

Bauingenieur

Organ des VDI Fachbereichs Bautechnik

Mitglieder-
ausgabe
2020



BRÜCKENBAU

Permanentes
Bauwerksmonitoring mit
Schallemissionsprüfung

BAUEN IM BESTAND

Revitalisierungskosten
von Bestandsobjekten
bewerten

STANDSICHERHEIT

Konzepte zur Ermittlung
der Zuverlässigkeit von
Bauwerken

BAUTECHNIK IM VDI

Unsere aktuellen Themen:

- Abbruch/Schadstoffsanierung
- Building Information Modeling (BIM)
- Kommunikation und Öffentlichkeitsbeteiligung
- Standsicherheit
- Wirtschaftlichkeitsberechnung

www.vdi.de/bau

VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik
Fachbereich Bautechnik

Herausforderungen annehmen

Sehr geehrte Leserinnen und Leser des „Bauingenieur digital“,

das Jahr 2021 stellt uns als Gesellschaft und als Bauschaffende vor Herausforderungen, die niemand zu Beginn des letzten Jahres auch nur erahnen konnte. Neben vielen Einschränkungen und im schlimmsten Fall auch gesundheitlichen Auswirkungen, hat sich unser Arbeitsalltag in vielen Fällen massiv geändert. Dabei stellen sich einige Änderungen als positiv heraus, dass sie auch nach der Pandemie bestehenbleiben.

Gerade hinsichtlich des Informationsaustausches bei Bauprojekten wurden in den letzten Monaten neue Wege gegangen. Webmeetings und virtuelle Projektbesprechungen werden effektiv eingesetzt. Durch sie findet die Zusammenarbeit der Planungs- und Baubeteiligten an gemeinsamen digitalen Modellen immer häufiger statt. Für Methoden wie Building Information Modeling (BIM) oder Lean Construction sind diese Veränderungen in der Kommunikationskultur eine wichtige Voraussetzung. Die Erfahrungen aus der Pandemie helfen, die Digitalisierung unserer Branchen weiter zu beschleunigen.

Neben den neuen Methoden im Bauprozess wurden in den letzten Jahren zahlreiche Technologien weiterentwickelt. Sie verändern das Baugeschehen dauerhaft. Der Einsatz von Drohnen zur Bauwerksinspektion, 3D-Scanning im Gebäudebestand oder diverse Simulationstechniken sind schon vielfach alltäglich. Techniken wie der „Betondruck“, Robotik und der Einsatz von Exoskletten zur Unterstützung der Arbeiten auf Baustellen werden in den nächsten Jahren das Prototypenstadium verlassen. Dies alles nicht aus Selbstzweck, sondern um die bestehenden Herausforderungen zum Beispiel Wohnraumknappheit, Schonung von Ressourcen und Fachkräftemangel begegnen zu können.

Auch unsere VDI-Mitgliederleistungen entwickeln sich weiter. Wir werden Sie mit dem neuen Format des „Bauingenieur digital“, dessen erste Ausgabe Ihnen hier vorliegt, zukünftig halbjährlich über neueste Entwicklungen und spannenden konkrete Bauprojekte und Neuigkeiten aus dem VDI-Fachbereich Bautechnik informieren.

Der VDI-Fachbereich Bautechnik bietet Ihnen natürlich noch viel mehr. Als Fachexperte haben Sie die Möglichkeit, aktiv an der normativen Regelsetzung mit zu arbeiten. Sei es durch das Mitwirken in einem unsere zahlreichen Gremien zu den unterschiedlichsten Themen aus Bauen und Gebäudetechnik oder bei der Erarbeitung von Positionen zu aktuellen Technikthemen.

Wir stellen uns den Herausforderungen und Ansprüchen unserer Zeit – das neue Format der VDI-Mitgliederausgabe des Bauingenieur ist hier nur ein Ergebnis. Wir freuen uns auf Ihre Anregungen und den Austausch zu bestehenden und kommenden Herausforderungen unserer Branche!

Beste Grüße
Frank Jansen



**Dipl.-Ing. (FH)
Frank Jansen**

Geschäftsführer VDI-Gesellschaft
Bauen und Gebäudetechnik

Abb.: VDI

Spannbetonbrücke durch Schall überwachen

Brücken ohne großen Aufwand zu überwachen ist durch die Schallemissionsprüfung (SEP) möglich. Ein Spanndrahtbruch kann durch die SEP genau lokalisiert werden. Die Sensorik wird dazu auf der Betonoberfläche appliziert.

Mit den bisherigen Methoden ist eine Dauerüberwachung der Spannungsglieder von Brücken nicht zu realisieren. Die neu entwickelte Anwendung der SEP liefert ein Monitoring über den gesamten Zeitraum hinweg. Dass die Schallemissionen am Schadensort zum Zeitpunkt der Schädigung selbst erzeugt werden, ist ein Vorteil gegenüber den Messsystemen, welche eine momentane Zustandsbeurteilung erlauben [1]. So ergänzen Magnetfeld- und Ultraschallmessungen sowie Schallemissionsprüfung einander: Erstere ermöglichen eine Beurteilung des aktuellen Zustands, die SEP hingegen ist als Dauerüberwachung angelegt.

SEP im Praxiseinsatz

Die Entwicklung der Anwendung der SEP als SHM-Verfahren wurde von Bilfinger maßgeblich vorangetrieben. Geprüft wurde das Verfahren durch einen Praxistest im Herbst 2019. Die untersuchte Brücke wurde 1963 für den Verkehr geöffnet. Sie besteht aus zwei Teilbauwerken mit je zwei T-Trägern und überspannt 310 Meter in fünf Feldern. Im Stützenbereich wird die offene Konstruktion in einen Hohlkasten überführt. Pro Träger sind bis zu 42 Spannungsglieder des Typs Neptun 16 N40 aus St145/160 verbaut [2]. Diese verlaufen über die Felder parabolisch in den Trägern und verändern ihre Querschnittsanordnung an den Kopelfugen.

Von März 2019 bis November 2019 setzte Bilfinger ein Monitoringsystem auf

Tabelle 1. wichtige Parameter eines SE-Signals [4]

Parameter	Zeichen	Einheit	Erklärung
Peakamplitude	A_{pk}	dB _{AE}	Maximale Lautstärke des Transienten
Risetime	R	ms	Anstiegszeit, Zeit vom Schwellwertüberschritt bis zur Maximalamplitude
Duration	D	ms	Gesamtdauer des Signals vom ersten bis letzten Schwellwertüberschritt
Counts	C	[1]	Anzahl der Schwellwertüberschreitungen
SIGS	S	[1]	Anzahl der getroffenen Sensoren einer Gruppe
Threshold	Thr	dB _{AE}	Aufnahmeschwellwert für ein „aufzeichnungswürdiges Zeichen“

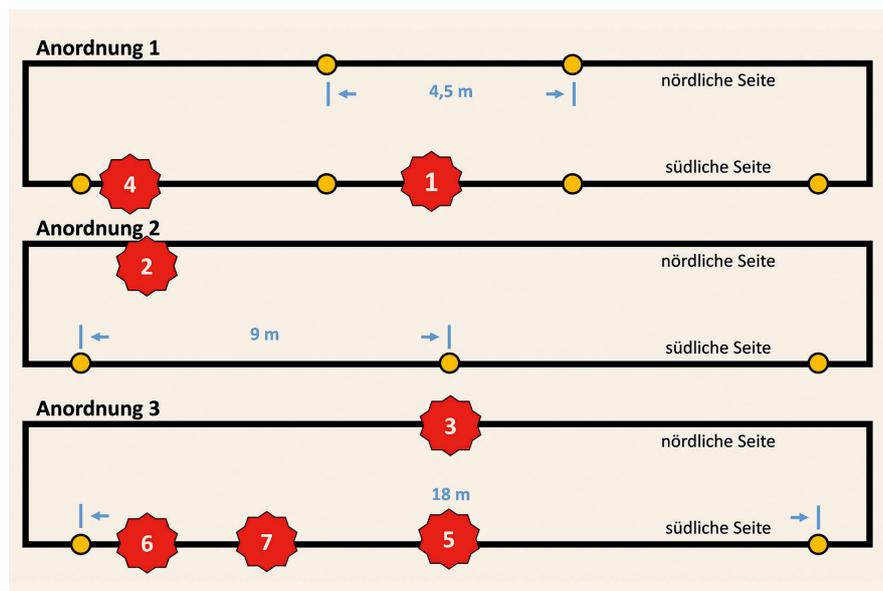


Bild 1. Verschiedene Sensoranordnungen schematisch dargestellt als Draufsicht auf den Träger. Gelbe Punkte sind Sensoren. In Rot sind die Entnahmestellen der Versuche eingezeichnet. Abb.: Bilfinger

Basis der Schallemissionsprüfung zur Detektion von Spanndrahtbrüchen an dem Bauwerk ein. In diesem Zeitraum wurden

mehrere Spanndrahtbrüche detektiert. Vor dem Brückenmonitoring gab es bereits vorbereitende Versuche an Beton-

prüfkörpern. Der geschilderte Praxiseinsatz an der Brücke ist ein Proof of Concept an einem realen Bauwerk. Vorangegangene Laborversuche bildeten die Wissensbasis für grundlegende Annahmen und die zu erwartenden Schallemissionen der Spanndrahtbrüche. Um diese zu verifizieren führte Bilfinger im Herbst 2019 einen weiteren Versuch durch. Bei diesem wurden sieben Spanndrähte an einem Spannbetonbauwerk durchtrennt. Das Bauwerk war zuvor mit Schallemissionsensoren ausgestattet worden.

