



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**10. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

11. März 2019

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:

Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus
Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau verfügbar (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB>).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort	7
Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht Sicherheitskonzept für Belastungsversuche	9
Mai Häßler Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen	23
Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung	33
Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph Belastungsprüfung der Geschosdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz	45
Volker Wetzck, Claudia Pahlow Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss	59
Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton	71
Jens Heinrich, Reinhard Maurer Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken	83
Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion	97
Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern	109
Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn	123
Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring	135
Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover	147
Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ...	161

Keynote lecture

Sicherheitskonzept für Belastungsversuche

Steffen Marx¹, Jürgen Grünberg², Gregor Schacht³

Kurzfassung. Für die Bewertung der Standsicherheit bestehender Bauteile oder Bauwerke bedarf es häufig Informationen, die nur durch eine Bestandserfassung oder -beprobung gewonnen werden können. Die integralste Form der experimentellen Bewertung im Bestand stellt der klassische Belastungsversuch dar, da so direkt und zerstörungsfrei die Tragsicherheit nachgewiesen werden kann. Problematisch ist allerdings die Übertragung der Ergebnisse eines oder weniger durchgeführter Versuche auf andere, nicht beprobte Bauteile. Dieser Beitrag diskutiert existierende Bewertungsmethoden und stellt einen neuen Ansatz für die Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Übertragung von Versuchsergebnissen auf nicht direkt beprobte Bauteile vor.

Vorab: Teile dieses Beitrages wurden erstmals in [1] veröffentlicht.

1 Einführung

Belastungsversuche haben sich seit vielen Jahren als erfolgreiche Methode bewährt, um die oft schwierige bis unmögliche rechnerische Nachweisführung umzunutzender Bestandsbauten zu ergänzen [2], [3]. Der Belastungsversuch weist nach, dass das untersuchte Bauteil für eine definierte Beanspruchung ausreichend tragsicher ist. Die Größe der im Versuch einzutragenden Belastung einschließlich des Eigengewichts ist die Versuchszielast F_{Ziel} , die sich aus den nachzuweisenden Lasten (inkl. aller Sicherheiten) ergibt. Eine Überbeanspruchung des Bauteils muss ausgeschlossen werden, was durch die kontinuierliche Überwachung der Bauteilreaktionen während des Versuchs sichergestellt wird [4], [5].

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden die durchzuführenden Versuche auf eine minimale Anzahl begrenzt. Die zu beurteilende Grundgesamtheit ergibt sich aus allen gleichartigen Bauteilen eines Bauwerks oder Bauwerksteiles. Die Auswahl einer repräsentativen Stichprobe ist schwierig und meist können aus bautechnischen oder betrieblichen Gründen nur bestimmte Bauteile experimentell untersucht werden. Diese ausgewählte Stich-

¹ Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

² em. Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

³ Dr.-Ing., Marx Krontal Partner, Hannover

probe von Bauteilen wird im Belastungsversuch belastet und das Tragverhalten messtechnisch erfasst und bewertet. Anschließend sollen die Ergebnisse dieser Versuche auf alle anderen gleichartigen Bauteile übertragen werden. Für diese Übertragung müssen zusätzliche Sicherheitselemente berücksichtigt werden, die auf die aufzubringenden Versuchszielasten aufgeschlagen werden. Um den Nachweis für alle (auch die nicht unmittelbar getesteten) Bauteile zu erfüllen, wird also eine erhöhte Versuchsbelastung aufgebracht, die die Streuungen der Widerstände der Bauteile abdecken muss.

Im einfachsten Fall wird an einem Bauteil gezeigt, dass dieses die x -fache Last ohne Anzeichen einer Schädigung erträgt, und dann geschlussfolgert, dass alle anderen Bauteile deshalb sicher die 1-fache Last abtragen können.

Es ist einleuchtend, dass ein Nachweis an einem einzigen Bauteil mit einer sehr hohen Versuchslast, z. B. der dreifachen Gebrauchslast, ausreichend Sicherheit beinhaltet, um die nicht beprobten Bauteile mit zu bewerten. Allerdings ist dieses Vorgehen in der Praxis nicht immer sinnvoll, da die Tragreserven der zu untersuchenden Bauteile ja theoretisch erschöpft sind und eine evtl. unnötig hohe Versuchslast eher zu einem Versagen als zu einem Erhalt führt. Deshalb ist es häufig zielführender, mehrere Bauteile mit einer nicht ganz so hohen Belastung zu testen.

Hier wird das Spannungsfeld deutlich: Wie viele Bauteile müssen mit welcher Belastung untersucht werden, damit eine zuverlässige Bewertung auch der nicht direkt beprobten Bauteile möglich ist?

