

# **Weiterentwicklung der Zonenmethode für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von rechteckigen Stahlbetondruckgliedern**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
**Marcus Achenbach**  
aus Münchberg

Gutachter: Prof. Dr. Guido Morgenthal  
Prof. Dr. Tom Lahmer  
Prof. Dr. Jochen Zehfuß

Tag der Disputation: 29.08.2018

## **Vorwort und Danksagung**

Die vorgelegte Arbeit entstand im Rahmen einer externen Promotion am Lehrstuhl „Modellierung und Simulation – Konstruktion“ der Fakultät für Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar. Ohne das Verständnis und die Liebe meines Sohnes und die Einräumung der nötigen Freiräume durch meinen Vorgesetzten Herrn Dr.-Ing. Ulrich Leißner wäre diese Arbeit nicht entstanden. Bei meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Guido Morgenthal bedanke ich mich für die wertvollen Anregungen und den Mut, mir als „Externem“ eine Chance zu geben. Für die Durchsicht des Manuskriptes bedanke ich mich bei Frau Dr. rer. nat. Regina Bühl, Herrn Dr.-Ing. Michael Cyllok, Herrn Dr.-Ing. Hans-Georg Timmler und Frau Prof. Dr. jur. Beatrix Weber.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung in die Heißbemessung . . . . .	1
1.2	Problemstellung . . . . .	4
1.3	Zielsetzung und Methodik . . . . .	6
1.4	Aufbau . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft</b>	<b>9</b>
2.1	Einleitung . . . . .	9
2.2	Brandeinwirkung entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve . . . . .	9
2.3	Materialeigenschaften . . . . .	10
2.3.1	Verhalten von Normalbeton bei erhöhten Temperaturen . . . . .	10
2.3.2	Physikalische Eigenschaften von Normalbeton . . . . .	11
2.3.3	Thermische Dehnung von Normalbeton . . . . .	14
2.3.4	Mechanische Eigenschaften von Normalbeton bei erhöhten Temperaturen . .	15
2.3.4.1	Versuchsmethoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Beton . . . . .	15
2.3.4.2	Mechanische Eigenschaften von druckbeanspruchtem Beton bei erhöhten Temperaturen nach DIN EN 1992-1-2 . . . . .	17
2.3.4.3	Mechanische Eigenschaften von druckbeanspruchtem Beton bei erhöhten Temperaturen nach Gernay und Franssen . . . . .	19
2.3.4.4	Mechanische Eigenschaften von druckbeanspruchtem Beton bei erhöhten Temperaturen nach Anderberg und Thelandersson . . . . .	21
2.3.5	Verhalten von Betonstahl bei erhöhten Temperaturen . . . . .	23
2.3.6	Thermische Dehnung von Betonstahl . . . . .	24
2.3.7	Mechanische Eigenschaften von Betonstahl bei erhöhten Temperaturen . . .	24
2.4	Allgemeines Verfahren nach DIN EN 1992-1-2 . . . . .	26
2.5	Zonenmethode nach Hertz . . . . .	29
2.5.1	Druckglieder . . . . .	29
2.5.2	Biegebeanspruchte Querschnitte . . . . .	33
2.5.3	Validierung der Zonenmethode nach Hertz . . . . .	34
2.6	Erweiterungen der Zonenmethode für brandbeanspruchte Stahlbetondruckglieder . .	35
2.6.1	Erweiterung nach Zilch, Müller und Reitmayer . . . . .	35
2.6.2	Erweiterung nach Cyllok und Achenbach . . . . .	37
2.7	Versuche an vierseitig beflammt, rechteckigen Stahlbetonstützen . . . . .	39
2.7.1	Einführung . . . . .	39
2.7.2	Versuche an der TU Braunschweig . . . . .	39