Details und Aufbau des SEP-Tests

Beim SEP-Verfahren zeichnen passive, piezoelektrische Sensoren Schallwellen auf, die durch Risse oder Brüche entstehen. Dabei emittieren die Schallsensoren selbst nichts, sondern detektieren ähnlich wie bei der Erdbebedetektion Schallsignale, die auf einen Spanndrahtbruch hindeuten. Verschiedene Schadensereignisse emittieren dabei Schall mit verschiedenen großen Amplituden und Frequenzen. Der Schall propagiert von der Quelle durch das Volumen und auf der Oberfläche [3]. Somit kann durch die zeitkritische Verknüpfung der Daten mehrerer Sensoren eine Ortung durchgeführt werden. Die Anordnung bedingt dabei, ob eine lineare oder planare Lokalisierung mit oder ohne Tiefenlage möglich ist. Die eigentliche Identifikation der Signale als Spanndrahtbruchsignale erfolgt durch die Eigenschaften der Wellenform, auch Transient genannt und einer Frequenzdomänenanalyse. Direkt beim Eintreffen der Signale in der Messzentrale werden die in **Tabelle 1** dargestellten Parameter berechnet. Spanndrahtbruchsignale sind sogenannte Burstsignale. Als Burstsinal wird ein Signal bezeichnet, das in kurzer Zeit ansteigt und dann über längere Zeit abschwingt. Hierbei gilt, dass die Anstiegszeit sehr viel kürzer sein muss als die Abklingzeit und ein singulärer Maximalpeak vorhanden ist. Diese Eigenschaft ist entscheidend für die Unterscheidung des detektierten Signals von anderen Störsignalen wie beispielsweise Bauarbeiten oder Fahrgeräuschen.

Anbringen der Sensoren

Bei den sieben Entnahmen benutzte das Bilfinger-Team drei verschiedene Sensoranordnungen. Bei der ersten An-

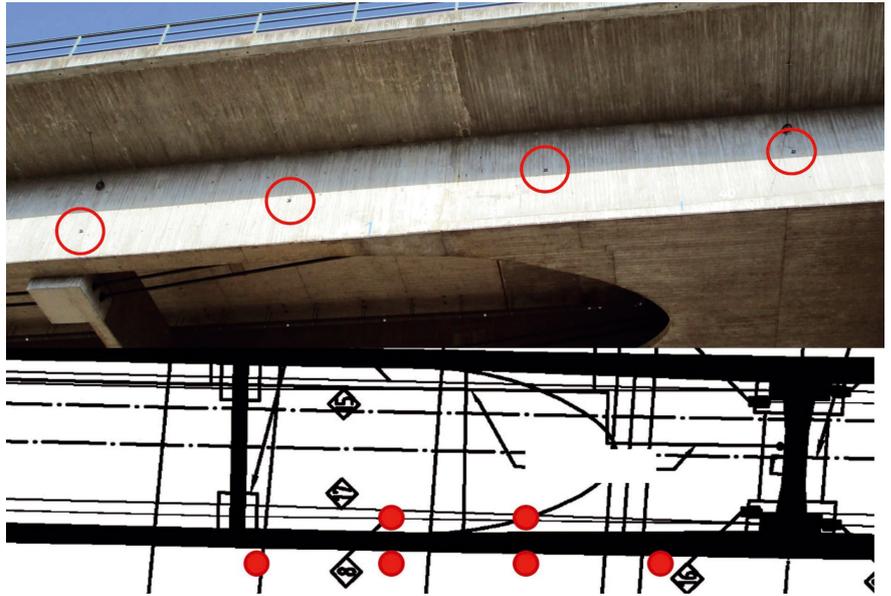


Bild 2. Sensoranordnung 1, zu sehen sind die Sensoren auf der Außenseite des Trägers. Die beiden weiteren Sensoren liegen auf der Innenseite des Trägers, den beiden mittleren Sensoren gegenüber. *Abb.: Bilfinger*



Bild 3. Sensor 1 und Öffnung mit noch geschlossenem Hüllrohr von Versuch 4 *Abb.: Bilfinger*

ordnung wurden insgesamt sechs Sensoren eingesetzt, davon vier auf der Entnahmeseite des Trägers und zwei auf der gegenüberliegenden Seite, je in linearer Anordnung und 4,5 Meter Abstand. Bei der zweiten Sensoranordnung wurden drei Sensoren linear mit neun Metern Abstand positioniert und bei der dritten Anordnung zwei Sensoren ebenfalls linear mit 18 Metern Abstand. Die Sensoren in Anordnung 1 waren auf beiden Seiten der Entnahme angebracht, um die Propagation des Signals durch den Träger beurteilen zu können. Die verschiedenen Sensoranordnungen sind in **Bild 1** in einer schematischen Draufsicht auf einen Träger dargestellt. Die Verwendung verschiede-

ner Sensoranordnungen erhöht die Vergleichbarkeit mit verschiedenen Anwendungsszenarien.

Vor der Montage der Sensoren wurde die Stelle gereinigt und vorbereitet (**Bild 2**). Anschließend wurde eine magnetische Halteplatte in den Beton gedübelt. Die Halteplatte hat mittig einen kreisrunden Ausschnitt, in welchen der Sensor platziert wird. Die Ankopplung an den Beton erfolgt mittels Heißkleber. Der Sensor wurde mit einem Magnethalter in den Heißkleber gedrückt und bleibt so montiert. Der Magnethalter sorgt mithilfe von Federn für eine konstante Anpresskraft von 50 N. Diese Art der Befestigung entspricht der Befesti-

Tabelle 2. Übersicht über die durchgeführten Spanndrahtentnahmen. Die Angabe der Entfernung bezieht sich dabei jeweils auf den nächstgelegenen Sensor.

Versuch Nr.	Uhrzeit	Entfernung [m]	Träger	Sensoren Setup
1	15:26	2	süd	Anordnung 1
2	11:17	1,5	nord	Anordnung 2
3	10:38	9	nord	Anordnung 3
4	16:12	1	süd	Anordnung 1
5	10:58	9	süd	Anordnung 3
6	13:44	2,5	nord	Anordnung 3

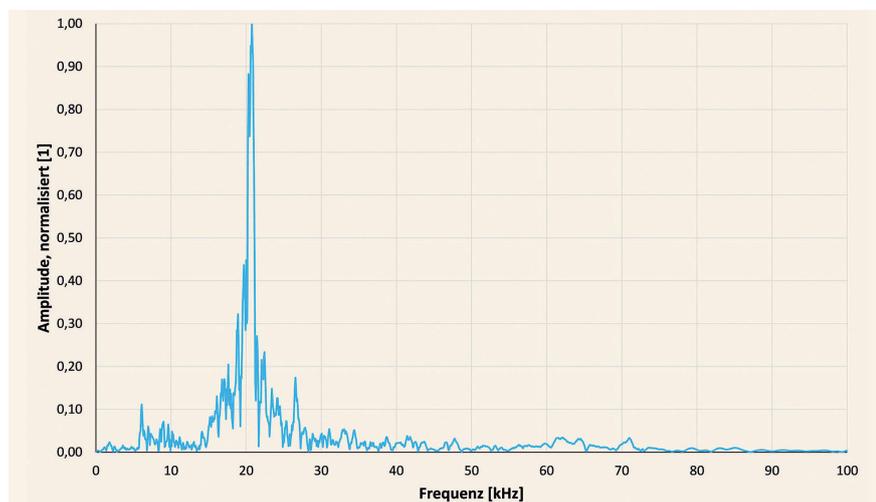
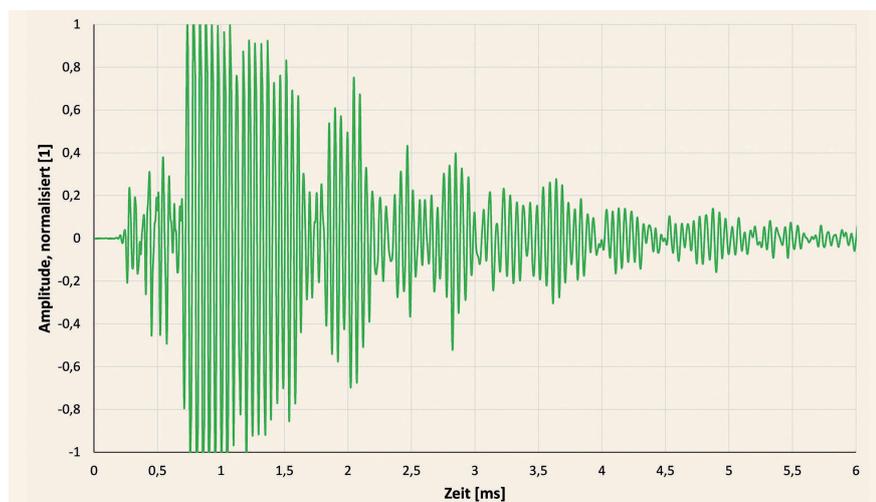


Bild 4. Das obere Diagramm zeigt die Transiente des erstgetroffenen Sensors des ersten Versuchs. Das Signal geht in die Sättigung. Der Sensor war in einem Abstand von zwei Metern von der Entnahmestelle befestigt. Im unteren Diagramm sind die Frequenzinhalte des Transienten dargestellt.
Abb.: Bilfinger

gung der im Monitoringsystem verbauten Sensoren. Die Ankopplung der Sensoren wurde mithilfe einer HSU-Nielsen-Quellen überprüft.

Geöffnet wurde der Beton auf einer Fläche von 0,75 Metern mal 0,3 Meter. Nach Öffnung und Aufklappen des Hüllrohrs erfolgte die Entnahme von jeweils

einem halben Meter Spanndraht. Ein Hüllrohr enthält 16 Spanndrähte. Das Prozedere wurde an insgesamt sieben Entnahmestellen in vier Feldern in der Kalenderwoche 42/2019 durchgeführt. Als Trennwerkzeug kam ein Dremel zum Einsatz, für die Stemmarbeiten ein Kombihammer (**Bild 3, Tabelle 2**).