Im Rahmen eines von der Forschungsinitiative *Zukunft Bau* unterstützten Vorhabens [6] konnte eine Umfrage zu den Erfahrungen in der Anwendung der existierenden Richtlinie für Belastungsversuche [4] durchgeführt werden. Dabei wurde auch abgefragt, wie in der Praxis mit der Bestimmung der Mindestanzahl der zu prüfenden Bauteile umgegangen wird. Die Ergebnisse sind in Bild 1 dargestellt. Das Diagramm stellt der Anzahl geprüfter

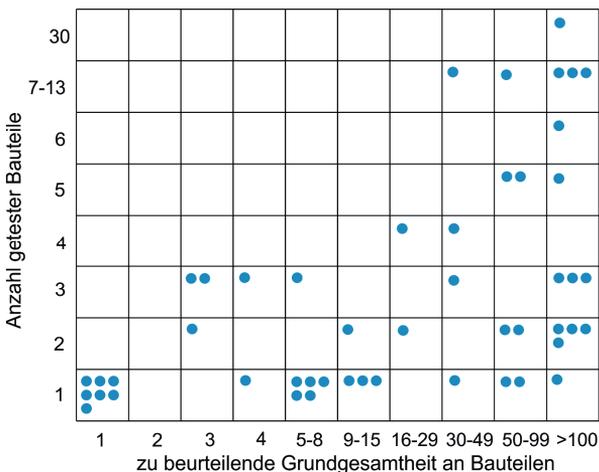


Bild 1 Zusammenhang zwischen Stichprobe und Grundgesamtheit der geprüften Bauteile [6]

Bauteile die Anzahl der insgesamt zu bewertenden Grundgesamtheit gegenüber, wobei jeder Punkt für eine angegebene Realisierung steht. Die Darstellung dokumentiert die Regelungslücke und die Unsicherheit der Praxis. Obwohl scheinbar keine Klarheit besteht, gab es bisher aber auch keine größeren Schadensfälle, was offenbar auf die großen vorhandenen Reserven in der Tragfähigkeit zurückzuführen ist.

Mit Blick auf Bild 1 wird deutlich, dass bei Belastungsversuchen die Anzahl der geprüften Bauteile immer auf ein Minimum begrenzt wird, da:

- jeder Versuch mit hohen finanziellen und zeitlichen Aufwänden verbunden ist und
- die baulichen Randbedingungen eine umfängliche Prüfung einer großen Anzahl von Bauteilen i. A. nicht zulassen.

Die Hauptschwierigkeit der Sicherheitsbewertung ergibt sich dadurch, dass beim Nachweis der Tragsicherheit keine explizite Tragwerkseigenschaft ermittelt, sondern ausschließlich nachgewiesen wird, dass die konkret aufgebrachte Belastung ertragen wurde. Damit ist zwar klar, dass es noch eine Reserve bis zur Tragfähigkeit gibt, aber diese kann i. A. nicht quantifiziert werden.

2 Sicherheitstheoretische Konzepte zur versuchsgestützten Bemessung

Die Bewertung von Versuchsergebnissen mit Hilfe statistischer Verfahren ist heute eine grundlegende Aufgabe von Bauingenieuren. Gerade die Arbeit an bestehenden Bauwerken erfordert die Bewertung der Ergebnisse von Material- oder Bauwerksuntersuchungen. Da umfangreiche Beprobungen zu einer Zerstörung des zu bewertenden Bauteils führen würden, müssen die gesuchten statistischen Eigenschaften der Grundgesamtheit anhand von Stichprobenergebnissen geschätzt werden. Dieser Schluss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit wird in der Stichprobentheorie behandelt.

Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Beurteilung von Materialeigenschaften auf Grundlage der Ergebnisse einer experimentellen Beprobung beim Bauen im Bestand, z. B. [7], [8]. Dabei zeigte sich, dass die Verfahren bei größeren Stichproben (Stichprobenumfang $n > 9$) zuverlässig funktionieren, aber gerade für die übliche kleine Stichprobe ($3 \leq n \leq 5$) erhebliche Schwächen aufzeigen. Bei $n \leq 3$ ist eine statistische Bewertung grundsätzlich ausgeschlossen.

Für die Behandlung weniger Versuchsergebnisse sind Schätzungen zu ungenau, liefern quasi „schlechte“ Ergebnisse. Aus diesem Grund werden oft ingenieurmäßige Methoden angewendet, die allerdings keinen stufenlosen Übergang in das aktuell gültige stochastische Sicherheitskonzept erlauben.

Existierende Modelle der Bewertung der Ergebnisse von Belastungsversuchen können hinsichtlich ihres stochastischen Charakters unterteilt werden in deterministisch, semi-probabilistisch, probabilistisch und werden in [1] ausführlich vorgestellt und erläutert:

- Zerlegung von Teilsicherheitsbeiwerten,
- versuchsgestützte Bemessung (Eurocode 0 [9], Anhang D),
- Versagenswahrscheinlichkeit (Bayes, s. [1]),
- Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlprobelastungen.