2.7.3	Versuche an der Université de Liège und der Gent Universiteit . . . . .	40
2.7.4	Versuche am National Research Council Canada . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Methodische Grundlagen</b>	<b>43</b>
3.1	Einleitung . . . . .	43
3.2	Thermische Analyse . . . . .	43
3.2.1	Geometrisch eindimensionale Querschnitte . . . . .	43
3.2.2	Geometrisch zweidimensionale Querschnitte . . . . .	45
3.2.3	Validierung . . . . .	47
3.3	Mechanische Analyse . . . . .	48
3.3.1	Mechanische Analyse von Querschnitten . . . . .	48
3.3.1.1	Spannungsergebnissen bei der erweiterten Zonenmethode nach Cyllok und Achenbach . . . . .	48
3.3.1.2	Spannungsergebnissen beim allgemeinen Verfahren . . . . .	49
3.3.1.3	Dehnungszustand unter Berücksichtigung des instationären Tem- peraturkriechens . . . . .	50
3.3.1.4	Momenten-Krümmungsverhalten . . . . .	51
3.3.2	Mechanische Analyse von Druckgliedern . . . . .	52
3.3.2.1	Übertragungsverfahren . . . . .	52
3.3.2.2	Verfahren nach Kordina und Quast . . . . .	54
3.3.3	Validierung der mechanischen Analyse . . . . .	56
3.4	Statistische Versuchsauswertung . . . . .	58
3.4.1	Einleitung . . . . .	58
3.4.2	Ausreißertest nach Grubbs . . . . .	58
3.4.3	Anpassungstest nach Anderson und Darling . . . . .	58
3.5	Probabilistische Analyse . . . . .	59
3.5.1	Monte-Carlo-Simulation . . . . .	59
3.5.2	Auswahl der Zufallszahlen . . . . .	60
3.5.3	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman . . . . .	61
3.5.4	Globale Sensitivitätsanalyse . . . . .	62
3.5.5	Antwortflächen . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Überprüfung der Annahmen der Zonenmethode</b>	<b>65</b>
4.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	65
4.2	Methodik . . . . .	65
4.3	Ergebnisse . . . . .	66
4.3.1	Verminderte Festigkeiten der vereinfachten Rechenverfahren . . . . .	66
4.3.2	Vernachlässigung der thermischen Dehnungen und Berücksichtigung der tem- peraturabhängigen Druckfestigkeit des Betons . . . . .	68
4.3.3	Zentrische Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonwände . . . . .	70
4.3.4	Biegesteifigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonwände . . . . .	71
4.4	Zusammenfassung . . . . .	75

<b>5</b>	<b>Weiterentwicklung der Zonenmethode</b>	<b>77</b>
5.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	77
5.2	Vorschlag zur Weiterentwicklung der Zonenmethode . . . . .	78
5.2.1	Verringerung der Festigkeit des Betonstahls . . . . .	78
5.2.2	Verfahren zur Bemessung brandbeanspruchter Stahlbetondruckglieder . . . . .	79
5.3	Validierung des Modells bezüglich der Querschnittstragfähigkeit . . . . .	80
5.4	Last-Verformungsverhalten . . . . .	82
5.5	Zusammenfassung . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Kalibrierung der thermischen und mechanischen Modelle</b>	<b>85</b>
6.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	85
6.2	Stand der Erkenntnisse . . . . .	86
6.3	Methodik . . . . .	87
6.4	Kalibrierung der thermischen Analyse . . . . .	87
6.5	Kalibrierung des allgemeinen Verfahrens . . . . .	90
6.6	Kalibrierung der weiterentwickelten Zonenmethode . . . . .	94
6.7	Zusammenfassung . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Zuverlässigkeitsanalyse brandbeanspruchter Stahlbetondruckglieder</b>	<b>97</b>
7.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	97
7.2	Stand der Erkenntnisse . . . . .	98
7.3	Methodik . . . . .	99
7.4	Untersuchte Systeme und Basisvariablen . . . . .	100
7.4.1	Statisches System und Querschnitte . . . . .	100
7.4.2	Basisvariablen . . . . .	100
7.5	Grenzzustandsfunktion . . . . .	103
7.6	Untersuchungen an Stahlbetonwänden . . . . .	104
7.7	Untersuchungen an Stahlbetonstützen . . . . .	110
7.8	Zusammenfassung . . . . .	117
<b>8</b>	<b>Anwendung der weiterentwickelten Zonenmethode auf asymmetrisch beflamnte Querschnitte</b>	<b>119</b>
8.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	119
8.2	Stand der Erkenntnisse . . . . .	119
8.3	Methodik . . . . .	121
8.4	Ergebnisse . . . . .	121
8.4.1	Vergleichsberechnungen an einseitig beflamnten Stahlbetonwänden . . . . .	121
8.4.2	Nachrechnung von Laborversuchen an dreiseitig beflamnten Stahlbetonbalken	124
8.4.3	Nachrechnung von Laborversuchen an dreiseitig beflamnten Stahlbetonstützen	127
8.5	Zusammenfassung . . . . .	132
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>135</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	135
9.2	Schlussfolgerungen . . . . .	137