Die verwendete Messtechnik für den Versuch

- VALLEN AMSY6 MB6-V1 Gehäuse
- 6 VALLEN ASIP-2/A-Messkarten mit Transientenrekordermodul
- Bis zu 6 VALLEN VS30-SIC 0 dB Sensoren
- Dell-Laptop mit VALLEN Software Suite R2018.0726.1
- RG58 C/U Kabel mit BNC-Steckverbindungen
- Bleistiftminenbruch als HSU-Nielsen-Quelle

Die Schwellwerte für die Aufzeichnung von Schallemissions (SE)-Daten und Transienten wurden aus Berechnungen der Verifizierungsmessung für das Monitoringsystem und den Erfahrungen der dauerhaften Messung abgeleitet. Der Schwellwert für die Aufnahme von Daten wurde auf $Thr = 90 \text{ dB}_{AE}$ gesetzt, da durch die Langzeitmessung bekannt war, dass die Hintergrundgeräusche ein $A_{pk} \leq 80 \text{ dB}_{AE}$ aufwiesen. Die Filter der ASIP-2/A-Messkarten wurden auf *bypass* gesetzt. Für SE-Daten betrug die Sample rate 10 MHz, für Transienten 5 MHz. Für alle Kanäle wurden bei allen Versuchen identische Einstellungen verwendet.

Brüche sind durch die SEP-Prüfung zu erkennen

Von den insgesamt sieben durchgeführten Entnahmen konnten alle erfolgreich aufgezeichnet werden. Dabei waren die Spanndrahtbruchsignale deutlich, über die Sensoren zu erkennen. Sämtliche Spanndrahtbrüche zeigten eine große Übereinstimmung in den Hit-Parametern und die Transienten enthielten klare Burstcharakteristika. Es lassen sich demnach für Spanndrahtbrüche typische Konstellationen von Peakamplitude, Risettime, Duration und Counts definieren. Die Frequenzinhalte, der an den verschiedenen Sensoren aufgezeichneten Signale entsprechen den erwarteten Veränderungen durch die Propagation. In den Diagrammen in **Bild 4** und **Bild 5** sind beispielhaft zwei Transienten dargestellt.

Diese Konstellation der Hit-Parameter kann zur Identifikation und Unterscheidung von Spanndrahtbrüchen und anderen Signalquellen genutzt werden. Die Lokalisierung der Schallquelle war je nach Sensoranordnung leicht unterschiedlich. Bei Anordnung 1 konnte der Quellort auf 0,2 Metern genau bestimmt werden. Bei

Anordnung 3, welche den Abstand der Sensoren des Monitoringsystems von 18 Metern widerspiegelt, liegt die Genauigkeit bei 0,5 Metern. Für die vom Betreiber definierten Anforderungen und mit Bezug auf die Bauwerksdimensionen ist dies als sehr gut zu bezeichnen.

Die aufgezeichneten, künstlich herbeigeführten Spanndrahtbrüche zeigen ebenfalls eine große Übereinstimmung mit den vom Monitoringsystem aufgezeichneten Spanndrahtbrüchen während des Normalbetriebs der Brücke. Daher können durch die Verwendung entsprechender Filter und einer Analyse die Spanndrahtbruchsignale von anderen Signalquellen zweifelsfrei unterschieden werden. Diese eindeutige Identifikation ermöglicht es, mittels der SEP Spanndrahtbrüche – ohne zu den Hilfenahmen von anderen Indikatoren wie zum Beispiel Risse – zu detektieren.

Als Dämpfung wurde aus allen Versuchen der Wert von 2,8 dB_{AE}/m abgeleitet. Dieser bewegt sich im Rahmen der an anderen Stelle festgestellten Dämpfungskoeffizienten [5], [6], [7]. Dazu muss allerdings festgestellt werden, dass die Dämpfung durch die verschiedenen Qualitäten des Betons, der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder einer relativ breiten Streuung von Bauwerk zu Bauwerk unterliegt. Somit muss die Dämpfung individuell für jedes Bauwerk bestimmt werden.

Die aufgezeichneten und berechneten Werte entsprechen den Werten und Annahmen aus vorangegangenen Versuchen. Die definierten Alarmschwellen des Monitoringsystems erwiesen sich als korrekt. Alle künstlich erzeugten Spanndrahtbrüche wurden zweifelsfrei identifiziert und geortet.

Erkenntnisse für das Brückenmonitoring von morgen

Die Tatsache, dass das Alarmkriterium immer erfüllt wurde, ist ein Indikator dafür, dass die berechneten Schwellwerte und angenommenen Alarmkriterien korrekt sind. Sämtliche Transienten, Parameter und Frequenzinhalte stimmen mit bisherigen Versuchsdaten und der Spanndrahtbruchklassifikation überein. Insofern wurden die angenommenen Materialparameter und die Eignung des Verfahrens im Praxistest bestätigt. Darüber hinaus ist die Lokalisierung der Drahtbrüche entsprechend den Gegebenheiten als sehr gut zu bezeichnen. Auch decken sich die festgestellten Eigenschaften in puncto Dämpfung

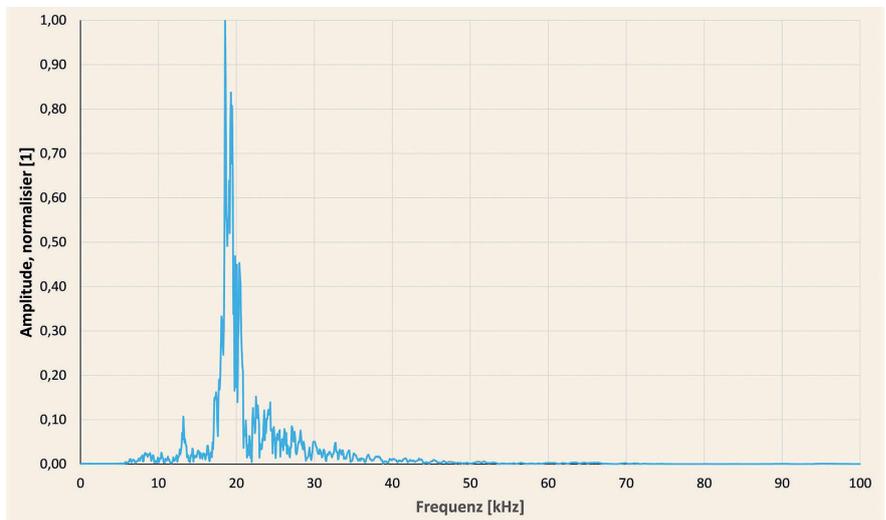
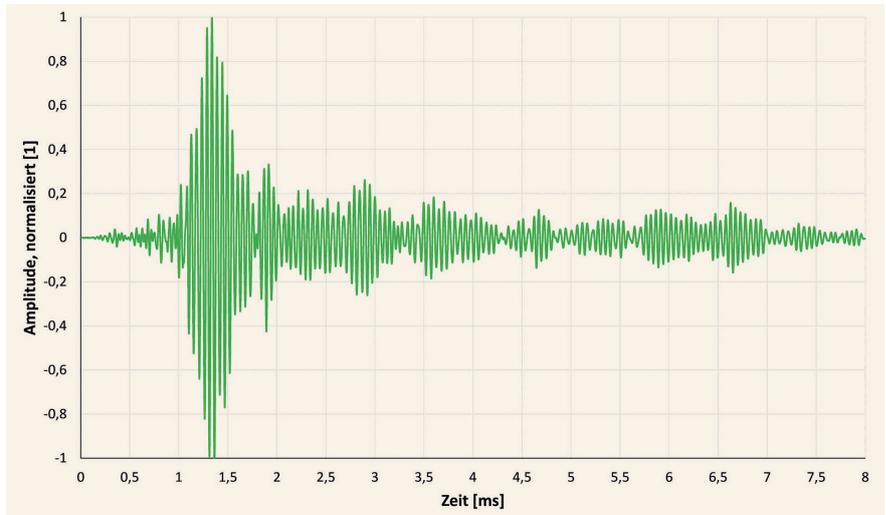


Bild 5. Im oberen Diagramm ist die Burstcharakteristik eindeutig zu erkennen. Der Sensor war in einem größeren Abstand zu Entnahmestelle angebracht, was das Fehlen von hohen Frequenzanteilen aufgrund des längeren Propagationswegs erklärt. *Abb.: Bilfinger*

fung und Schallgeschwindigkeit mit den Ergebnissen vorausgegangener Versuche.

Eine weitere entscheidende Materialeigenschaft: Stahlbeton ist kein homogener Werkstoff. Vielmehr besteht die Verbindung aus Stahl und Zement selbst aus inhomogenem Material. Teilweise bilden sich Hohlräume, zum Beispiel durch Auswaschungen. Diese Übergänge zwischen den Werkstoffen streuen das Signal. Dies wurde im Rahmen der Tests jedoch vernachlässigt, weil die Spannglieder selbst als Wellenleiter fungieren. Dadurch propagiert der Schall relativ ungestört durch das Spannglied. Grundsätzlich ist die Streuung alters- und konstruktionsbedingt eher hoch. Das erfordert besondere Aufmerksamkeit bei der Platzierung der Sensoren und Bewertung der Dämpfung. Die Unterscheidung von Nutzsignalen und Störgeräuschen bedarf der Expertise

und Erfahrung mit der eingesetzten Messtechnik.

Vorteile des Verfahrens

Das SEP-Verfahren bietet Anwendern eine Reihe technischer Vorteile, etwa weniger Aufwand bei der Bauwerksprüfung und zuverlässige Messergebnisse: Zeitpunkt und Ort einer neu auftretenden Beschädigung lassen sich präzise erfassen. Denn die permanente Überwachung ermöglicht es, den Eintrittszeitpunkt eines Schadens festzustellen. Die Spannglieder sind Bestandteil des Tragwerks. Vor diesem Hintergrund erweist es sich als besonders wertvoll, wenn ein Schaden minutengenau festgestellt und bis auf einen halben Meter genau lokalisiert werden kann. Hier gilt die Faustregel: je mehr Sensoren, desto genauer ist die Ortung.