Bisher konnte sich keine der oben angeführten Methoden in der Praxis durchsetzen. Die Gründe dafür liegen in der Verwendung nicht sinnvoller bzw. nicht zutreffender Modelle oder in einer gänzlich fehlenden mathematischen Modellvorstellung. Nachfolgend wird deshalb noch einmal die spezielle Situation bei Belastungsversuchen analysiert und darauf aufbauend ein auf der Wahrscheinlichkeitstheorie basierendes Übertragungskonzept entwickelt, das sich durch statistische Informationen über den Bestand kalibrieren lässt. Das Ziel dieser Herleitung ist, ein im Vergleich zur rechnerischen Bemessung ähnliches Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

3 Neues Konzept zur Bestimmung von Übertragungsbeiwerten

In Bild 2 sind die Verteilungsdichtefunktionen für Einwirkung und Widerstand sowie die für die Bemessung von Tragwerken gültigen semi-probabilistischen Sicherheitselemente dargestellt. Der rechnerische Nachweis findet dabei am sogenannten Bemessungspunkt, d. h. mit um Teilsicherheitsbeiwerte erhöhten bzw. reduzierten charakteristischen Werten der Einwirkung und des Widerstandes, statt. Die Grundgesamtheit wird theoretisch als unendlich groß betrachtet. Die Grundgesamtheit der Bauteile, auf die das Ergebnis eines Belastungsversuchs übertragen werden soll, ist jedoch endlich (Bild 1). Unter der Annahme, dass

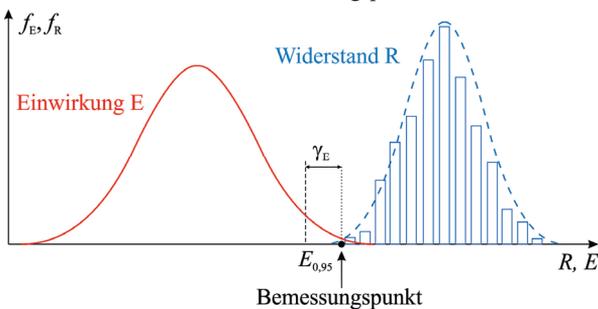
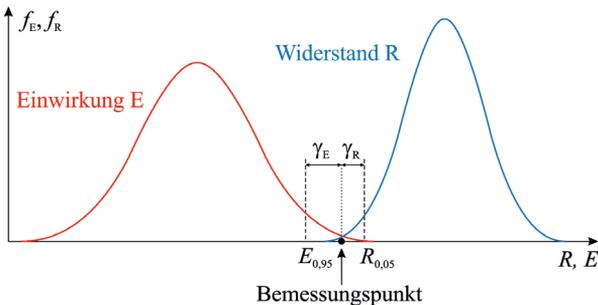


Bild 2 Sicherheitsvorstellung im Bauwesen

alle zu bewertenden Bauteile getestet und bis zum Bruch belastet würden, könnte die theoretische Verteilungsdichtefunktion durch ein reales Histogramm ersetzt werden (Bild 2 unten). Mit dieser Vorgehensweise könnte die ertragbare Belastung auf Basis des auch für den Neubau gültigen Sicherheitskonzeptes ermittelt werden.

Praktisch wäre diese Vorgehensweise – das Testen aller vorhandenen Bauteile bis zum Bruch – natürlich unsinnig. Bei einem Belastungsversuch werden daher nur sehr wenige Bauteile der Grundgesamtheit getestet, und dies in der Regel nicht bis zum Eintreten des Versagens. Die entscheidende Frage lautet nun: Wo befindet sich das getestete Bauteil innerhalb des tatsächlichen Streubandes des Widerstandes? Diese Frage kann aus dem Versuch nicht deterministisch beantwortet werden, es sind jedoch Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Angenommen, aus der in Bild 3 dargestellten Grundgesamtheit werden zwei Bauteile bis zur Versuchszielast getestet und beide Bauteile versagen im Versuch nicht. Dann könnten diese beiden getesteten Bauteile zufällig einen hohen Widerstand haben (Fall A) und das Histogramm des Bauteilwiderstands wäre linksseitig der Versuchsergebnisse angeordnet (rot dargestellt). Im Fall B (blau dargestellt) läge der tatsächliche Widerstand der meisten Bauteile oberhalb der Versuchszielast (grün in Bild 3). Beide Fälle sind möglich, eine Unterscheidung der Fälle ist anhand des Belastungsversuchs jedoch nicht möglich. Für eine sichere Bewertung der Ergebnisse wäre der Fall A kritisch, denn dabei würde der tatsächliche Widerstand der meisten Elemente der Grundgesamtheit überschätzt werden. Wie groß ist aber die Wahrscheinlichkeit für den sehr kritischen Fall A – also dass für den Versuch genau die Bauteile ausgewählt werden, die zufällig einen sehr hohen Tragwiderstand besitzen?

Diese Frage lässt sich mit Hilfe des sogenannten „Urnenmodells ohne Zurücklegen“ sehr anschaulich beantworten. Die im Bild 4 dargestellten 40 Kugeln repräsentieren 40 Deckenkonstruktionen. Unter der Annahme, dass der Widerstand der Bauteile theoretisch normalverteilt ist, gibt es 38 Kugeln, die einen Widerstandswert kleiner als das 95%-Quantil des Widerstandes $R_{0,95}$ besitzen, und genau 2 Kugeln, die theoretisch einen größeren Widerstand haben.

