

ZfPStatik – Messergebnisse rechenbar machen

Alexander TAFFE¹, Stefan KÜTTENBAUM², Stefan MAACK²

¹HTW - Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin

²BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kontakt E-Mail: alexander.taffe@htw-berlin.de

Kurzfassung. ZfPStatik bezeichnet die Verwendung von statistisch bewerteten Messergebnissen, die mit zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) gewonnen werden und in statischen Berechnungen zum Nachweis der Tragfähigkeit verwendet werden. Dazu ist die Ermittlung der Messunsicherheit der Versuchsdaten auf der Basis des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) der erste Schritt. Der statische Nachweis erfolgt durch Grenzzustandsgleichungen, die im Bauwesen angewandt werden. Diese müssen modifiziert werden, so dass jede Messgröße als Zufallsvariable in der Grenzzustandsgleichung vorhanden ist. Der statische Nachweis erfolgt mit probabilistischen Berechnungsmethoden aus der Zuverlässigkeitstheorie. Diese Vorgehensweise wird exemplarisch für den Standsicherheitsnachweis eines Plattenbalkenquerschnitts einer Stahlbetonbrücke auf Biegung angewandt. Auf die möglichen Schlussfolgerungen aus den probabilistischen Berechnungen wird abschließend kurz eingegangen.

1 Messunsicherheit als Grundlage zur Weiterverwendung von Messergebnissen

Die Ermittlung der Messunsicherheit ist für Prüflaboratorien ein Muss und unstrittig. Im Bauingenieurwesen tut man sich dagegen schwer mit dem Begriff der Messunsicherheit. Schließlich zielt der Nachweis der Tragfähigkeit von Bauwerken auf den Nachweis von deren *Sicherheit*. Auch wird ein sog. Sicherheitsindex bzw. Zuverlässigkeitsindex β bestimmt, auf den später noch eingegangen wird. Letztlich verwendet aber auch der Bauingenieur die Messunsicherheit, indem er bei Baustofffestigkeiten meist die 5%-Quantile anwendet. Dazu wird vom Mittelwert μ die mit dem Quantilwert k_p ($p = 5\%$) multiplizierte Standardabweichung σ abgezogen. Damit ist in den (früher als Nennfestigkeiten bezeichneten) charakteristischen Werten durchaus die Messunsicherheit berücksichtigt.

Damit Messergebnisse, die mit zerstörungsfreien *Prüfverfahren* im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) gewonnen werden, auch für *Prüfaussagen* verwendet werden können, muss deren Streuung statistisch bewertet werden. Dies geschieht auf der Basis des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, [1]), der mittlerweile auch im Bauwesen [2] und der Materialprüfung [3] Verwendung gefunden hat.

Grundvoraussetzung sind Überlegungen zur Genauigkeit von Prüfverfahren, die gemäß Abbildung 1 aus den Komponenten *Richtigkeit* und *Präzision* zusammengesetzt ist.



Dabei wird die *Richtigkeit* durch das *richtige* Einstellen des Messgeräts sichergestellt. Bei ZfPBau-Verfahren bedeutet das konkret bei der Betondeckungsmessung die Einstellung des *tatsächlich* vorhandenen Durchmessers des Betonstahls im Gerät. Bei Verfahren, die sich der Laufzeitmessung von Impulsen bedienen, z. B. Ultraschall oder Radar, muss die *tatsächlich* im Bauteil vorhandene Wellengeschwindigkeit durch Kalibrierung am Bauteil eingegeben werden.

