmen, daß keine Festigkeitsminderungen aufgetreten sind, wenn die Betondeckung nicht zermürbt ist bzw. abgesprengt wurde.

Auf Bild 7 ist ein größerer Brandschaden in einem Kellerflur nach Beseitigung des Bauschutts dargestellt. Alle Bewehrungs-



Bild 4. Brandschaden der Schadenklasse II (Stütze) und III (Unterzug) in einem Stahlbetonbauwerk

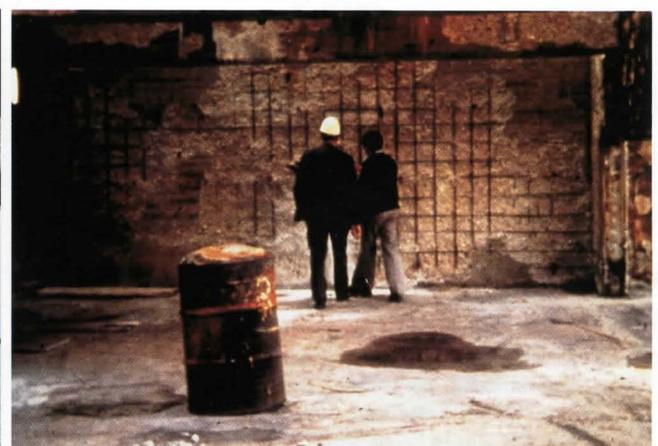


Bild 6. Brandschaden der Schadenklasse III an einer Stahlbetonwand



Bild 5. Brandschaden der Schadenklasse III an einem Stahlbetonunterzug.

matten liegen praktisch frei, es sind jedoch keine größeren Durchbiegungen oder Ausbeulungen an den Matten erkennbar (vergl. Tabelle 7). Ebenso halten sich die festgestellten Rißbreiten in Grenzen ($< 1,0 \text{ mm}$), so daß die Beurteilung hier eindeutig eine Zuordnung in die Schadenklasse IV ergibt.

Sind augenscheinlich schwere Schäden eingetreten, ist also der Beton bis in größere Tiefen zermürbt, oder sind die Stähle nach Abplatzen der Betondeckung stark

dem Feuer ausgesetzt gewesen, so wird man Proben entnehmen müssen. Diese Proben (Bohrkerne beim Beton, Stücke der Bewehrungsstähle) wird man an den Stellen entnehmen, die dem Feuer am stärksten ausgesetzt waren. Das Ergebnis der Festigkeitsuntersuchung dieser Proben entscheidet darüber, ob eine Wiederherstellung des alten Zustandes erreicht werden kann bzw. ob es erforderlich ist, die Konstruktion zu verstärken, oder ob die Konstruktion vollständig erneuert werden muß.

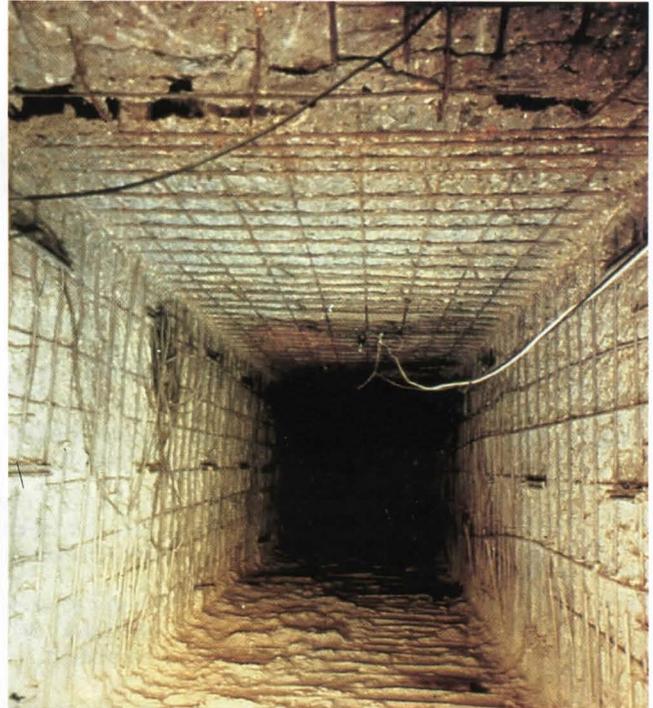
Auf den Bildern 8 und 9 sind beispielhaft zwei Betonbauteile mit schweren Brandschäden dargestellt. Die Beurteilung gemäß Tabelle 4 bzw. den Tabellen 5 und 6 führt hier eindeutig zur Schadenklasse V. Dafür sprechen vor allem die festzustellenden Querschnittsminderungen, das Freiliegen sämtlicher Zug- und Druckbewehrungen sowie die ausgeprägte Ribbildung. Eine Bohrkernentnahme war erforderlich, um die Tragfähigkeit des Restquerschnittes sicher beurteilen zu kön-