Ein weiterer technischer Vorteil: Die Arbeit von Gutachtern wird durch die neue Datenbasis erheblich erleichtert. Wenn die Sensoren zum Beispiel zahlreiche Spanndrahtbrüche registrieren, können Gutachter auf einer zuverlässigen Grundlage schnelle Interventionsmaßnahmen empfehlen.

Über die technischen Aspekte hinaus entstehen auch Kostenvorteile aus dem neuen Verfahren. Beispielsweise lassen sich Inspektionen effizienter planen, wodurch sich Verkehrseinschränkungen auf der Brücke auf das Notwendigste beschränken. Kostenaufwendige Prüfungen fallen infolge des lückenlosen Monitorings nur noch im Bedarfsfall an. Nicht zuletzt bewährt sich die SEP auch in Sonderfällen wie Schwertransporten. Sie vereinfacht eine Überwachung, ob diese der Brücke zusätzlich schaden oder nicht.

Literatur

- [1] *Große, C.; Schumacher, T.*: Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. In: Bautechnik 90 (2013), Heft 11, S. 721-731.
- [2] *Ehmann, R.*: 587 – B Spannungsrissskorrosion von Spannstählen BAW-Brief Nr. 3/2006, Bundesanstalt für Wasserbau, 2006.
- [3] DIN EN 13554:2011, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze.
- [4] DIN EN 13477-1:2001, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Charakterisierung der Prüfausrüstung – Teil 1: Gerätebeschreibung.
- [5] *Fricke, St.*: Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken. ETH Zürich, Research Collection, 2010.
- [6] *Köppel, S.*: Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken. ETH Zürich, Dissertation, 2002.
- [7] *Sodeikat, C. et al.*: Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 10, S. 707-723.



Sebastian Schmidt

Prüfaufsicht,
Bilfinger Noell GmbH

Abb.: Bilfinger



Dominik Salg

Leiter Zerstörungsfreie Prüfungen
Bilfinger Noell GmbH

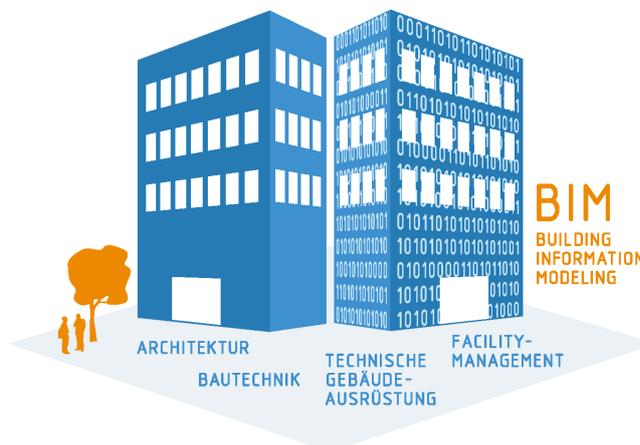
Abb.: Bilfinger

Unterstützung für die Umsetzung von BIM

Die Richtlinienreihe VDI 2552 gibt Architekten und Bauherren, Ingenieuren und weiteren Beteiligten an der Planung und am Bau sowie Betreibern alles an die Hand, was sie benötigen, um mit BIM professionell und standardisiert zu arbeiten. Anwendungsbereich der neuen VDI 2552 Blatt 4 ist der Datenaustausch unter Beteiligten an BIM-Projekten. Ziel dieser Richtlinie ist ein stabiler, umfassender Austausch aller im Rahmen eines BIM-Projektes benötigter Daten.

Die Richtlinie bietet dazu Hinweise zu Aufbau und Inhalt der Datenübergaben. Sie informiert über die Anforderungen an den Ausarbeitungsgrad sowie über verschiedene Modellarten, die bei der Datenübermittlung zur Anwendung kommen können (Grundlagenmodell, Fachmodelle, Betreibermodell u. a.). VDI 2552 Blatt 4 stellt eine Auswahl der möglichen Datenaustauschformate vor, wie das BIM Collaboration Format und den Datenstandard CityGML. Sie gilt für den Datenaustausch sowohl in Open BIM als auch in Closed-BIM-Umgebungen.

Das neue Blatt 9 beschreibt Aufbau und Anwendung von Klassifikationssystemen im Rahmen von BIM-Projekten. Grundlage für die Anforderungen an Klassifikationssysteme ist die DIN EN ISO 12006-2. Die Richtlinie stellt die Bestandteile eines Klassifikationssystems vor, darunter Klassifikationen von Raumnutzungsarten, Bauteiltypen, Dokumententypen, Bauwerkstypen und Kostengruppen. Sie stellt mögliche Anwendungsfälle dar, von der Ausschreibung über die Kostenermittlung und die Qualitätssicherung bis zum Gewährleistungsmanagement. Sie gibt auch Informationen zur Nutzung von Klassifikationssystemen in BIM-spezifischer Software, sowie zur optimalen Aufbereitung.



Der Anwendungsbereich der neuen VDI 2552 Blatt 4 ist der Datenaustausch unter Beteiligten an BIM-Projekten. Abb.: VDI

Herausgeber der Richtlinienreihe VDI 2552 ist die VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG). Das Richtlinienblatt 4 erschien im August 2020 als Weißdruck und ersetzt den Entwurf von Oktober 2018. Blatt 9 erschien als Entwurf ebenfalls im August. Die Richtlinien können zum Preis von 118,93 Euro beziehungsweise 72,91 Euro beim Beuth Verlag bestellt werden. Onlinebestellungen sind unter www.vdi.de/2552 oder www.beuth.de möglich. VDI-Mitglieder erhalten zehn Prozent Preisvorteil auf alle VDI-Richtlinien. VDI-Richtlinien können in vielen öffentlichen Ausgelegestellen kostenfrei eingesehen werden. www.vdi.de/2552

Optimierung der Revitalisierungskosten von Bestandsobjekten

P. Nowak, D. Krawczyk

Der Artikel beschreibt das Vorgehen bei der Bewertung von fünf möglichen Varianten zur Senkung der Baukosten, die im Zusammenhang mit der Revitalisierung und Rekonstruktion eines historischen Gebäudes als Einkaufszentrum betrachtet wurden. Diese Varianten wurden nach dem Kriterium Baukosten als einem quantitativen Kriterium sowie nach den qualitativen Kriterien Visueller Eindruck, Funktionalität sowie Planungsflexibilität bewertet. Aufgrund der komplizierten qualitativen Bewertungen durch Experten wurde eine der Methoden der multikriteriellen Optimierung eingesetzt, welche nach Ansicht der Autoren im Rahmen von Entscheidungsprozessen in Bauinvestitionen selten zur Anwendung kommen. Im vorliegenden Fall wurde die Ideal Point Method eingesetzt.

Die Konjunktur auf dem Verbrauchermarkt in Polen bewirkt, dass der Bau von Einkaufszentren derzeit sehr rentabel ist. Die Finanzierung solcher Bauprojekte wird jedoch seit geraumer Zeit durch einen deutlichen Anstieg der Preise für Baustoffe und für Bauleistungen beeinflusst. Daher ist es notwendig, die Baukosten unter anderem durch den Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten und die Auswahl der günstigsten Lösung zu untersuchen. Eine besondere Komplexität erlangen solche Untersuchungen bei Bauvorhaben im Bestand. Die Anwendung der Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse kann solche Prozesse unterstützen. Deren praktische Anwendung wird am Beispiel des Umbaus (Revitalisierung) eines 150 Jahre alten Fabrikgebäudes in ein Einkaufszentrum dargelegt (**Bild 1, Bild 2 und Bild 3**).

Ziel der Untersuchung war, die Revitalisierungskosten zu minimieren und gleichzeitig den Qualitätsstandard sowie die Funktionalität des Bauobjekts zu maximieren. Hierzu wurden fünf Varianten



Bild 1. Ursprungszustand des Fabrikgebäudes Abb.: <https://pabianice.fotopolska.eu/1158193,foto.html>

untersucht, welche nach dem Kriterium Baukosten als einem quantitativen Kriterium sowie nach den qualitativen Kriterien Visueller Eindruck, Funktionalität sowie Planungsflexibilität bewertet wurden. Die Autoren diskutieren dabei die Proble-

matik der Entscheidungsfindung bei geringer Datenverfügbarkeit und hohem Anteil an qualitativen Auswahlkriterien im Entscheidungsprozess. Die Ideal Point Method wurde zur Auswertung der Ergebnisse gewählt.



Bild 2. Bauzustand Abb.: Magdalena Kosińska, pabianice.pl, 2018

Variantauswahl und Definition der Kriterien

Die Planungsphase ist für die Baukosten von höchster Relevanz. In dieser Phase sollten verschiedene Ausführungsvarianten untersucht werden. Gerade im Falle von Einkaufszentren ist die Einhaltung der Fertigstellungsfristen von herausragender Bedeutung. Die Überschreitung der Fertigstellungsfrist bei einer solchen Art von Bauwerk ist häufig mit hohen Vertragsstrafen verbunden. Für die zu untersuchenden Varianten gilt, dass sie die Projektparameter zumindest in Bezug auf Qualitäten und die Bauzeit erfüllen müssen. In Anbetracht des Zeitdrucks und fehlender Mittel für Fachanalysen wird der Investor üblicherweise auf der Basis



Bild 3. Geplanter Zustand nach der Revitalisierung
Abb.: <https://www.muratorplus.pl/inwestycje/inwestycje-komercyjne>

Tabelle 1. Baukosten der Fertigstellung mit Asphalt

Nr.	Schicht	Dicke	Einzelkosten [netto PLN/m ²]	Kosten [netto PLN]
1	Unterbau	20 cm	67,42	84 977,43
2	Asphalttragschicht	10 cm	85,40	107 649,50
3	Asphaltbinderschicht	6 cm	59,59	75 118,58
4	Asphaltdeckschicht	4 cm	41,34	52 116,28
Insgesamt				319 861,79