Für die gegebene Situation lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass bei n zufällig ausgewählten Deckenelementen eine bestimmte Anzahl der Versuche eine definierte Grenzlast er-

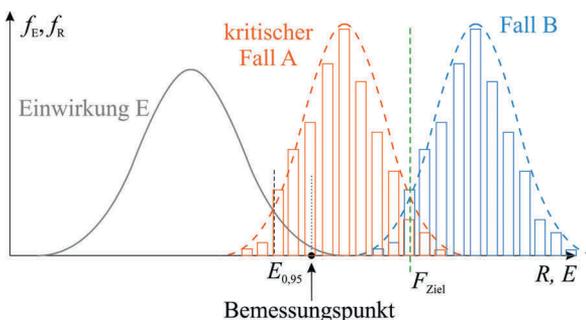


Bild 3 Unsicherheit über die Lage der Versuchszielast bzgl. der Verteilungsdichte des Widerstandes

reicht, mit Hilfe der hypergeometrischen Verteilung H ermitteln. Mit dieser Verteilung wird die Wahrscheinlichkeit P berechnet, dass in einer Stichprobe X mit n Elementen k Elemente einen Widerstandswert größer als $R_{0,95}$, besitzen.

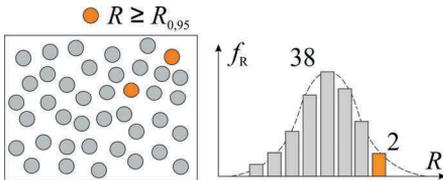


Bild 4 Anzahl von Elementen mit einem Widerstand größer als $R_{0,95}$

$$H(k | N; M; n) := P(X = k) = \frac{\binom{M}{k} \cdot \binom{N-M}{n-k}}{\binom{N}{n}} \quad (1)$$

Dabei sind:

- N Anzahl der Elemente der Grundgesamtheit
- M Anzahl der Elemente der Grundgesamtheit mit bestimmter Eigenschaft
- n Stichprobenumfang
- k Anzahl der Elemente der Stichprobe mit bestimmter Eigenschaft

Zu einer falschen Interpretation des Ergebnisses der Belastungsversuche würde man dann gelangen, wenn alle zufällig ausgewählten Elemente überleben, der Großteil der Elemente jedoch versagen würde. Für diesen Sonderfall kann $P(X = k = n)$ als Irrtumswahrscheinlichkeit für die richtige Interpretation des Versuchsergebnisses bezeichnet werden.

Für das Beispiel mit $N = 40$ und $M = 2$ beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass alle zufällig ausgewählten Versuchskörper einen Widerstand oberhalb des 95%-Quantils aufweisen, bei einem Versuch

$$P(X = k) = \frac{\binom{2}{1} \cdot \binom{40-2}{1-1}}{\binom{40}{1}} = 0,05 \quad (2)$$

und bei zwei Versuchen analog 0,001282.

Würde die aufgebrauchte Versuchsziellast reduziert, zum Beispiel so, dass sie nur den Mittelwert des Bauteilwiderstandes repräsentieren würde ($M = 20$ bzw. $M/N = 50\%$), dann wäre die Irrtumswahrscheinlichkeit bei einem Versuch

$$P(X = k) = \frac{\binom{20}{1} \cdot \binom{40-20}{1-1}}{\binom{40}{1}} = 0,50 \quad (3)$$

und bei zwei Versuchen analog $P(X = k) = 0,24359$.

Ein zur Bemessung vergleichbares Sicherheitsniveau erhält man gemäß [9], Anhang D dann, wenn bei der Anwendung statistischer Methoden ein Konfidenzniveau von 75 % zugrundegelegt wird. Für den Fall, dass kein Versuch zu einem Versagen eines Bauteils führt ($n = k$), entspricht die Versuchsziellast dann mit 12,5 % Irrtumswahrscheinlichkeit mindestens dem Ziel-Quantil des Widerstands der Grundgesamtheit (Bild 5).