Bild 9. Brandschaden der Schadenklasse V an einer Stahlbetonstütze.

Bild 7. (rechts) Brandschaden der Schadenklasse IV an Stahlbetondecken und -wänden.

Bild 8. (unten rechts) Brandschaden der Schadenklasse V an einem Stahlbetonunterzug.



Brandschäden					
Ursachen		Klassifikation			
Feuerschäden	Lösch-Schäden	Schadenart	Schadenklasse		
Temperatur, Hitze	Aggressive Gase	Kosmetische Zerstörung der Oberfläche	I		
				Wasser, Schaum	Technische Zerstörung der Oberfläche
	Zerstörung der Oberflächenstruktur	III			
			Zerstörung des Querschnittes		
	Zerstörung des Bauteils, -werks	V			

Tabelle 9: Ursache von Brandschäden der Klassen I bis V

Reparaturkriterien für Betonkonstruktionen	
Klasse	Empfohlene Maßnahmen
I	Reinigung, Schönheitsreparatur erforderlich
II	Schönheitsreparatur und geringe Ausbesserungen erforderlich
III	Reparatur ist grundsätzlich zu empfehlen bzw. die einzig vernünftige Maßnahme, eine extreme Ausnahme wären besonders hohe Anforderungen an die Oberflächen
IV	Reparatur ist gewöhnlich die vernünftigste Maßnahme, auch wenn der Arbeitsaufwand und die Kosten hoch erscheinen, Begutachtungen bzw. Bauwerksuntersuchungen sind erforderlich
V	Nicht alle Bauteile sind reparabel, das Bauwerk muß vollständig begutachtet und untersucht werden, Kostenvergleiche gegenüber einem Neubau sind erforderlich, bei Spannbetonbauwerken häufig keine Reparaturmöglichkeit gegeben

Tabelle 10: Zusammenstellung der Reparaturkriterien

nen. Ebenso mußten Notstützen eingebaut werden, weil das Gebäude nach dem Brand nicht mehr standsicher war.

Im Sonderfall eines PVC-Brandes wird man prüfen müssen, wie tief Chloridionen in den Beton eingedrungen sind, in welcher Konzentration diese vorliegen und ob durch anderweitige Reaktionen, z. B. Zerstörung kalkhaltiger Betonzuschläge durch Salzsäure-Angriff, ein weitergehender Betonschaden eingetreten ist. Weiterhin ist festzustellen, ob die Chloridionen durch eine Oberflächenbehandlung partiell entfernt werden können oder die betroffene Betonschicht abgetragen werden muß. Auf die in solchen Fällen anzuwendenden Untersuchungsmethoden und Sanierungsverfahren kann hier aufgrund der gebotenen Kürze nicht weiter eingegangen werden, stattdessen wird auf die einschlägige Literatur hingewiesen [5, 6].

Zur systematischen Erfassung des Brandschadens ist es erforderlich, für das Bauwerk einen Schadenkatalog aufzustellen. Dazu wird man die Bauteile geschoßweise numerieren und die zugehörigen Schadenklassen in Form einer Tabelle auflisten. Daraus ergibt sich in übersichtlicher Form ein Bild des Gesamtschadens, und soweit ein Bezug zwischen Sanierungsaufwand und Schadenklasse herstellbar ist, auch eine Möglichkeit, die Höhe der zu erwartenden

Kosten zu kontrollieren. Letzteres setzt jedoch voraus, daß die hier vorgestellte Schadenssystematik zunächst an einigen Bauwerken unter kontrollierten Bedingungen angewandt wird.