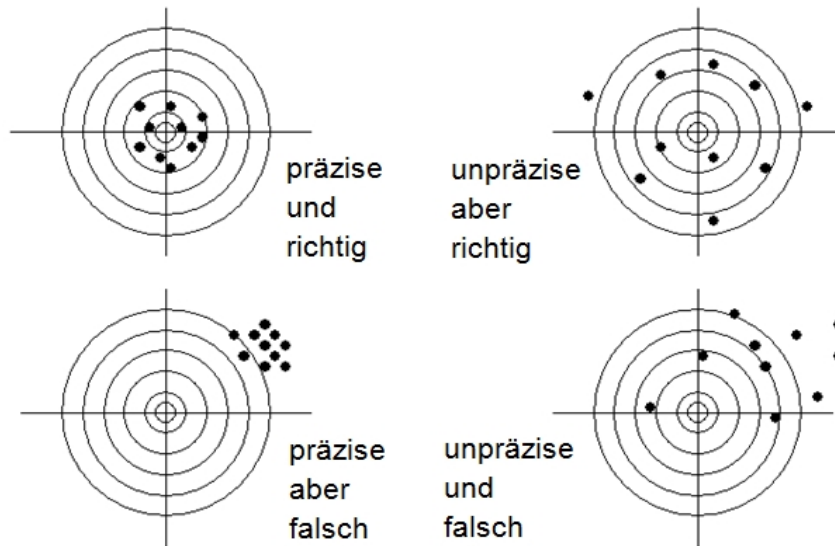


Abbildung 1 Genauigkeit eines Verfahrens als Zielscheibenmodell in Abhängigkeit von Richtigkeit und Präzision dargestellt (aus [4])

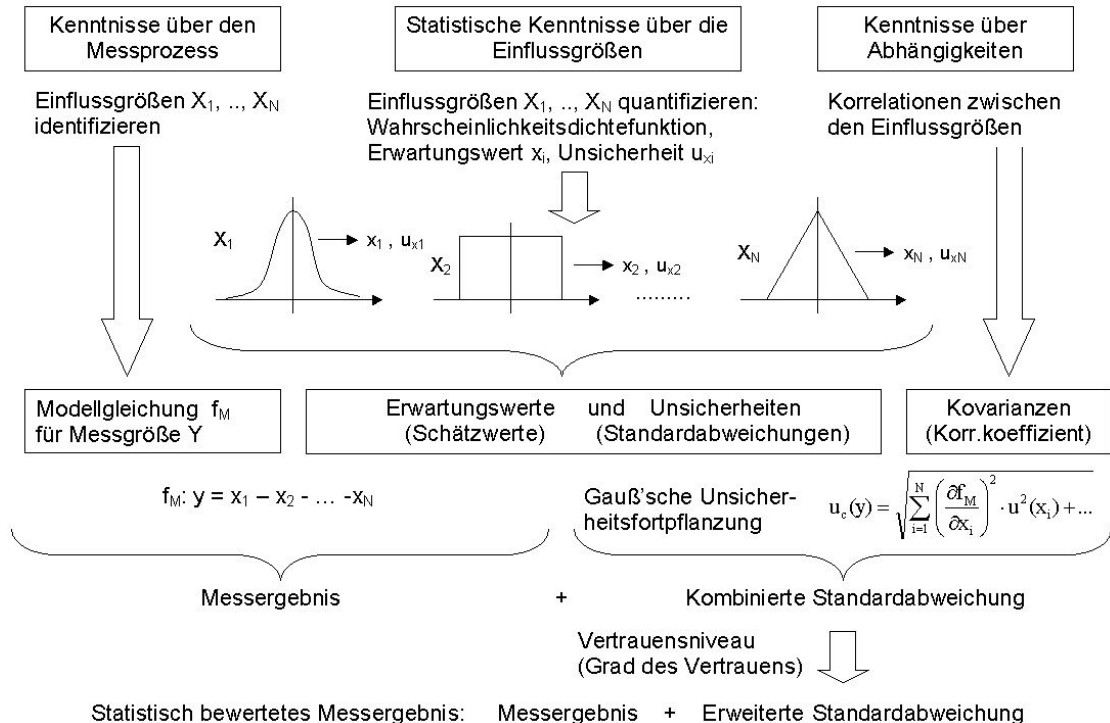


Abbildung 2 Zusammengefasstes Ablaufschema nach GUM [1] in Anlehnung an Sommer [6]: Die vorliegenden Kenntnisse aus dem Messprozess über Größen, die das Messergebnis beeinflussen, werden quantifiziert, so dass am Ende ein statistisch bewertetes Ergebnis vorliegt, das zuverlässige Schlussfolgerungen erlaubt.