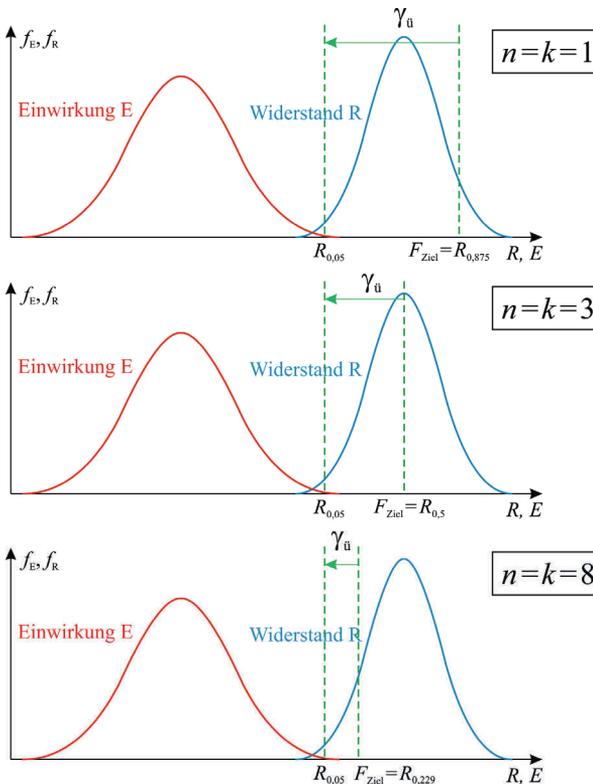


Bild 5 Mindestquantilwert, als den die Versuchsziellast in Abhängigkeit von der Anzahl der Versuche interpretiert werden darf, bei 12,5 % Irrtumswahrscheinlichkeit, für große N

Für das Beispiel der 40 Platten darf also die Versuchsziellast bei einem Teilversuch als 87,5-%-Quantil, bei zwei Teilversuchen als 64,6-%-Quantil und bei drei Teilversuchen als 50-%-Quantil des Bauteilwiderstands der Grundgesamtheit interpretiert werden. Für große Grundgesamtheiten N sind die entsprechenden Mindestquantilwerte R_q , die im Versuch

nachzuweisen sind, in Abhängigkeit von der Anzahl n der durchgeführten Bauteilversuche in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 Nachgewiesene Quantilwerte des Widerstandes in Abhängigkeit von der Versuchszahl

$n = k$	M/N	Erforderlicher Quantilwert q	$z_k(q) = -\Phi^{-1}(q)$
1	0,125	87,5-%-Quantil	1,150
2	0,354	64,6-%-Quantil	0,376
3	0,500	50,0-%-Quantil	0
5	0,660	34,0-%-Quantil	-0,412
8	0,771	22,9-%-Quantil	-0,742
10	0,812	18,8-%-Quantil	-0,886
20	0,901	9,9-%-Quantil	-1,289
50	0,959	4,1-%-Quantil	-1,742

Dabei sind:

- q Quantilwert
- z_k Quantil der Standardnormalverteilung des Quantilwertes
- $\Phi^{-1}(q)$ Inverse der Standardnormalverteilung bei q

Der Übertragungsfaktor $\gamma_{\bar{u},k}$ lässt sich zunächst als der Abstand zwischen dem nachgewiesenen Quantilwert R_q und dem charakteristischen 5-%-Quantil $R_{k,0,05}$ definieren. Damit kann dieser bei lognormalverteilten Bauteilwiderständen nach [10] über den Mittelwert μ_R und den Variationskoeffizienten V_R wie folgt ausgedrückt werden:

$$\gamma_{\bar{u},k} = \frac{R_q}{R_{k,0,05}} = \frac{\mu_R \cdot \exp(z(q) \cdot V_R)}{\mu_R \cdot \exp(-1,645 \cdot V_R)} \quad (4)$$

Ist nun die Verteilungsfunktion des Widerstandes (Streuungen, Art der Verteilung) bekannt, kann von der Versuchsziellast unmittelbar auf den Bemessungspunkt geschlussfolgert werden. Da man aus den Versuchen keinerlei Informationen über die Verteilung des Widerstandes erhält (ein Versagen der getesteten Bauteile ist i. A. ausgeschlossen), muss die Streuung des Widerstandes über zusätzliche Informationen über das Bestandsbauwerk ermittelt werden. So kann die voraussichtliche Versagensart zum Beispiel durch Berechnungen und mit Hilfe von Bauzustandsuntersuchungen gewonnen werden. Der Gesamtübertragungsbeiwert $\gamma_{R,\bar{u}}$, mit dem die Bemessungslasten multipliziert werden müssen, ergibt sich durch Zurückrechnung vom charakteristischen Widerstandswert auf den Bemessungspunkt (Bild 6).

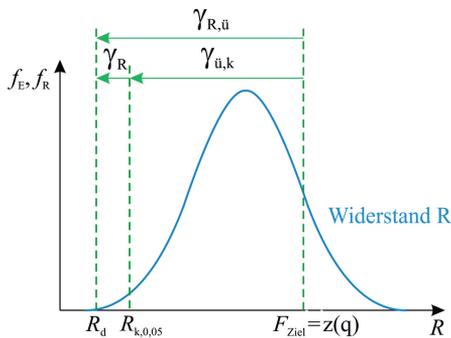


Bild 6 Definition des Gesamtübertragungsbeiwertes $\gamma_{R,\bar{u}}$ der Widerstandsseite