Tabelle 2. Baukosten der Fertigstellung mit Betonfertigteilen

Nr.	Schicht	Dicke	Einzelkosten [netto PLN/m ²]	Kosten [netto PLN]
1	Erdarbeiten	4 cm	4,03	5 086,97
2	Unterbau	24 cm	80,56	101 542,87
3	Pflasterung aus Betonsteinen	12 cm	133,19	167 844,02
Insgesamt				274 479,86

von eigenen Erfahrungen und gegebenenfalls gemäß den Empfehlungen externer Berater handeln. Eine solche Situation ist mathematisch schwer zu beschreiben, da die meisten Bewertungen auf qualitativen und nicht auf quantitativen Daten basieren, die zusätzlich mit einer Unsicherheit belegt sind ([1], [2], [3]). Es werden fünf Varianten A bis E zwecks Reduzierung der Baukosten unter Berücksichtigung von vier Kriterien mit der gewichteten Durchschnittsmethode analysiert. Anschließend wurden die Ergebnisse mittels der Ideal Point Method analysiert. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Variante A: Änderung der Beschaffenheit der Zufahrtsstraße. Anstatt einer Fahrbahndecke aus Asphalt wird eine Fahrbahndecke aus Pflastersteinen vorgeschlagen. In den **Tabelle 1** und **Tabelle 2** hat man mögliche Einsparungen für eine Fläche von 1 260,40 m² bei dieser Lösung ausgerechnet. Die mögliche Baukostenreduktion beträgt netto 45 387,93 PLN.
- Variante B: Änderung der Beschaffenheit des Bodenbelags im Bauwerk. Der ursprüngliche Entwurf sah die Verlegung von Steinplatten vor. Die neue Variante sieht die Ausführung eines geglätteten Industriefußbodens vor. Diese Lösung hat einen mehr industriellen Charakter und fügt sich gut in das revitalisierte Bauwerk ein. Die mögliche Baukostenreduktion beträgt netto 797 298,11 PLN.
- Variante C: Änderung der Beschaffenheit der Trennwände. Anstatt Gipskartontrennwände werden Kalksandsteinwände hergestellt (**Bild 4**). Die mögliche Baukostenreduktion beträgt netto 277 231,04 PLN.
- Variante D: Änderung der Fassadenkonstruktion. In Bereichen, welche nicht unter Denkmalschutz stehen, wird eine neue Fassadenkonstruktion als WDVS vorgeschlagen. Die mögliche Baukostenreduktion beträgt netto 234 677,46 PLN.
- Variante E: Änderung der Beschaffenheit der Gehwege. Austausch des Natursteinbelags des Gehwegs in der Fußgängerzone im Eingangsbereich des Einkaufszentrums gegen eine einfache Betonpflasterung. Die mögliche Baukostenreduktion beträgt netto 365 864,30 PLN.

Die Grundannahme der Optimierung war, dass keine der untersuchten Varianten den Fertigstellungstermin beeinflussen

wird. In Anbetracht dessen bleibt das Kriterium Bauzeit unberücksichtigt. Daraufhin wurden vier Kriterien ausgewählt, welche nach Ansicht der Verfasser den maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidung im Hinblick auf eine Änderung nehmen. Jedes von diesen Kriterien wird auf einer dimensionslosen Skala von 0 bis 10 bewertet, wobei 10 den maximalen Wert wiedergibt. Dazu zählen folgende Kriterien:

- Baukosten. Ein quantitatives Kriterium, mittels dessen ermittelt werden kann, welche Einsparung die Umsetzung der jeweiligen Variante mit sich bringen kann.
- Visueller Eindruck. Ein qualitatives und schwer bestimmbares, denn subjektives Qualitätskriterium. Für die Bestimmung der Punktzahl ist Teamarbeit oder die Einberufung einer Expertenrunde (z. B. Innenarchitektinnen und Innenarchitekten) empfehlenswert. Es ist ein relevantes und oft ausschlaggebendes Kriterium. Der visuelle Eindruck des Einkaufszentrums schlägt sich in der Kundenzahl, der Art und Exklusivität von Geschäften und folglich in den späteren Erträgen nieder.
- Funktionalität. Ein qualitatives und ebenfalls schwer bestimmbares Qualitätskriterium. Mithilfe dieses Kriteriums kann bestimmt werden, inwieweit die jeweilige Variante zum Funktionalitätskonzept des Einkaufszentrums passfähig ist.
- Planungsflexibilität. Die Varianten sollten flexibel bezüglich Planungsänderungen respektive Auflagen aus den Genehmigungsprozessen sein.

Analyseprozess

Für den Variantenvergleich wurden die Methode der gewichteten Summe (Simple Additive Weighting) sowie die Ideal Point Method angewendet. Nachfolgend sind die Ergebnisse dargelegt.

Normierung der Kriterien. Bei den Kriterien Visueller Eindruck, Funktionalität und Planungsflexibilität handelt es sich um qualitative Größen, daher kann deren Bewertung auf der Grundlage individueller Präferenzen oder anhand von Untersuchungsergebnissen respektive mithilfe der Ergebnisse im Teamwork, beispielsweise mit der Methode des Brainstormings, erfolgen. Im Falle des Kriteriums Baukosten kann die Bewertung mithilfe numerischer Berechnungen durchgeführt

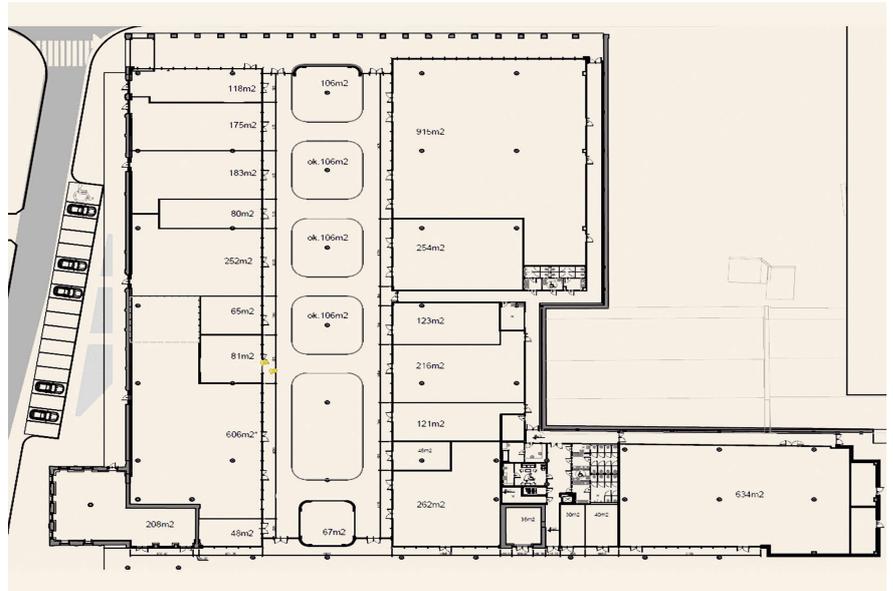


Bild 4. Planung der Trennwände Abb.: Eigene Darstellung



Bild 5. Fassade: Ursprungszustand (links), nach Restaurierung (rechts) Abb.: Eigene Darstellung

Tabelle 3. Der Wert der ausgewählten Kriterien

Kriterium \ Variante	Baukosten		Visueller Eindruck	Funktionalität	Planungsflexibilität
	Kriteriumswert (netto PLN)	Normalisiertes Kostenkriterium			
A	45 387,93	0,57	10	6	4
B	797 298,11	10,00	6	1	8
C	277 231,04	3,48	10	9	7
D	234 677,46	2,94	2	7	0
E	365 864,30	4,59	4	8	10

werden. Die Normierung der Kriterien wurde im konkreten Fall mit der Methode Linear Normalisation gemäß Formel (1) durchgeführt ([4], [5]). Die Tabelle 3 zeigt die Zusammenfassung des Normierungsvorgangs.

$$K_1(W_i) = \frac{A_1(W_i)}{A_{max}(W_i)} \cdot 10 \tag{1}$$

mit:

$A_1(W_i)$ Dimensionswert des jeweiligen Kriteriums

$A_{max}(W_i)$ Maximalwert des jeweiligen Kriteriums

Das Kriterium Visueller Eindruck als das wichtigste Qualitätskriterium ergibt, inwieweit sich das Qualitätsniveau des

Tabelle 4. Ergebnisse der Methode der gewichteten Summe (Simple Additive Weighting)

Variante	Baukosten	Visueller Eindruck	Funktionalität	Planungsflexibilität	Ergebnis
A	0,57 * 0,35 = 0,200	10,00 * 0,30 = 3,000	6,00 * 0,15 = 0,900	4,00 * 0,20 = 0,800	4,900
B	10,00 * 0,35 = 3,500	6,00 * 0,30 = 1,800	1,00 * 0,15 = 0,150	8,00 * 0,20 = 1,600	7,050
C	3,48 * 0,35 = 1,218	10,00 * 0,30 = 3,000	9,00 * 0,15 = 1,350	7,00 * 0,20 = 1,400	6,968
D	2,94 * 0,35 = 1,029	2,00 * 0,30 = 0,600	7,00 * 0,15 = 1,050	0,00 * 0,20 = 0,000	2,679
E	4,59 * 0,35 = 1,607	4,00 * 0,30 = 1,200	8,00 * 0,15 = 1,200	10,00 * 0,20 = 2,000	6,007

Tabelle 5. Ideal Point Method – Berechnung

Variante	Baukosten	Visueller Eindruck	Funktionalität	Planungsflexibilität
A	<u>0,200</u>	3,000	0,900	0,800
B	3,500	1,800	<u>0,150</u>	1,600
C	1,218	3,000	1,350	1,400
D	1,029	<u>0,600</u>	1,050	<u>0,000</u>
E	1,607	1,200	1,200	2,000