Messungen zeigen, dass die Wellengeschwindigkeit und der Messvorgang an sich einer Streuung unterworfen sind, die die *Präzision* des Verfahrens widerspiegeln. Die *Präzision* eines Verfahrens wird durch die Ermittlung der Messunsicherheit nach dem als GUM bezeichneten „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ ([1]) angegeben. Dieser war in deutscher Sprache bisher als DIN V ENV 13005 erhältlich. Durch seine sehr allgemeine Formulierung ist er für eine Anpassung an Prüfaufgaben im Bauwesen gut geeignet. Die Grundidee des GUM besteht darin, vorliegende Kenntnisse über das Messverfahren quantitativ auszudrücken und zu einer kombinierten bzw. erweiterten Gesamtunsicherheit zusammenzufassen. Dieses Konzept wird von *Sommer* in [5] und [6] ausführlich beschrieben. In Abbildung 2 ist das Ablaufschema nach GUM zusammengefasst, mit dessen Hilfe am Ende ein statistisch bewertetes Ergebnis vorliegt, aus dem zuverlässige Schlussfolgerungen gezogen werden können. So wird beispielsweise eine ermittelte Bauteildicke mit einer Gesamtstandardabweichung versehen. Ein Statiker, der mit dieser ermittelten Bauteildicke einen statischen Nachweis führen muss, kann nun rückverfolgbar das Vertrauensniveau seiner in der Statik verwendeten Dicke (z. B. Mittelwert minus doppelte Standardabweichung ergibt ein Vertrauensniveau von rd. 95%) angeben. [7]

Nach Auffassung der Autoren wird der bildgebenden Darstellung in Zukunft, was die Weitergabe der Ergebnisse an den Kunden angeht, eine untergeordnete Rolle zukommen. Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist es Sache des ZfPBau-Experten aus den vielfältig darstellbaren Messergebnissen die wichtigen Elemente der inneren Konstruktion, z. B. die Lage von Bewehrung und Spanngliedern sowie die Lage der Rückwand, anzugeben und zusätzlich mit einer Messunsicherheit zu versehen. Ein solches „inneres Vermessen“ von Bauteilen wird künftig mit Werkzeugen der Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) möglich sein, die in Tablets und Smartphones bereits heute verfügbar sind. Es wird den Experten vorbehalten sein, dieses innere Vermessen mit neuartigen Hilfsmitteln durchzuführen und die Messunsicherheit zuverlässig und rückverfolgbar zu bestimmen.

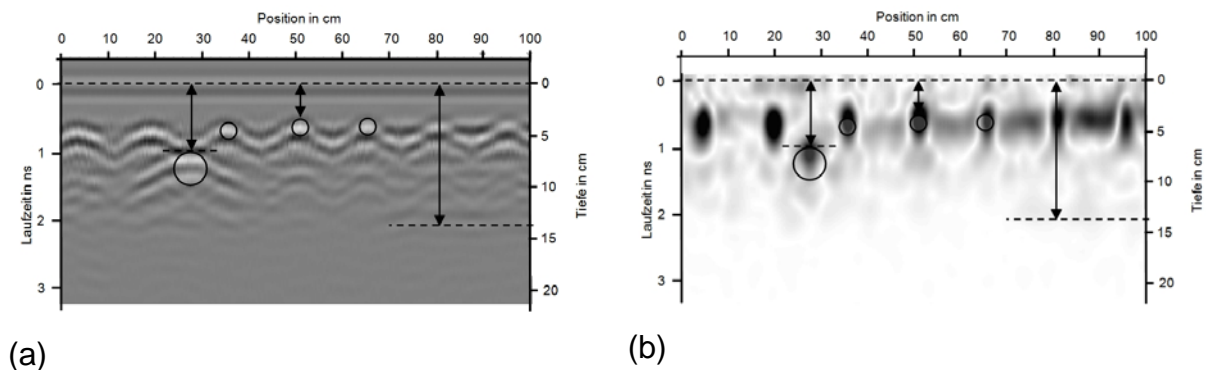


Abbildung 3 Radarmessergebnisse aus [8]: (a) Rohdaten und (b) migrierte Daten mit eingezeichneter Lage der Objekte der inneren Konstruktion. Für statische Berechnungen sind die Angabe der Tiefenlage bzw. der Bauteildicke mit der zugehörigen Messunsicherheit von Interesse. [7]