Damit ergeben sich:

$$E_d = F_{Ziel} \leq R_d = \frac{R_{k,0,05}}{\gamma_R} \quad (5)$$

$$F_{Ziel} \leq \frac{R_q}{\gamma_{\bar{u},k} \cdot \gamma_R} \quad (6)$$

$$\gamma_{R,\bar{u}} = \gamma_{\bar{u},k} \cdot \gamma_R = \frac{R_q}{R_d} = \frac{\mu_R \cdot \exp(z(q) \cdot V_R)}{\mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} \quad (7)$$

Wenn die maßgebende Versagensart der zu untersuchenden Bauteile zuverlässig abgeschätzt werden kann, dürfen die auch für die Bemessung üblichen Annahmen getroffen werden [9]. Grundsätzlich dürfen die Widerstandsgrößen demnach als normal- oder log-normalverteilt angenommen werden. Auch die Variationskoeffizienten dürfen bei entsprechender Voruntersuchung als bekannt vorausgesetzt werden. Die Gesamtübertragungsbeiwerte können in Abhängigkeit von der Anzahl der Versuche, der maßgebenden Versagensart und der Streuung des Bauteilwiderstandes in Tabelle 2 abgelesen werden.

Für Tabelle 2 wurden die Annahmen gemäß [9] für die Variationskoeffizienten bei Stahl- oder Betonversagen getroffen. Der Variationskoeffizient für Betonzugversagen mit $V_R = 0,2$ wurde [11] entnommen und kann für Versagensarten verwendet werden, welche hauptsächlich durch die Zugfestigkeit des Betons beeinflusst sind (z. B. Querkraftversagen bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung). Außerdem wurde mit einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,2$ gearbeitet, der gemäß [12] an gewisse Voraussetzungen geknüpft ist (z. B. Schadensfreiheit usw.).

Zum Vergleich des hier vorgestellten Konzepts sind in Tabelle 2 in Klammern auch die Übertragungsbeiwerte angegeben, welche sich gemäß EC0 [9], Anhang D, für die Versagensart Betondruckversagen bei einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,2$ ergeben würden. Es wird deutlich, dass das hier vorgestellte Konzept bei wenigen Versuchen zu höheren und bei vielen Versuchen zu niedrigeren Übertragungsbeiwerten führt.

Tabelle 2 Gesamtübertragungsbeiwerte $\gamma_{R,\bar{u}}$ zur Übertragung auf ungeprüfte Bauteile

n = k	Gesamtübertragungsbeiwerte $\gamma_{R,\bar{u}}$ in Abh. der maßgebenden Versagensart		
	Stahlzug $V_R = 0,07$	Betondruck $V_R = 0,167$	Betonzug $V_R = 0,20$
1	1,30	1,86 (1,58)	2,10
2	1,23	1,63 (1,45)	1,80
3	1,20	1,53 (1,40)	1,67
4	1,18	1,47 (1,38)	1,59
5	1,16	1,43 (1,37)	1,54
6	1,15	1,40 (1,35)	1,50
7	1,14	1,38 (1,35)	1,46
8	1,14	1,36 (1,34)	1,44
9	1,13	1,34 (1,33)	1,42
10	1,12	1,32 (1,33)	1,40
20	1,10	1,24 (1,32)	1,29
50	1,06	1,15 (1,31)	1,18

4 Übertragungsbeiwerte bei kleiner Grundgesamtheit

Tabelle 2 wurde auf Grundlage der Werte aus Tabelle 1 ermittelt und gilt damit unabhängig von der Anzahl der zu beurteilenden Bauteile N. Für große Grundgesamtheiten N sind die angegebenen Werte sinnvoll. In vielen Fällen ist jedoch die Anzahl der zu begutachtenden Elemente klein.

Wird beispielsweise bei einer Grundgesamtheit von zwei baugleichen Decken nur eine Decke getestet, so wäre die Versuchsziellast für das Bauteil nach Tabelle 1 als 87,5%-Quantil des Widerstands zu interpretieren. Der Gesamtübertragungsbeiwert (Tabelle 2) müsste dann für die Annahme berechnet werden, dass das nicht getestete Bauteil einen erheblich schlechteren Tragwiderstand aufweist, nämlich kleiner als das 5%-Quantil, nochmals reduziert um den Teilsicherheitsbeiwert. Es ist offensichtlich, dass die Übertragung auf sehr wenige Elemente einer Grundgesamtheit treffsicherer sein dürfte, also eines geringeren Übertragungsbeiwerts bedarf, als die Übertragung auf sehr viele Elemente.