Tabelle 6. Ideal Point Method – Berechnung von Entfernungen und Ergebnisse

Variante	Entfernung zum Idealpunkt	Entfernung zum Antiidealpunkt	Ergebnis
A	3,540	2,639	0,427
B	1,744	3,859	0,689
C	2,360	3,193	0,575
D	3,994	1,224	0,235
E	2,616	2,728	0,510

Objekts bei Anwendung der jeweiligen Variante verschlechtern wird respektive unverändert bleibt. Die Zahl 10 stellt den Ausgangswert dar. Bei diesem Kriterium richtet sich die Punktevergabe nach der Vergleichsmethode, das heißt, die Varianten werden miteinander verglichen. Sowohl die Variante A (Änderung der Beschaffenheit der Zufahrtstrasse) als auch die Variante C (Änderung der Beschaffenheit der Trennwände) beeinflussen dieses Kriterium nicht und erhalten daher den Wert 10. Die Variante B (Änderung der Beschaffenheit des Bodenbelags im Bauwerk) reduziert das Qualitätsniveau und erhält den Wert 6. Noch gravierender wird der visuelle Eindruck durch den Ersatz des Natursteinbelags durch Betonsteinpflaster (Variante E) im Eingangsbereich reduziert und erhält den Wert 4. Den Wert 2 erhält die Variante D, welche die Attraktivität der Fassade des Objektes am stärksten nachteilig beeinflusst. Analog

erfolgte die Bewertung der Kriterien Funktionalität und Planungsflexibilität. Hervorzuheben ist dabei die insgesamt negative Bewertung der Variante D, denn die Änderung der Fassadenkonstruktion generiert die meisten Schnittstellen durch die Einflüsse auf Brandschutz, Bauphysik sowie Denkmalschutz.

Gewichtung der Kriterien. Basierend auf den Ergebnissen des Normierungsprozesses (Tabelle 3) erfolgt im nächsten Schritt die Gewichtung der Kriterien. Die Festlegung der Kriteriengewichte gehört zu den anspruchsvollen Aufgaben und hat gleichzeitig einen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse der Analyse. Das Kriterium Baukosten (im vorliegenden Fall wurde die Gewichtung von 0,35 angenommen) und das Kriterium Visueller Eindruck (Gewichtung 0,30) wurden als die wichtigsten Kriterien eingestuft, daher die höheren Werte im Vergleich zu den Kriterien Planungsflexibilität (Gewichtung

0,2) und Funktionalität (Gewichtung 0,15) ([7], [8]).

In der nachfolgenden **Tabelle 4** sind die Ergebnisse der Anwendung der Methode der gewichteten Summe (Simple Additive Weighting) dargestellt.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Anwendung der Ideal Point Method. Sie besteht in der Findung der Ideal- und Antiideallösung und in der Feststellung der Entfernung zwischen den jeweils untersuchten Varianten und den obigen Extrem Lösungen. Diese Entfernung wird nach den Formeln (2), (3) und (4) berechnet ([5], [6]):

$$\max \alpha_j \cdot K_j(W_i)$$

Der Idealpunkt für das j -Kriterium von allen Varianten

$$\max \alpha_j \cdot K_j(W_i)$$

Der Antiidealpunkt für das j -Kriterium von allen Varianten

Die Entfernung vom Idealpunkt für die i -Variante:

$$d^+_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\left(\max \alpha_j \cdot K_j(W_i) - \alpha_j \cdot K_j(W_i) \right)^2 \right]} \quad (2)$$

Die Entfernung vom Antiidealpunkt für die i -Variante:

$$d^-_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\left(\max \alpha_j \cdot K_j(W_i) - \alpha_j \cdot K_j(W_i) \right)^2 \right]} \quad (3)$$

Das Optimierungsergebnis wird mithilfe der zwei oben angegebenen Formeln, welche die Distanz berechnen, bestimmt und stellt das Resultat der Analyse gemäß der Formel (4) dar:

$$K(W_i) = \frac{d^-_i}{d^-_i + d^+_i} \quad (4)$$

Je höher der jeweilige Wert, desto näher liegt die Lösung an der Ideallösung. Die Ergebnisse für das zu lösende Problem wurden in den **Tabelle 5** und **Tabelle 6** dargelegt.

Die Ergebnisse der Analyse der untersuchten Varianten sind unabhängig von der gewählten Methode (Methode der gewichteten Summe oder Ideal Point Method) konvergent.

Zusammenfassung

Am Beispiel einer Baumaßnahme im Bestand, des Umbaus einer Fabrikhalle in ein Einkaufszentrum, wurden fünf Varianten zur Reduktion der Baukosten unter Anwendung der Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass gerade in den Entscheidungsprozessen, in denen wenige Daten zur Verfügung stehen und gleichzeitig qualitative und quantitative Kriterien bewertet werden sollen, die Anwendung der Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse sinnvoll ist. Im konkreten Fall konnte herausgearbeitet werden, dass:

- die Variante A, Änderung der Beschaffenheit der Zufahrtsstraße, ein relativ geringes Baukosteneinsparpotenzial aufweist und gleichzeitig wenig Einfluss auf die Qualität des Bauobjektes ausübt (Rang 4), sodass sie unter Umständen in eine Umsetzung überführt werden kann;
- die Variante B, Änderung der Beschaffenheit des Bodenbelags im Bauwerk, ein hohes Baukosteneinsparpotenzial aufweist und gleichzeitig einen sehr positiven Einfluss auf die Qualität des Bauobjektes ausübt (Rang 1), sodass sie unbedingt in eine Umsetzung überführt werden sollte;

- die Variante C, Änderung der Beschaffenheit der Trennwände, ein relativ hohes Baukosteneinsparpotenzial aufweist und gleichzeitig einen positiven Einfluss auf die Qualität des Bauobjektes ausübt (Rang 2), sodass sie, analog zur Variante B, unbedingt in eine Umsetzung überführt werden sollte;
- die Variante D, Änderung der Fassadenkonstruktion, ein relativ hohes Baukosteneinsparpotenzial aufweist und gleichzeitig einen negativen Einfluss auf die Qualität des Bauobjektes ausübt (Rang 5), sodass von der Umsetzung abgesehen werden sollte;
- Variante E: Änderung der Beschaffenheit der Gehwege, ein relativ hohes Baukosteneinsparpotenzial aufweist und gleichzeitig einen neutralen Einfluss auf die Qualität des Bauobjektes ausübt (Rang 3), sodass sie unter Umständen in eine Umsetzung überführt werden kann.

Literatur

- [1] *Ustinovichius, L.; Zavadskas, E.; Migilinskas, D. et al.*: Verbal Analysis of Risk Elements in Construction Contracts. In Cooperative Design, Visualization, and Engineering: Third International Conference, CDVE 2006, Mallorca, Proceedings, Vol. 4101, pp. 295.
- [2] *Nowak, P.; Książek, M.; Draps, M.; et al.*: Decision Making with use of Building Information Modeling. In: Procedia Engineering, Vol. 153 (2016), pp. 519–526.
- [3] *Nowak, P.; Skłodkowski, M.* Multicriteria analysis of selected building thermal insulation solutions. In: Archives of Civil Engineering, Vol. 62 (2016), Iss. 3, pp. 137–148.

- [4] *Jaworski, K. M.*: Podstawy organizacji budowy, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004.
- [5] *Książek M.; Krzemiński M.*: Wielokryterialna ocena wariantów rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych w centrach logistycznych przy wykorzystaniu metody punktu idealnego. In: Autobusy: technika, eksploatacja, systemu transportowe, Vol. 3 (2013), pp. 741–748.
- [6] *Książek M.*: Wykorzystanie wybranych metod wielokryterialnych do oceny inwestycji w procesie decyzyjnym. In: Logistyka, Vol. 3 (2011), pp. 1429–1438.
- [7] *Książek, M.; Nowak, P.; Rosłon, J. et al.*: Multicriteria Assessment of Selected Solutions for the Building Structural Walls. In: Procedia Engineering, Vol. 91 (2014), 406–411.
- [8] *Książek, M.; Nowak, P.*: Expert methods for design solutions assessment. In: Logistyka, Vol. 6 (2009), CD-CD.



**Ph. D. Eng.
Paweł Nowak**

p.nowak@il.pw.edu.pl

Abb.: Nowak



**M. Sc. Eng.
Dominik
Krawczyk**

d.krawczyk@il.pw.edu.pl

Abb.: Krawczyk

Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Warszawska

Fakultät für Bauingenieurwesen,
Technische Universität
Warschau

Armii Ludowej 16,
00–637 Warszawa, Polen

IMPRESSUM

Bauingenieur

Digitale Mitglieder Ausgabe VDI-Bautechnik 2020 der Fachzeitschrift „Bauingenieur“

Herausgeber

VDI-Fachbereich Bautechnik in der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik
Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf

Redaktion

Dipl.-Ing. (FH) Frank Jansen VDI, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Düsseldorf
Tel. 02 11/62 14–313, bau@vdi.de

Verlag

VDI Fachmedien GmbH & Co. KG
Unternehmen für Fachinformationen
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
Postfach 101139, 40001 Düsseldorf
Commerzbank AG, Düsseldorf, BLZ 300 800 00
Konto-Nummer: 02 121 724 00
SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300
IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00

Geschäftsführung

Ken Fouhy, B.Eng.

Projektkoordination

Heike van Ooyen
Anne Katrin Breckenkamp

Layout

Alexander Reiß

Copyright

Diese Publikation und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.



Bild. 1. a) Eingestürzte Autobahnbrücke in Genua, Abb.: Andrea Izzotti/Shutterstock und b) Beispiel einer Nachweiskurve (Groningen-Kurve 1978). Abb.: [5]

Sicherheit im Bauwesen – von der Brücke bis zum Befestigungssystem

J. Hofmann

Eine ausreichende Sicherheit im Bauwesen ist eine entscheidende Größe für das Vertrauen und die Funktion der Gesellschaft. Insbesondere wenn Bauwerke in Teilen oder als Gesamtkonstruktion versagen, geht dieses Vertrauen verloren. Dies zeigte auch der Einsturz der Autobahnbrücke in Genua im August 2018, der eine Überprüfung baugleicher Brückentypen notwendig macht, zumindest solange die Ursachen und der Schadenshergang nicht vollständig aufgeklärt sind. In Bild 1a) ist hierfür exemplarisch die Brücke in Genua dargestellt.