Damit nun ausreichend viele Kenntnisse zu erzielbaren Messunsicherheiten vorhanden sind, ist es erforderlich, systematische Untersuchungen mit möglichst vielen Randbedingungen (Variation der Bauteildicke, des Bewehrungsgehalts, der Einbautiefe und der Bewehrungsdurchmesser) durchzuführen. Diese Idee wurde bereits in [2] unter dem Begriff „*Fischer-Netz-Prinzip*“ erwähnt und wird im Rahmen der Forschung an der BAM im Fachbereich 8.2 aufgegriffen.

2 Statische Nachweise im Bauwesen und Einbinden von Messergebnissen

Die Grundidee statischer Nachweise im Bauwesen ist das Gegenüberstellen von einer Beanspruchung (E), z. B. Momente (Einheit kNm) durch Lasten, mit einem Bauteilwiderstand (R), z. B. durch Beton- oder Stahlfestigkeiten, die zusammen mit geometrischen Abmessungen ebenfalls Momente ergeben. Wenn die Einwirkung gleich dem Widerstand ist, so ist in diesem Zustand gerade noch die Tragfähigkeit gegeben; es gilt $R - E = 0$. Dieser Zustand wird als Grenzzustand (der Tragfähigkeit) bezeichnet.

In Gleichung (1) ist die Grenzzustandsgleichung für den Nachweis auf Biegung angegeben. In Rot sind die aus Messungen mit ZfPBau-Verfahren ableitbaren Größen angegeben. Im Folgenden wird nur auf die Größe d , der statischen Nutzhöhe, eingegangen, die aus der Bauteildicke h abzüglich der Betondeckung d_1 der Bewehrung abgeleitet wird, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Auf die Modellunsicherheiten Θ wird in diesem Beitrag nicht eingegangen, da sie durch Messungen nicht zu beeinflussen sind; Aufschluss darüber bietet [9].

Gleichung (1)

$$G = R - E = \Theta_{R,M} \cdot M_{Rd} - \Theta_{E,M} \cdot M_{Ed}$$

$$G = \Theta_{R,M} \cdot A_{s1} \cdot f_y \cdot d \left(1 - \frac{A_{s1} \cdot f_y}{2 \cdot \chi \cdot b \cdot d \cdot \alpha \cdot f_c} \right) - \Theta_{E,M} \cdot (M_G + M_Q)$$

Jede der Größen, z. B. die Stahlfestigkeit (Streckgrenze) f_y , die Betondruckfestigkeit f_c oder geometrische Größen wie der Stahlquerschnitt A_s , kann als streuende Größe aufgefasst werden, die durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (z. B. Normal-, Gumbelverteilung usw.) und Formparameter (z. B. Mittelwert und Standardabweichung bei der Normalverteilung) definiert werden müssen. Während über die Streuung von Materialfestigkeiten ausreichend statistische Kenntnisse vorliegen, ist dies für die Streuung der indirekten Messgröße „statische Nutzhöhe d “ nicht der Fall. Hier muss unter Berücksichtigung des Messverfahrens, des Baustoffs und der geometrischen Abweichungen auf der Basis des GUM, wie in Kap. 1 ausgeführt, die kombinierte Standardabweichung bestimmt werden. Diese Kenntnisse über die Streuung finden über das stochastische Modell Eingang in die Grenzzustandsgleichung.