9.3	Ausblick . . . . .	138
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>147</b>
A.1	Eingangswerte der Versuche an allseitig brandbeanspruchten Stahlbetonstützen . . .	147
A.2	Vergleichsberechnungen der Zonenmethode mit dem allgemeinen Verfahren an Wandstreifen . . . . .	149
A.3	Nachrechnung von Laborversuchen an Stahlbetonstützen . . . . .	151
A.4	Probabilistische Analyse . . . . .	153
A.5	Nachrechnung von Laborversuchen an dreiseitig beflamnten Stahlbetonbalken und -stützen . . . . .	157

# Verzeichnis der Abkürzungen

Bezeichnungen, die nicht in der Liste aufgeführt sind, werden im laufenden Text erklärt.

## Lateinische Buchstaben

$a_{z,EI}$	Breite der „zermürbten“ Zone zur Modellierung der mittleren Biegesteifigkeit
$a_{z,f}$	Breite der „zermürbten“ Zone zur Modellierung der mittleren Festigkeit
$b$	Querschnittsbreite
$B$	Biegesteifigkeit
$c_p$	spezifische Wärmekapazität
$e$	Ausmitte
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
$f_{ck}$	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen
$f_{yk}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls
$h$	Querschnittshöhe
$k_c(\theta)$	Reduktionsfaktor der Betondruckfestigkeit $f_{c,\theta}/f_{ck}$
$k_s(\theta)$	Reduktionsfaktor der Betonstahlfestigkeit $f_{s,\theta}/f_{yk}$
$K$	Anzahl der Basisvariablen
$N$	Stichprobenumfang
$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
$r_S$	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman
$s^2$	Stichprobenvarianz
$S_i$	Sobolindex erster Ordnung für die Variable $i$
$S_{Ti}$	Sobolindex („total effect“) für die Variable $i$
$t_{cal}$	berechnete Versagenszeit
$t_{exp}$	experimentelle Versagenszeit
$t_f$	Beflammungsdauer
$T$	Temperatur
$u$	Feuchtegehalt
$X_m$	Unsicherheit des mechanischen Modells
$X_t$	Unsicherheit der thermischen Analyse
$z$	Zufallszahl zwischen 0 und 1

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\beta$	Zuverlässigkeitsindex
$\varepsilon$	Emissivität der Oberfläche eines Bauteils
$\varepsilon_{th,c}$	thermische Dehnung des Betons

## Inhaltsverzeichnis

$\epsilon_{th,s}$	thermische Dehnung des Betonstahls
$\eta$	Verhältnis von rechnerischer Versagenszeit $t_{cal}$ zu experimenteller Versagenszeit $t_{exp}$
$\eta_t$	Verhältnis von rechnerischer Temperatur $T_{cal}$ zu experimenteller Temperatur $T_{exp}$
$\theta_c$	Betontemperatur
$\theta_s$	Betonstahltemperatur
$\lambda_c$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Stephan-Boltzmann-Konstante ( $= 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ )
$\sigma_c$	Betonspannung
$\sigma_s$	Stahlspannung