3. Reparatur brandgeschädigter Stahlbetonbauteile

Grundlagen für die Entscheidung, ob nach einem Brandfall eine Sanierung der Konstruktion sinnvoll ist, sind:

- a) Die vorhandenen Bauunterlagen, insbesondere die geprüfte statische Berechnung.
- b) Die örtliche Aufnahme und Schadenklassifizierung der Gebäude- oder Bauteilschäden (Beschreibung, Fotos, Schadenklassifikation in tabellarischer Form).
- c) Die Ergebnisse der Materialuntersuchung (Schmidthammer, Bohrkerne, Stahlproben, Zementanteil).
- d) Menge und Tiefe der im Beton nachgewiesenen Chloridionen, wobei 0,4 bis 0,6% Chlorid bezogen auf den Zementanteil i. a. als unschädlich einzustufen sind.
- e) Verformungen der Gesamtkonstruktion ggf. auch in den nicht vom Feuer betroffenen Bereichen.

Nachdem die Schäden festgestellt und klassifiziert sind, kann anhand der in Tabelle 10 dargestellten Reparaturkriterien, unter Einbeziehung der geplanten künftigen Nutzung, der Reparaturaufwand abgeschätzt werden. Dieses kann für jedes Bauteil, für den Bauwerksabschnitt oder für das Gesamtbauwerk geschehen. Sinnvollerweise teilt man das Bauwerk in Abschnitte auf und beurteilt dort einzeln die Reparierbarkeit. Aus der Summe der Abschnitte ergibt sich dann die Reparierbarkeit der Gesamtkonstruktion. Die Klassifizierung erleichtert somit die Erfassung des Brandschadens als auch die Erstellung von Ausschreibungen für den zu vergebenden Reparaturauftrag.

4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten aufgezeigt, Brandschäden an Stahlbetonkonstruktionen systematisch zu beurteilen. Die vorgestellte Methode geht von einer Zusammenfassung der Brandschäden in Form von Schadenklassifizierungen aus, wobei detaillierte Beurteilungskriterien für Brandschäden an Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen angegeben werden. Insgesamt genügt es, die geschädigten Bauteile in fünf Schadenklassen einzuteilen. Anhand von Schadenbildern wurden einige praktische Beispiele für die Schadenklassifizierung erläutert. Die Schadenklassifizierung ermöglicht eine einfache versicherungstechnische Bewertung des Schadens und eine gezielte Ausschreibung für die erforderlichen Schadensanierungen.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Schneider, U. und Haksever, A.: Modellierung der Brandentwicklung in Räumen – State of the Art Report. Forschungsbericht, Kassel, Aug. 1984.
- [2] Schneider, U.; Hosser, D.; Max, U.: Nachweisverfahren für den Brandschutz in Kernkraftwerken. Forschungsbericht, Kassel, Okt. 1986.
- [3] Schneider, U.: Properties of Materials at high Temperatures – Concrete. Rilem-Bericht 44-PHT, 2. Auflage, Universität Kassel, Juni 1986.
- [4] Schneider, U. u. Nägele, E.: Repairability of Fire Damaged Structures. Draft Report CIB W14/88/23 (FRG), Kassel, Jan. 1988.
- [5] Martin, H.: Zeitlicher Verlauf der Chloridionenwanderung im Beton, der einem PVC-Brand ausgesetzt war. Betonwerk + Fertigteil-Technik 41, H. 1, S. 19–24 u. H. 2, S. 89–95, Jan./Febr. 1975.
- [6] Hupfeld, J.: Erkennung, Bewertung und Beseitigung der durch Brandgase an Bauteilen entstehenden Korrosionsfolgeschäden. Vortrag: Haus der Technik, Essen, April 1987.