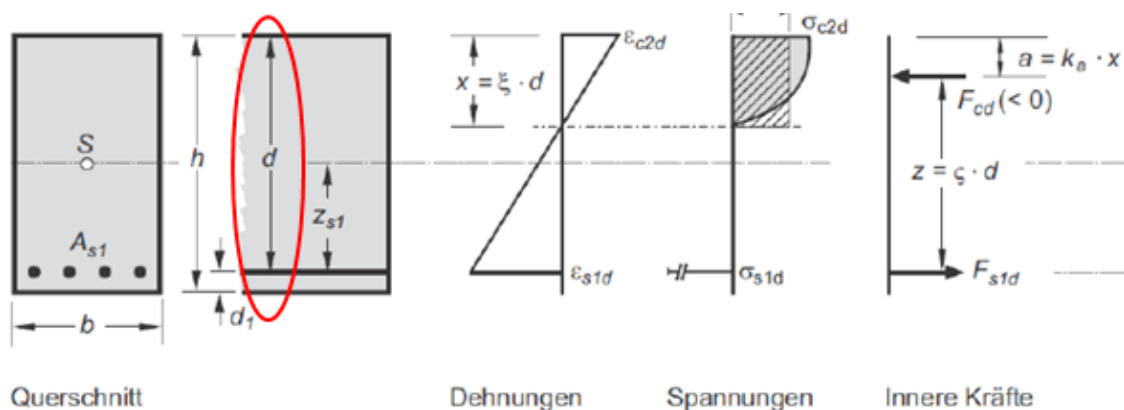


Abbildung 4 Spannungs- und Dehnungsverteilung am rechteckigen Balkenquerschnitt mit Darstellung der indirekten Messgröße d im Kontext des bei der Bemessung verwendeten inneren Hebelarms z (aus[10])

Die weiteren Rechenschritte werden mit geeigneten Computerprogrammen, in diesem Fall mit der Software STRUREL, ausgeführt. Dabei wird die

Grenzzustandsgleichung eingegeben, wobei für jede Eingangsgröße festzulegen ist, ob es sich um eine Konstante oder eine statistische Variable handelt, der dann wie oben beschrieben das Streuverhalten zugeordnet wird.

In [9] wird ausführlich dargelegt wie Gleichung (1) für den Nachweis auf Biegung auf den in Abbildung 5 dargestellten nicht vorgespannten Plattenbalkenquerschnitt (Stahlbeton) angewendet wird. Dazu ist die Festlegung gemäß Tabelle 1 der Konstanten und statistischen Variablen mit deren Verteilung, Mittelwert und Standardabweichung nötig. Diese Größen wurden nach eingehenden Überlegungen aus abgesicherten Literaturwerten und Erfahrungen festgelegt. Eine detaillierte Abhandlung darüber findet sich in [9]. Von besonderer Bedeutung hinsichtlich des angewendeten ZfPBau-Verfahrens Ultraschallecho ergibt sich als Variationskoeffizient v (Quotient der einfachen Standardabweichung durch den Mittelwert) für die Messung der statischen Nutzhöhe ein Wert von 3,2%. Wird die um den Faktor $k=2$ erweiterte Standardunsicherheit [1] herangezogen, folgt der Variationskoeffizient zu 6,4%. Sie liegt in der üblichen Größenordnung mit der Bauteildicken mit Ultraschallecho bestimmt werden können.

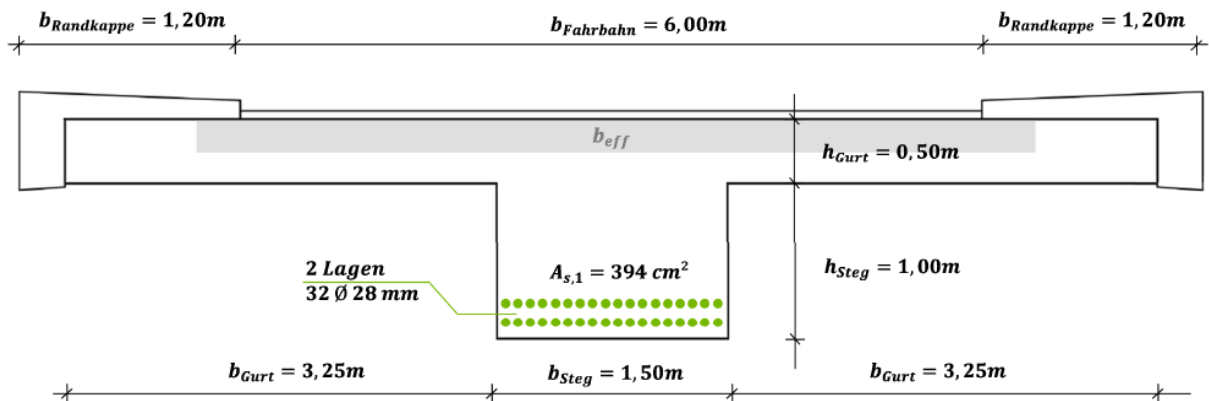


Abbildung 5 Gemäß [9] angesetzter Plattenbalkenquerschnitt einer Stahlbetonbrücke zum Nachweis der Biegung