Auch wenn statistische Verfahren bei kleinen Stichproben versagen, kann die im Vorfeld beschriebene Methodik verwendet werden, um auch für diese Fälle ingenieurmäßig sinnvoll reduzierte Übertragungsfaktoren zu bestimmen. Dazu wird davon ausgegangen, dass auch der Bauteilwiderstand einer kleinen Grundgesamtheit generell der Verteilungsscharakteristik großer Grundgesamtheiten entspricht. Damit kann für jedes Bauteil die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, dass sein Widerstand ober- oder unterhalb eines bestimmten Quantilwerts liegt. Zu einer falschen Interpretation eines Versuchs käme man, wenn zufällig *alle* getesteten Bauteile oberhalb eines bestimmten oberen Quantilwerts lie-

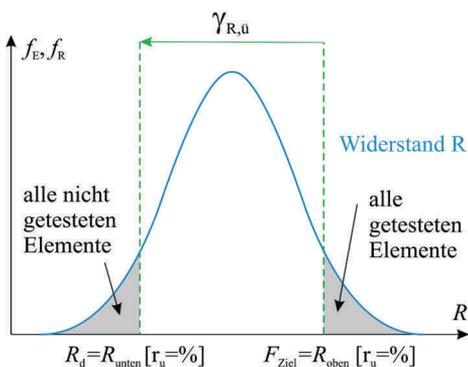
gen und *gleichzeitig mindestens ein* nicht getestetes Bauteil einen Widerstand unterhalb eines unteren Quantilwerts aufweist. Die erstgenannte Annahme entspricht dem Vorgehen gemäß Abschnitt 3, mit der zweiten Annahme werden jedoch auch die nicht getesteten Elemente mit einer ähnlichen Methodik bewertet.

Mithilfe von Entscheidungsbäumen (s. Bild 7) lässt sich die Wahrscheinlichkeit P der falschen Versuchsinterpretation auf anschauliche Weise ermitteln. Die Wahrscheinlichkeit, dass *alle* n getesteten Bauteile einen Widerstand R oberhalb des Quantilwerts r_{oben} aufweisen, beträgt

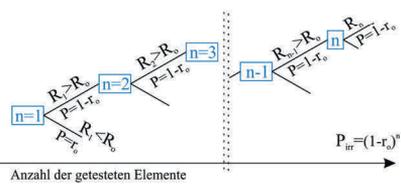
$$P(R_{1...n} > R_{oben}) = (1 - r_{oben})^n \tag{8}$$

r_{oben} ist dabei der zugehörige Prozentwert zu R_{oben} . Aus Gl. (8) folgt

$$r_{oben} = 1 - P_{irr,oben}^{(1/n)} \tag{9}$$



Ereignisbaum dafür, dass alle getesteten Elemente $R > R$, haben



Ereignisbaum dafür, dass bei N-1 nicht getesteten Elementen mindestens 1 Element einen Widerstand $R < R_u$, hat ... die dazu gehörige Gegenwahrscheinlichkeit ist, dass alle nicht getesteten Elemente $R > R_u$, haben

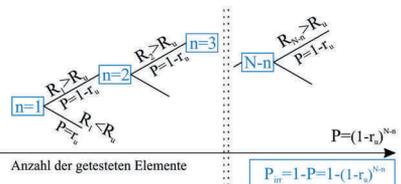


Bild 7 Ereignisbäume zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten

Die Wahrscheinlichkeit, dass *mindestens eines* der N-n nicht getesteten Bauteile einen kleineren Widerstand als R_{unten} aufweist, lässt sich einfacher durch die zugehörige Gegenwahrscheinlichkeit, nämlich dass *alle* Bauteile einen Widerstand größer als R_{unten} aufweisen, berechnen:

$$P(R_{N-n...N} > R_{unten}) = (1 - r_{unten})^{N-n} \tag{10}$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit P_{irr} dafür, dass *mindestens eines* der N-n nicht getesteten Bauteile einen kleineren Widerstand als R_{unten} aufweist, kann damit wie folgt ausgedrückt werden:

$$P(R_{N-n..N} > R_{unten}) = 1 - (1 - r_{unten})^{N-n} \quad (11)$$

Aus Gl. (11) folgt die zugehörige prozentuale Größe

$$r_{unten} = 1 - (1 - P_{irr,unten})^{1/(N-n)} \quad (12)$$

Akzeptiert man analog zu Abschnitt 3 gemäß EC0 [9], Anhang D, ein Konfidenzniveau von 75 %, so ist für die Bestimmung der Prozentwerte beider Prozentwerte r_{oben} und r_{unten} jeweils eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 12,5 % anzusetzen. Der Gesamtübertragungsbeiwert ergibt sich dann unmittelbar aus der Annahme einer Widerstandsverteilung entsprechend der maßgebenden Versagensart:

$$\gamma_{R,u} = \frac{\exp(\Phi^{-1}(r_{oben}) \cdot V_R)}{\exp(\Phi^{-1}(r_{oben}) \cdot V_R)} \quad (13)$$

wobei Φ die kumulative Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung ist.

In Tabelle 3 sind die so berechneten Übertragungsbeiwerte für Grundgesamtheiten von bis zu 20 Elementen aufgeführt. Bei großen Grundgesamtheiten gelten die Beiwerte aus Tabelle 2. In Bild 8 sind die Übertragungsfaktoren für verschiedene N und n beispielhaft für Betondruckversagen visualisiert.