### Indizes

$c$	Beton
$cal$	berechneter Wert
$fi$	im Brandfall
$E$	Einwirkung
$exp$	experimentelles Ergebnis
$R$	Widerstand
$s$	Betonstahl

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in die Heißbemessung

Stahlbetonbauteile werden bei Brandeinwirkung erwärmt. Es stellt sich eine ungleichmäßige Temperaturverteilung ein; d. h., die thermischen Dehnungen der einzelnen Querschnittsfasern sind ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Mit steigender Temperatur nimmt die Entfestigung der Baustoffe Beton und Betonstahl zu; es stellt sich eine ungleichmäßige Festigkeitsverteilung im Querschnitt ein. Sowohl die thermischen Dehnungen als auch die Entfestigung der Baustoffe beeinflussen die Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonbauteile.

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonstützen werden daher ungefähr seit 1930 [35, 97] Versuche unter genormter Brandeinwirkung durchgeführt. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, werden diese entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve beflammt: der zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung der Heißgase im Brandraum ist genau definiert. Dabei deckt die Einheits-Temperaturzeitkurve näherungsweise die Spitzentemperaturen typischer Brände in Wohn- und Bürogebäuden ab [97]. Allerdings nehmen bei natürlichen Bränden die Temperaturen im Brandraum ab, nachdem die Brandlast verbraucht ist, während bei der Einheits-Temperaturzeitkurve die Temperaturen stets zunehmen. Die Zeit bis zum Versagen des belasteten Bauteils bei Brandbeanspruchung durch die Einheits-Temperaturzeitkurve ist als Feuerwiderstandsdauer definiert. Die experimentell bestimmten Feuerwiderstandsdauern werden in die Feuerwiderstandsklassen R30 bis R240 eingeordnet. So wird beispielsweise für eine Stahlbetonstütze mit einer experimentell bestimmten Feuerwiderstandsdauer von 34 min die Feuerwiderstandsklasse R30 bestimmt.

Die systematische Erforschung der physikalischen Eigenschaften von Beton und Betonstahl bei erhöhten Temperaturen wird ungefähr seit 1950 durchgeführt [68, 85]. Insbesondere die Arbeiten von Anderberg und Thelandersson [3] zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung und die umfangreichen experimentellen Untersuchungen von Schneider [85] sind richtungsweisend für die Modellierung von Beton bei Brandbeanspruchung. Die Ergebnisse Schneiders [85] zum Verhalten von Normalbeton bei erhöhten Temperaturen sind nach wie vor Stand der Wissenschaft und werden – neben anderen experimentellen Befunden – im Stand der Normung berücksichtigt [30]. Die Entwicklung eines mechanischen Modells zur Beschreibung des Verhaltens von Bauteilen bei Brandbeanspruchung wurde ungefähr 1970 begonnen [68] und endet in der Entwicklung des allgemeinen Verfahrens. Dieses Verfahren besteht aus der thermischen und mechanischen Analyse: die mechanische Analyse setzt die Kenntnis der Temperaturverteilung im Querschnitt voraus. Bei der mechanischen Analyse werden die thermischen Dehnungen der einzelnen Querschnittsfasern berücksichtigt und die temperaturabhängigen Stoffgesetze ausgewertet. Eine Rückkopplung von der mechanischen Analyse zur thermischen Analyse, wie sie beispielsweise beim Abplatzen von Beton auftreten kann, wird jedoch im Allgemeinen nicht verfolgt. Das allgemeine Verfahren, das die thermische und die mechanische Analyse umfasst, gilt durch die Nachrechnung von Laborversuchen als validiert [35]

und ist allgemein in Wissenschaft und Praxis anerkannt [30, 68].