Tabelle 1: Zusammenstellung aller Konstanten und statistischen Variablen des stochastischen Modells

| Abk. | Bedeutung ¹⁾ | Verteilung | ZfP ²⁾ | Mittelwert μ_{xi} | Standardabweichung σ_{xi} | v_{xi} |
|----------------|--|----------------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|
| $\theta_{R,M}$ | Modellunsicherheit bei den Widerständen | Log.-Normal | nein | 1,20 | 0,18 | 15,0 % |
| A_{s1} | Stahlquerschnitt | Normal | möglich | 0,0394 m ² | 0,00079 m ² | 2,0 % |
| f_y | Streckgrenze | Log.-Normal | nein | 530 000 kN/m ² | 15 000 kN/m ² | 3,0 % |
| d | stat. Nutzhöhe | Normal | GUM ³⁾ | 1,40 m | 0,09 m | 3,2 % |
| χ | Abminderungsbeiwert (Spannungsblock) | konstant | nein | 0,95 | – | – |
| b_{ges} | Breite des Querschnittes | konstant | NP | 8,00 m | – | – |
| b_{Steg} | Stegdicke | Normal | GUM ³⁾ | 1,50 m | 0,069 m | 2,3 % |
| l | Länge | konstant | NP | 20,00 m | – | – |
| α | Abminderungsbeiwert (Beton) | konstant | nein | 0,85 | – | – |
| f_c | Betondruckfestigkeit | Normal | möglich | 40 000 kN/m ² | 3 000 kN/m ² | 7,5 % |
| $\theta_{E,M}$ | Modellunsicherheit bei der Beanspruchung | Log.-Normal/Normal ⁴⁾ | nein | 1,00 | 0,07 | 7,0 % |
| h_{Gurt} | Plattenhöhe | Normal | GUM ³⁾ | 0,50 m | 0,015 m | 1,5 % |
| h | Höhe des Querschnittes | Normal | GUM ³⁾ | 1,50 m | 0,096 m | 3,2 % |
| ρ_{Beton} | Betonrohddichte | Normal | nein | 23,22 kN/m ³ | 0,518 kN/m ³ | 2,2 % |
| ρ_{Stahl} | Stahlrohddichte | Normal | nein | 77,00 kN/m ³ | < 0,770 kN/m ³ | < 1,0 % |
| M_Q | Biegemoment aus LM 1 | Gumbel (T = 50a) | nein | 5796 kNm | 870 kNm | 15,0 % |

*Gemäß GUM-Konvention handelt es sich in der Tabelle um die mit 2 erweiterte Standardabweichung

Gibt man die Daten aus Tabelle 1 in die Grenzzustandsgleichung von Gleichung (1) ein, so erhält man das in Abbildung 6 dargestellte Kreisdiagramm mit den zugehörigen Sensitivitätskoeffizienten. Dieses Diagramm zeigt die maßgeblichen Einflussgrößen auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β (hier 5,0), der in direktem Zusammenhang mit der Versagenswahrscheinlichkeit (hier $3 \cdot 10^{-7}$) steht, die mit einer Forderung kleiner 10^{-6} eingehalten ist. Hier soll nur auf die Größe der Sensitivitäten in Abbildung 6 eingegangen werden, deren quadrierte Werte aufaddiert 1 ergeben und somit den Einfluss der jeweiligen Größe am Gesamtergebnis zeigen. Negative Werte werden der Einwirkungsseite und positive Werte der Widerstandsseite zugeordnet. Betrachtet man das Kreisdiagramm so fällt auf, dass die Messgrößen aus Ultraschall, die hier erläuterte statische Nutzhöhe d und die nicht weiter beschriebene Querschnittshöhe gegenüber den beiden Modellunsicherheiten und dem Biegemoment infolge des Verkehrslastmodells kaum ins Gewicht fallen.