Aber auch geringere Schäden müssen vermieden werden, wobei hier die Akzeptanz und das öffentliche Interesse sicherlich weniger stark ausgeprägt sind als bei den dargestellten Brückeneinstürzen. Auch bei geringeren Schäden oder Teilversagen von Bauteilen kann es neben hohen Sachschäden zu ernsthaften Personenschäden kommen. Daher ist für solche Bauteile ebenfalls eine entsprechende Sicherheit zu fordern und einzuhalten. Der Zusammenhang zwischen der akzeptierten Wahrscheinlichkeit für mehr als n Todesopfer pro Jahr in Abhängigkeit von der akzeptierten Anzahl von Todesopfern ist in Bild 1b) dargestellt. Die Groningen-Kurve zeigt: Je höher die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden oder ein Versagen eines Bauteils mit Todesfolge ist,

desto geringer ist die Anzahl der Todesopfer, die im Allgemeinen als „akzeptabel“ angesehen wird. Grundsätzlich muss an dieser Stelle betont werden, dass aus ethischer Sicht keine Todesopfer durch Bauwerksversagen akzeptabel sind, allerdings gibt es keine absolute Sicherheit, sodass nur das Risiko und die Wahrscheinlichkeit reduziert werden können. Wird ein Risiko von weniger als 10^{-6} erreicht, überwiegt in der Regel das individuelle Sterberisiko. Ein Risiko unterhalb dieses Werts kann in Normen oder Gesetzen unberücksichtigt bleiben und als akzeptables Lebensrisiko betrachtet werden [5].

Grundsätzlich sollten das Sicherheitskonzept und die Sicherheitsphilosophie so ausgelegt sein, dass die Sicherheit für das Gesamtbauwerk mit der Sicherheit der Bauteile und der darin verbauten Produkte (z.B. der verbauten Dübel) übereinstimmt. Im Bauwesen wird sehr häufig das semi-probabilistische Sicherheitskonzept verwendet. Dieses kann auf Tragwerke, Bauteile, Materialien oder verbaute Produkte angewandt werden. Bei richtiger Anwendung und den richtigen Annahmen garantiert dieses Verfahren eine bestimmte, zuvor festgelegte Zuverlässigkeit. Mit diesem Verfahren kann dann die Zuverlässigkeit eines Tragwerks, eines Bauteils oder eines Bauproduktes, wie zum Beispiel einem Dübel, berechnet werden. Daher wird dieses Verfahren folgend näher beschreiben.

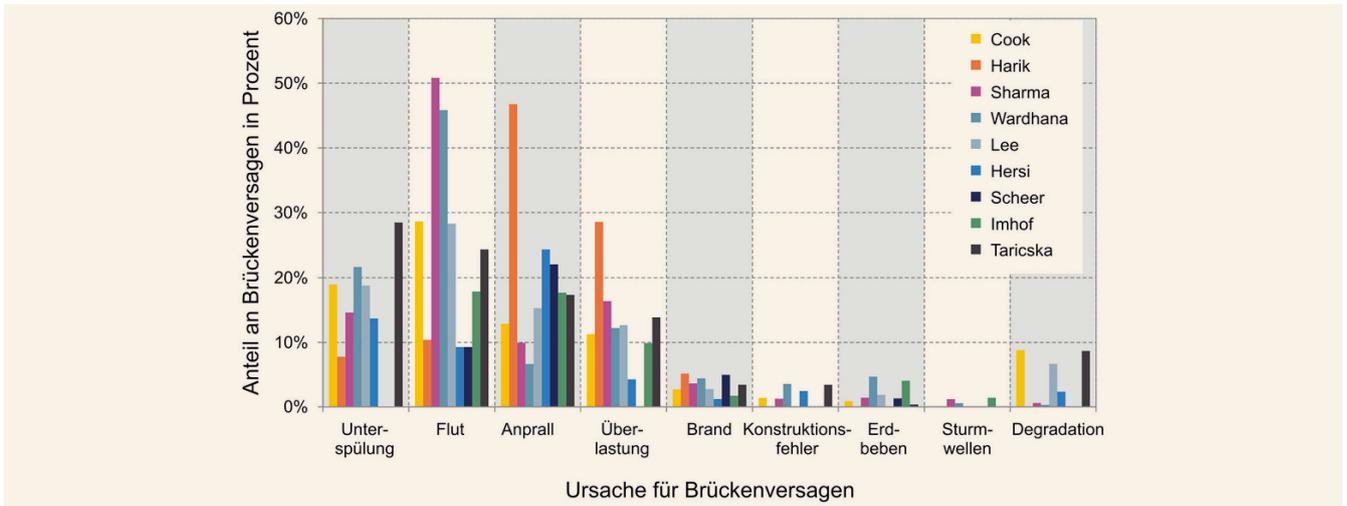


Bild. 2. Ursachen von Brückeneinstürzen nach verschiedenen Autoren. Abb.: [7]

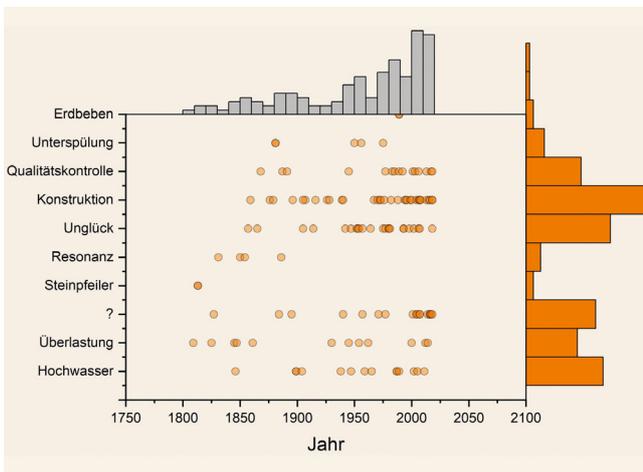


Bild. 3. Ursachen von Brückeneinstürzen für unterschiedliche Jahre. Abb.: Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Sicherheit bei Brücken – Auswertung von Brückeneinstürzen

Betrachtet man die unterschiedlichen Ursachen bei einem Brückenversagen, so zeigt sich, dass außergewöhnliche Belastungen oder Naturkatastrophen für einen Großteil der Einstürze verantwortlich sind (Bild 2). Die vier Hauptursachen nach [7] sind die Unterspülung von Pfeilern und Fundamenten, Flutereignisse oder Anprall durch zum Beispiel Fahrzeuge und Schiffe. Auch eine Überlastung von Brückenbauwerken ist einer der häufigeren Gründe.

Eine Auswertung der Ursache von circa 100 Brückeneinstürzen in Abhängigkeit des Jahres des Einsturzereignisses zeigt, dass ebenfalls Hochwasser, Überlastung und Naturkatastrophen oder Anprall (Unglück) eine häufige Ursache darstellen. In der zeitlich aufgelösten Darstellung zeigt sich jedoch auch, dass konstruktionsbedingte oder qualitätsbedingte Einstürze ab dem Jahre 1950 eine größere Rolle spielen (Bild 3). Hier muss allerdings beachtet werden, dass die Festlegung der Schadensursache nicht einheitlich und teilweise nur schwer zuordenbar ist.

Grundsätzlich zeigt sich aber, dass Brückeneinstürze häufiger vorkommen als das Sicherheitskonzept zunächst vorhersagt. An-

dererseits sind Brücken in der Regel stark exponiert und häufiger großen außergewöhnlichen Belastungen ausgesetzt als dies der übliche Hochbau ist. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist nach [7] in den letzten Jahrzehnten immer weiter gesunken. Dies liegt sicherlich auch an einem verbesserten Qualitätsbewusstsein und neueren Strategien zum Lebensdauermanagement und Inspektionen von Brückenbauwerken. Wie die Befestigungstechnik hier ihren Beitrag leisten kann, wird derzeit in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der Unternehmensgruppe fischer und der Universität Stuttgart (IWB) erforscht.

Im Gegensatz hierzu kann festgestellt werden, dass ein vollständiges Versagen einer Befestigung deutlich weniger häufig vorkommt, als das Sicherheitskonzept prognostiziert.

Grundlagen des Sicherheitskonzeptes

Das semi-probabilistische Sicherheitskonzept beruht auf der Annahme von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Einwirkung und den Widerstand. Hierbei wird die anzunehmende Verteilung zum Beispiel anhand von Versuchen oder vorhandenen Ergebnissen abgeschätzt. In der Regel kann für den Widerstand, also zum Beispiel die Verteilung von Festigkeiten bei Baustoffen oder der Tragfähigkeit von Verankerungen, eine Normalverteilung, wie in Bild 4 dargestellt, oder logarithmische Normalverteilung, angenommen werden.

Bei diesem Konzept werden der Abstand von Bemessungseinwirkung E_d und Bemessungswiderstand R_d so festgelegt, dass eine ausreichende große Zuverlässigkeit β beziehungsweise ausreichend kleine Versagenswahrscheinlichkeit p_f gewährleistet wird.

Für eine Standard-Normalverteilung kann dann die Wahrscheinlichkeit p_f für das Unterschreiten einer bestimmten Festigkeit oder Tragfähigkeit berechnet werden. Hierzu werden sogenannte Quantilwerte bestimmt. Einer der wichtigsten Quantilwerte ist die 5% Quantile (Fraktile). Für eine Normalverteilung ergibt sich dieser dadurch, dass die 1,645-fache Standardabweichung vom abgeschätzten Mittelwert abgezogen wird (Bild 5a)).