Da das allgemeine Verfahren nur numerisch angewendet werden kann, wurden ungefähr seit Ende der 1970er Jahre vereinfachte Rechenverfahren für Stahlbetonbauteile entwickelt [9, 68]. Diese werden in Deutschland jedoch kritisch bewertet: so wurde deren Eignung als Berechnungsverfahren anfangs gänzlich infrage gestellt [93]. Nach umfangreichen Vergleichsrechnungen mit dem allgemeinen Verfahren werden die vereinfachten Rechenverfahren zumindest für Biegebauteile als ausreichend genau und sicher betrachtet [44, 47], während die Anwendung für Stahlbetondruckglieder weiterhin kritisch gesehen wird [45]. Somit ist das allgemeine Verfahren – neben den tabellierten Werten – das zurzeit einzige anerkannte Verfahren zur Heißbemessung von Stahlbetondruckgliedern.

Die Entwicklung eines vereinfachten, aber möglichst allgemeingültigen Rechenverfahrens, bzw. die Weiterentwicklung eines bestehenden Rechenverfahrens ist nach Meinung des Verfassers wünschenswert und Motivation für die vorliegende Arbeit. Das allgemeine Verfahren ist als nichtlineares, numerisches Verfahren zur Nachrechnung von Versuchen entwickelt worden: bei gegebenem Querschnitt, Belastung und Beflammungsdauer wird damit die Feuerwiderstandsdauer rechnerisch bestimmt. Bei der Bemessung von Stahlbetonquerschnitten bei gegebener Feuerwiderstandsdauer soll jedoch die Bewehrungsfläche ermittelt werden. Dies ist beim allgemeinen Verfahren nur iterativ möglich: die Bewehrungsfläche des ersten Iterationsschrittes muss bekannt sein und wird ggf. solange vergrößert, bis die gewünschte Feuerwiderstandsdauer erreicht ist. Bei der baupraktischen Anwendung erfolgt daher zunächst die Bemessung bei Raumtemperatur. Die dabei ermittelte Bewehrung wird dann bei der anschließenden Heißbemessung übernommen. Das allgemeine Verfahren kann somit als Erweiterung der nichtlinearen Verfahren bei Raumtemperatur betrachtet werden.

Nachdem das allgemeine Rechenverfahren als anerkanntes Referenzverfahren betrachtet wird, ist jedes alternative Verfahren relativ dazu zu sehen und zu bewerten. Im Folgenden werden daher die in dieser Arbeit berücksichtigten Bewertungsgrundsätze vorgestellt. Diese umfassen die Modellbildung, die Validierung und Kalibrierung sowie die Beurteilung des Sicherheitsniveaus und sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

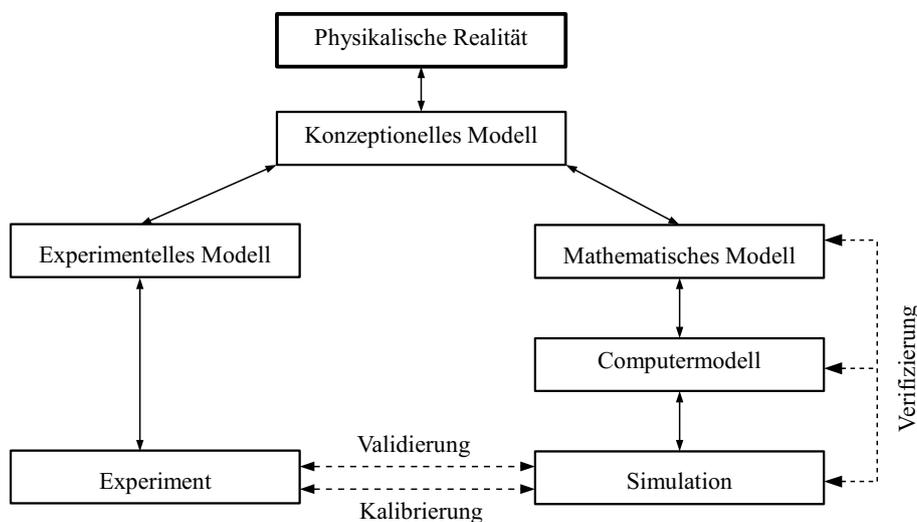


Abbildung 1.1: Prozesse im Modellierungsprozess, in Anlehnung an [8, 51, 58]