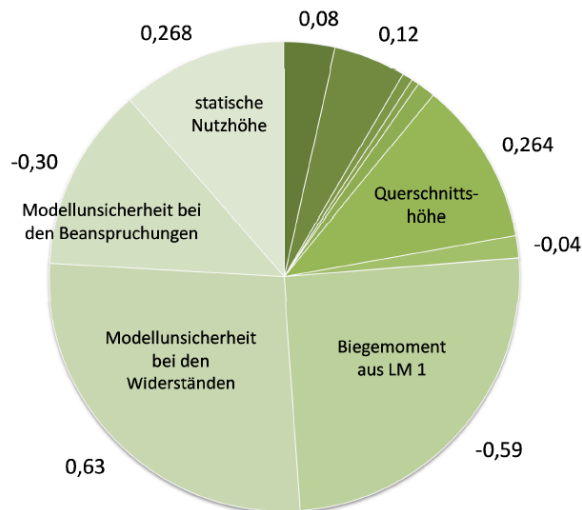


Abbildung 6 Sensitivitätsfaktoren aller Zufallsvariablen und deren Einfluss auf den berechneten Sicherheitsindex β [9]

Der geringe Anteil der „ZfPBau-Größe“ statische Nutzhöhe d zeigt, dass die vorhandene Messunsicherheit – ausgedrückt durch einen Variationskoeffizienten von 6,4% - nur einen vertretbar geringen Anteil der Sensitivitätskoeffizienten am Gesamtergebnis bewirkt. Damit ist Ultraschall zur Tiefenlagenmessung an einem Stahlbetonquerschnitt mit den üblichen Messunsicherheiten als „konkurrenzfähig“ einzustufen. Die großen Sensitivitätskoeffizienten der Modellunsicherheiten liegen im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus und können durch Messungen am Bauwerk nicht ohne weiteres beeinflusst werden.

3 Schlussfolgerungen für Anwendbarkeit von ZfPBau-Verfahren

Wie zum Ende von Kap. 2 gezeigt, trägt der hier verwendete Variationskoeffizient von 6,4% nur gering zum Ergebnis bei. Mit der verwendeten Software STRUREL ist es durch eine Parametervariation des Variationskoeffizienten möglich, die Auswirkung eines veränderten Streuverhaltens einer Zufallsvariable auf das Ergebnis des Zuverlässigkeitsindex β darzustellen. Nimmt man eine größere Messunsicherheit an, die dann einen größeren Variationskoeffizienten zur Folge hat, sinkt der Zuverlässigkeitsindex durch die damit verbundenen schlechteren Kenntnisse, die sich aus Messungen am Bauwerk nunmehr mit größerer Unsicherheit gewinnen lassen.

Das Ergebnis einer solchen Parametervariation ist in Abbildung 7 dargestellt. Die angesetzten 6,4% des Variationskoeffizienten sind blau markiert. Selbst eine Zunahme auf 10% würde noch zu einem Zuverlässigkeitsindex $\beta > 3,8$ (Zielzuverlässigkeitsniveau RC2) mit einer zugeordneten Versagenswahrscheinlichkeit kleiner 10^{-6} führen. Natürlich beeinflusst eine größere Messunsicherheit nicht die Bauwerkssicherheit, aber es wird quantifizierbar, wie sich eine Änderung der Messunsicherheit auf die Kenntnisse auswirkt mit deren Hilfe der Zuverlässigkeitsindex berechnet wird. Im vorliegenden Fall geht es weniger um die berechnete absolute Größe des Zuverlässigkeitsindex als vielmehr um die Erkenntnis, dass selbst größere Messunsicherheiten ZfPBau-Verfahren nicht von Vorneherein disqualifizieren würden.