Tabelle 3 Gesamtübertragungsbeiwerte $\gamma_{R,u}$ für die Übertragung auf nicht geprüfte Bauteile bei $N \leq 20$ bei zu erwartendem Betondruckversagen

N/n	1	2	3	5	8
1	1,0				
2	1,47	1,0			
3	1,56	1,29	1,0		
5	1,65	1,42	1,29	1,0	
8	1,71	1,49	1,38	1,24	1,0
10	1,74	1,52	1,41	1,29	1,14
20	1,83	1,60	1,50	1,39	1,29
∞ ($\beta = 3,2$)	1,86	1,63	1,53	1,43	1,36

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der beschriebenen, auf der Irrtumswahrscheinlichkeit basierenden Methodik können Beiwerte zur Übertragung der Versuchsergebnisse von geprüften auf nicht geprüfte Bauteile ermittelt werden. Mithilfe dieser Faktoren wird etwa das Sicherheitsniveau erreicht, welches auch der Bemessung neuer Tragwerke zugrunde liegt bzw. im EC0 [9], Anhang D, vorausgesetzt wird. Die Übertragungsfaktoren berücksichtigen sowohl das Verhältnis von

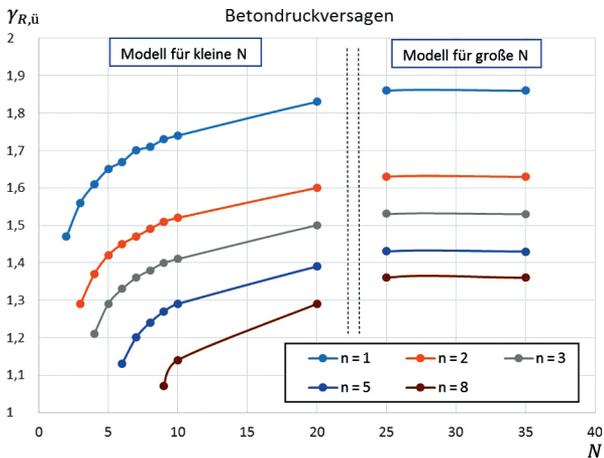


Bild 8 Übertragungsbeiwerte $\gamma_{R,\bar{u}}$ für beide Modelle im Vergleich für Betondruckversagen

Umfang der Stichprobe zur Grundgesamtheit als auch die Anzahl der durchgeführten Teilversuche.

Die im Beitrag beschriebene Methodik soll in der Neufassung der Richtlinie für Belastungsversuche berücksichtigt werden, womit eine wissenschaftlich begründete und gleichzeitig praxistaugliche Vorgehensweise zur Übertragung von Versuchsergebnissen auf die Grundgesamtheit vorliegen wird.

Literatur

- [1] Marx, S.; Grünberg, J.; Schacht, G.: Methoden zur Bewertung experimenteller Ergebnisse bei kleinem Stichprobenumfang. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 1, S. 2–13 – DOI: 10.1002/best.201800080
- [2] Schacht, G.; Bolle, G.; Marx, S.: Belastungsversuche – Internationaler Stand des Wissens. Bautechnik 93 (2016) 2, S. 85–97 – DOI: 10.1002/bate.201500097
- [3] Schacht, G.; Bolle, G.; Curbach, M.; Marx, S.: Experimentelle Bewertung der Schubtragsicherheit von Stahlbetonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 6, S. 343–354 – DOI:10.1002/best.201600006
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken. Berlin: Beuth, 2000
- [5] Schacht, G.; Bolle, G.; Marx, S.: Messen bei Querkraftversuchen. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2013) 12, S. 875–887
- [6] Marx, S.; Schacht, G.: Neufassung Richtlinie Belastungsversuche. Abschlussbericht, Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, gefördert durch: Forschungsinitiative Zukunft Bau, 2017

- [7] Weber, M.; Schwabach, E.; Schnell, J.: Bestimmung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei kleinem Stichprobenumfang – Hintergründe und Erläuterungen zur Neuregelung nach E DIN EN 13791/A20:2016. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 4, S. 188–199
- [8] Knab, F.; Sodeikat, C.: Die Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bauwerken im Bestand. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 8, S. 539–553
- [9] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung mit DIN EN 1990/NA:2010-12: Nationaler Anhang und DIN EN 1990/NA/A1:2012-08: A1-Änderung zum Nationalen Anhang.
- [10] Weber, M.; Caspeepe, R.; Schnell, J.; Glock, C.; Botte, W.: Das neue fib Bulletin 80 – Teilsicherheitsbeiwerte für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) 4, S. 264–274
- [11] Hansen, M.: Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen. Diss., Universität Hannover, 2004
- [12] Schnell, J.; Grünberg, J.; Stauder, F.; Fischer, A.: Begründung eines reduzierten Zuverlässigkeitsindex und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetontragwerke im Bestand. DBV-Heft 24 (2014)

Bildnachweise

Bilder 1–7 Gregor Schacht
Bild 8 Steffen Marx

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogieübertragungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.