Mit dem mathematischen Modell wird der Übergang von der physikalischen Realität – dem beobachteten Phänomen – zur mathematischen Beschreibung geschaffen [51, 58]. Dabei sind die Annahmen und getroffenen Vereinfachungen der mathematischen Beschreibung darzulegen, weil dadurch der Anwendungsbereich des Modells bestimmt ist.

Dieses Modell wird durch die Nachrechnung von Laborversuchen validiert [58]. Dabei ist zu beachten, dass das gewählte Experiment nur teilweise die Realität abbilden kann. Dies gilt insbesondere für brandbeanspruchte Bauteile, da die zur Verfügung stehenden Prüfstände aufgrund der Brandeinwirkung nur begrenzte Abmessungen haben und kaum Versuche an größeren Bauteilen wie Rahmen möglich sind.

Durch die Nachrechnung von Laborversuchen wird bestätigt, dass das untersuchte Modell die physikalische Wirklichkeit ausreichend genau beschreibt. Die zulässigen Abweichungen der Modellantwort vom beobachteten Versuchsergebnis werden zuvor definiert und können nicht allgemeingültig angegeben werden, da die Versuchsdurchführung statistischen Streuungen unterworfen ist.

Im Gegensatz zur Validierung durch die Nachrechnung von Versuchen beschreibt die Verifizierung die genaue Überprüfung der Implementierung der mathematischen Formulierung des Modells in ein Computerprogramm [47, 58]. Zehfuß merkt an, dass eine Verifizierung den vollständigen Nachweis der korrekten Umsetzung umfasst [47]. Nachdem dies bei iterativen Verfahren kaum möglich ist, folgert er daraus, dass es keine Verifizierung in diesem Zusammenhang geben kann, sondern nur eine Validierung. Zehfuß erweitert den Begriff der Validierung daher auf den Abgleich mit bekannten mathematischen Lösungen von physikalischen Problemen, wie sie beispielsweise aus der Wärmeleitung bekannt sind. Zusätzlich definiert er Validierungsbeispiele, die dadurch gekennzeichnet sind, dass eine eindeutige Lösung für ein genau definiertes physikalisches Phänomen bei gegebenen Randbedingungen existiert. Er benutzt dabei das allgemeine Verfahren als Referenz zur Vorgabe der Lösungen der Validierungsbeispiele für Programme zur Heißbemessung. In dieser Arbeit wird daher der Begriff der Validierung sowohl für den Abgleich mit Laborversuchen als auch mit Ergebnissen des allgemeinen Verfahrens verwendet.

Mit der Validierung wird der Nachweis erbracht, dass das betrachtete Modell zur Beschreibung des physikalischen Phänomens geeignet ist. Die dabei erreichte Genauigkeit bzw. die Quantifizierung der Abweichungen wird durch die Kalibrierung bestimmt. Dazu werden die statistischen Kennzahlen der Abweichung der berechneten Modellantwort  $X_{cal}$  vom gemessenen Laborergebnis  $X_{exp}$  bestimmt [8, 17, 31]. Unter der Annahme, dass diese Abweichungen proportional zu den Parametern von Versuch und Nachrechnung sind, wird das Verhältnis von  $X_{cal}/X_{exp}$  statistisch ausgewertet. Je genauer das betrachtete Verfahren ist, um so näher liegt der Mittelwert von  $X_{cal}/X_{exp}$  bei eins und um so geringer ist die Streuung um den Mittelwert.