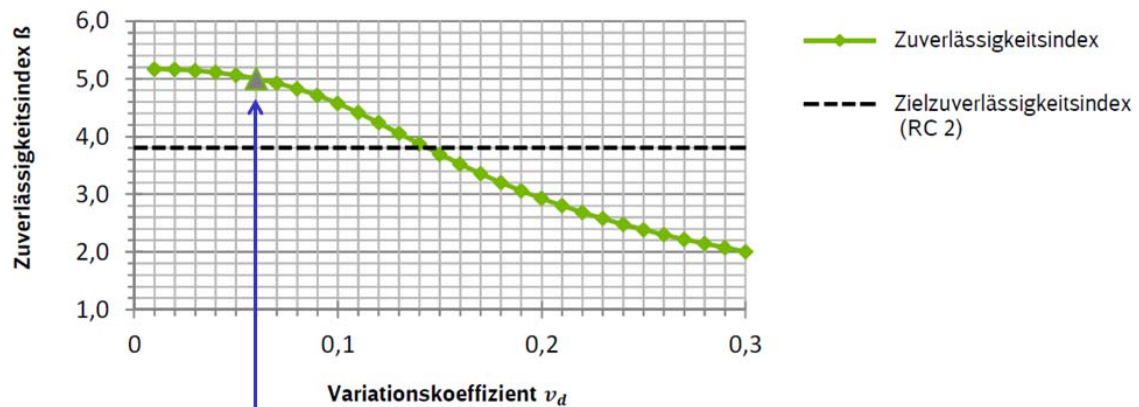


Abbildung 7 Parametervariation des Variationskoeffizienten als Maß für die Messunsicherheit des verwendeten Ultraschall-Verfahrens und dessen Auswirkung auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex β [9]

Durch diese Berechnungen ist nun quantifizierbar, dass übliche Messunsicherheiten von ZfPBau-Verfahren von rd. 5% ausreichen, um in statischen Nachweisen zur Tragfähigkeit verwendet zu werden. Dieser Nachweis ist vor dem Hintergrund einer gesteigerten Nachfrage an ZfPBau-Dienstleistungen im Zusammenhang mit der Nachrechnungsrichtlinie von Straßenbrücken [11] von Bedeutung. Durch die Stufen 3 (am Bauwerk ermittelte Ergebnisse) und 4 (Nachweis ausreichender Tragsicherheit mit Hilfe probabilistischer Methoden) dieser Richtlinie besteht künftig die Möglichkeit, Messergebnisse von ZfPBau-Verfahren in statische Nachweise einfließen zu lassen und die *ZfPStatik* so zu einem festen Bestandteil des konstruktiven Ingenieurbaus zu machen.

4 Referenzen

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
- [2] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation
- [3] Polzin, T., Nowczyk, D., Tscheuner, R. und A. Worch: Messunsicherheit in der Werkstoffprüfung, Materialwissenschaften und Werkstofftechnik 38, Heft 5, S.423-431, Wiley, Weinheim, 2007:
- [4] Hässelbarth, W.: BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen, 1. Fassung (2004-03-11), Forschungsbericht 266
- [5] Sommer, K.-D., Siebert, B.: Systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation, in: Metrologia 43 (2006), S. 200-210
- [6] Sommer, K.-D., Siebert, B. und A. Weckenmann: Modulares Modellieren von Messungen und Kalibrierungen für die Messunsicherheitsbewertung, in VDI (Hrsg.); VDI-Berichte Nr. 1867, 2. Fachtagung Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, Oberhof, 30.11.-01.12.2004, S. 289-299
- [7] Taffe, A.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) -Messergebnisse statisch rechenbar machen, VPI Arbeitstagung 2017, Potsdam 22./23.09.2017; schriftlicher Beitrag in „Der Prüferingenieur“ Mai 2018 (in Druck)
- [8] Mertens (Hrsg.), Handbuch Bauwerksprüfung, S. 255-280, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 2015
- [9] Küttenbaum, S.: Beitrag zur Verwendung von Messergebnissen zerstörungsfreier Prüfverfahren in statischen Berechnungen - Aufstellen von Grenzzustandsgleichungen, Masterarbeit HTW Berlin (2017)
- [10] Zilch K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Ingenieurbau. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg (2010)
- [11] Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Ausgabe 05/2011