Aus der Kalibrierung eines Modells können keine Rückschlüsse auf die Empfindlichkeit gegenüber den statistischen Streuungen der berücksichtigten Variablen gemacht werden. Dies erfolgt durch eine Sensitivitätsanalyse [84], bei der die Variablen, die den größten Anteil an der Streuung der Ergebnisse haben, bestimmt werden. Die Unsicherheit der Ergebnisse wird durch die Parameterunsicherheit und die Modellunsicherheit bestimmt [51]. Die Streuung der Variablen des Modells wird als Parameterunsicherheit bezeichnet, während die Streuungen, die durch die „Ungenauigkeit“ des Modells bedingt sind, als Modellunsicherheit bezeichnet werden. Bei Versuchen an brandbeanspruchten Stahlbetonstützen werden Streuungen der experimentell bestimmten Feuerwiderstandsdauer bei gleichen Ver-

suchsrandbedingungen beobachtet [35]. Dies lässt auf einen größeren Einfluss der Modellunsicherheit schließen, da Streuungen der Eingabewerte durch Messung dieser eliminiert werden. Beim Vergleich von Berechnungsmodellen zur Heißbemessung sollte daher die Modellunsicherheit als maßgebender Parameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse identifiziert werden.

Bei der Prognose der Zuverlässigkeit brandbeanspruchter Stahlbetondruckglieder wird das allgemeine Verfahren als Referenz betrachtet [38, 48]. Jedes andere Modell ist daher relativ dazu zu sehen, wobei in dieser Arbeit die prognostizierte Versagenswahrscheinlichkeit als Maß für die Bewertung herangezogen wird. Das betrachtete alternative Verfahren wird als ausreichend sicher eingestuft, wenn die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit die des allgemeinen Verfahrens überschreitet.

Obige Ausführungen zur Bewertung von Ingenieurmodellen können in der These, dass ein Berechnungsverfahren „genau“ und „sicher“ sein soll, zusammengefasst werden. Das Maß der Genauigkeit wird durch die Bestimmung der statistischen Kennzahlen im Rahmen der Kalibrierung bestimmt. Die Forderung ausreichender Sicherheit wird durch die Prognose der Zuverlässigkeit und den Vergleich mit einem allgemein anerkannten Referenzverfahren erbracht.

## 1.2 Problemstellung

Der Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonstützen wurde bis zur bauaufsichtlichen Einführung der Eurocodes nach DIN 4102, Teil 4 [15] geführt. Dazu wurden die vorhandenen Achsabstände und Querschnittsabmessungen mit den in Tabelle 31 angegebenen Mindestdicken und Mindestachsabständen für die erforderliche Feuerwiderstandsklasse verglichen. Der Nachweis für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer war erbracht, wenn diese Mindestmaße nicht unterschritten wurden. Tabelle 31 beruht auf der Auswertung von Versuchen an Stahlbetonstützen, die mit der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102, Teil 2 [14] getestet wurden. Zur Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse wurden mindestens zwei Stützen getestet, wobei das ungünstigste Ergebnis maßgebend war. Die angegebenen Feuerwiderstandsklassen erlaubten eine Zuordnung zu den Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung.

Mit der bauaufsichtlichen Einführung der Eurocodes stehen für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonbauteilen [21], die entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve [18] beflammt werden, drei Nachweisformate zur Verfügung. Der Nachweis der Feuerwiderstandsdauer kann durch Einhaltung von tabellierten Werten, durch vereinfachte oder durch allgemeine Bemessungsverfahren erbracht werden. Für den Nachweis von einzelnen Bauteilen wie Stützen stehen alle drei Nachweisformate zur Verfügung. Die Analyse von gesamten Bauwerken ist den allgemeinen Verfahren vorbehalten. Die Zuordnung der Nachweisformate zu den einzelnen Analysetypen ist in Abbildung 1.2 dargestellt.