Wird nun sowohl für die Einwirkung als auch den Widerstand eine Normalverteilung angenommen und verglichen, kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, für die die Einwirkung höher ist als der Widerstand. Dies stellt grafisch die Fläche unter den sich überlappenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen dar

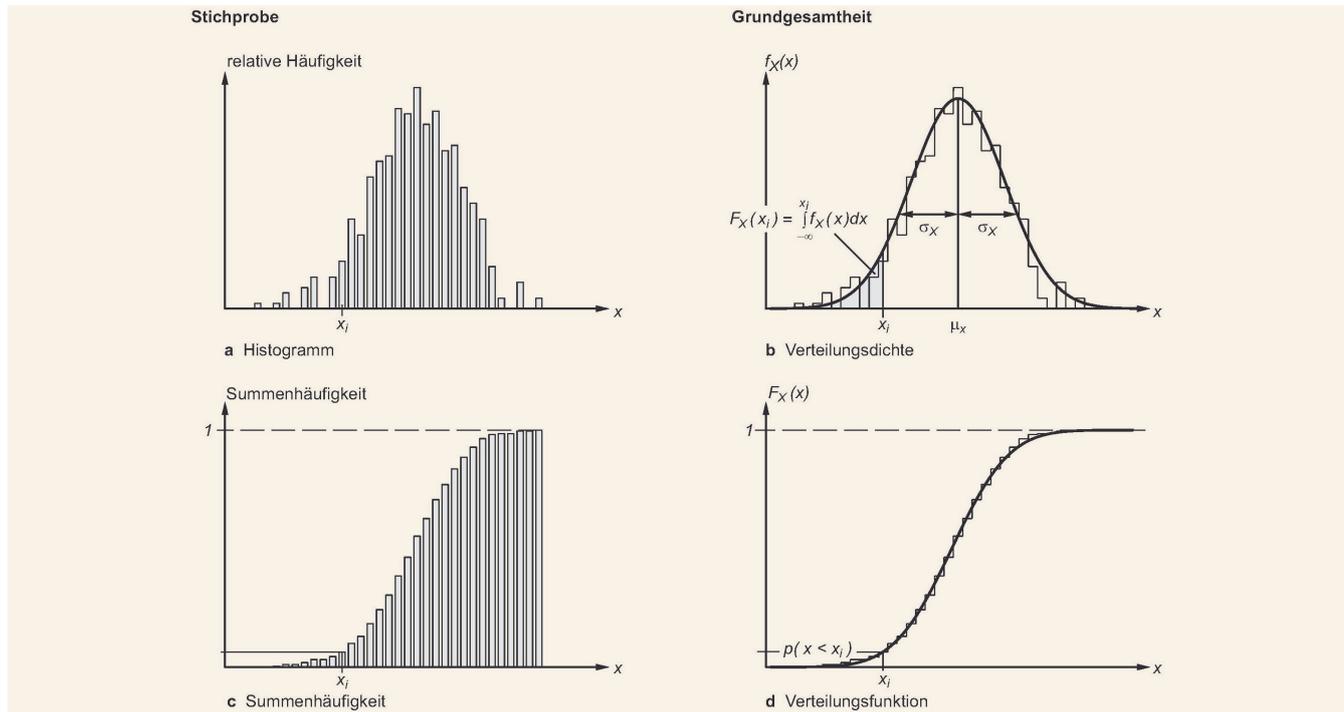


Bild. 4. Verteilungen einer Stichprobe und mathematische Verteilungen der zugehörigen Grundgesamtheit. Abb.: [1]

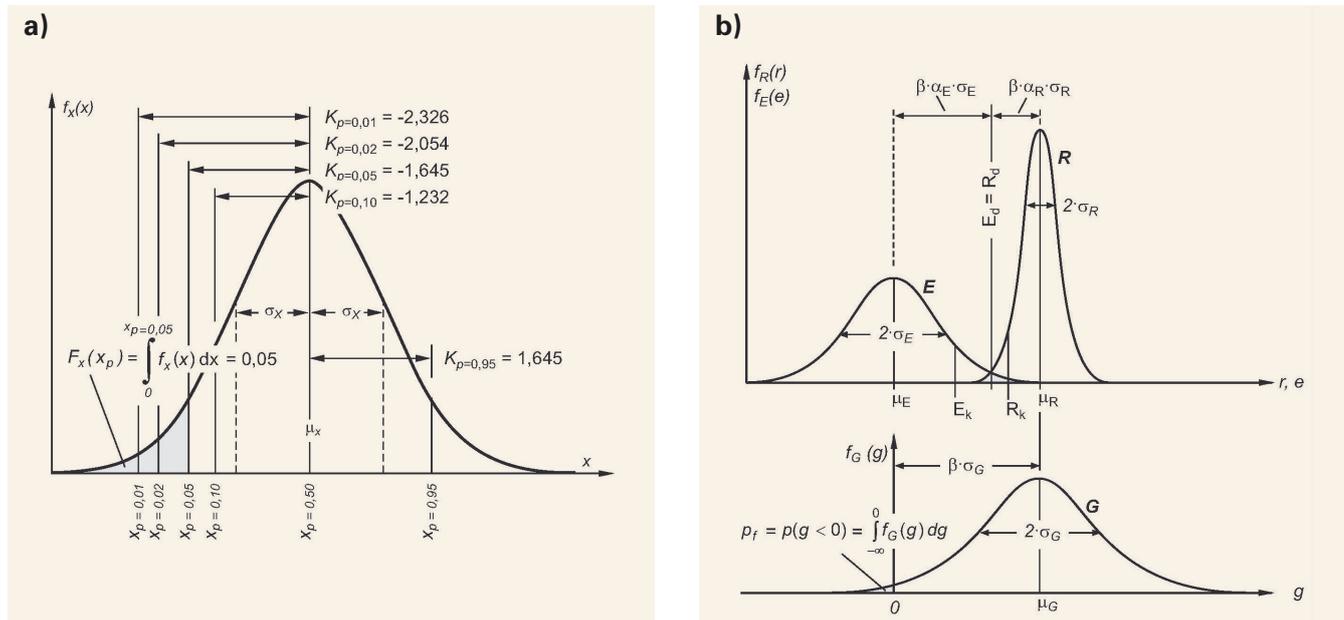


Bild. 5. a) Charakteristische Werte einer Normalverteilung und b) Definition von Zuverlässigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit. Abb.: [1]

(Bild 5b)). Wird die Verteilung der Einwirkung $E(x)$ von der Verteilung des Widerstandes $R(x)$ abgezogen, ergibt sich die Zuverlässigkeitsverteilung. Das heißt, in diesem Fall wird es zu einem Versagen kommen, wenn die Verteilung $G(x) = R(x) - E(x)$ einen Wert kleiner als 0 liefert. Im Bauwesen wird hier eine Wahrscheinlichkeit $1 \cdot 10^{-6}$ angestrebt. Diese Wahrscheinlichkeit kann auch als Zuverlässigkeit β ausgedrückt werden. Eine Wahrscheinlichkeit von $p_f = 1 \cdot 10^{-6}$ entspricht dabei einer Zuverlässigkeit von $\beta = 4,75$.

Auf dieser Basis werden für die Bemessung von Bauwerken, Bauteilen oder Produkten die Bemessungseinwirkung E_d und der

Bemessungswiderstand R_d abgeleitet. Das heißt, um eine Zuverlässigkeit von $\beta = 4,75$ zu erhalten, muss Gleichung (1) erfüllt sein:

$$E_d \leq R_d \tag{1}$$

Die Werte E_d und R_d werden im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Dabei wird zwischen der Zuverlässigkeit β innerhalb eines Zeitraums von einem Jahr oder 50 Jahren unterschieden. Beiden liegt dieselbe Versagenswahrscheinlichkeit p_f für den entsprechenden Betrachtungszeitraum zugrunde. Der Zuverlässigkeitsin-

dex kann explizit berechnet werden, wenn der Mittelwert und die Streuung (Standardabweichung s) der Einwirkung und des Widerstandes bekannt sind. Der Sicherheitsindex β berechnet sich mit Gleichung (2).

$$\beta = \frac{\mu_m}{\sigma_m} \quad (2)$$

$$\mu_m = R_m - E_m \quad (2a)$$

$$\sigma_m = \sqrt{s_R^2 - s_E^2} \quad (2b)$$

Nach EN 1990 ist für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ein Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 4,7$ (für 1 Jahr) bzw. $\beta = 3,8$ (für 50 Jahre) einzuhalten. Nach Model Code 2010 können diese Werte bei einer geringen Schadensfolge auf $\beta = 4,1$ (für 1 Jahr) beziehungsweise $\beta = 3,1$ (für 50 Jahre) reduziert werden (Tabelle 1). Die Einordnung des semi-probabilistischen Verfahrens nach [4] ist in Tabelle 2 dargestellt.

Die Zielwerte für die Zuverlässigkeit β sind in jedem Land unterschiedlich geregelt. Man könnte dies als nationales „Sicher-

Tabelle 1. Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit bei Bauwerken für eine Referenzperiode von 1 Jahr bzw. 50 Jahren [2].

		Zuverlässigkeit β	Referenzperiode
Gebrauchstauglichkeit	umkehrbar	0,0	Nutzungsdauer
	nicht umkehrbar	1,5	50 Jahre
Tragfähigkeit	geringe Schadensfolge (\approx RC1)	3,0	1 Jahr
		3,1	50 Jahre
	mittlere Schadensfolge (\approx RC2)	4,1	1 Jahr
		3,8	50 Jahre
	hohe Schadensfolge (\approx RC3)	4,7	1 Jahr
		4,3	50 Jahre
	5,1	1 Jahr	

Tabelle 2. Einordnung probabilistischer Verfahren [4].

Ebene	Berechnungsmethode	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Grenzzustandsfunktionen	Sicherheitsmaß Ergebnis
semiprobabilistische Verfahren	Kalibrierung	nicht verwendet	-	Teilsicherheitsfaktoren
probabilistische Näherungsverfahren	FOSM	ausschließlich Normalverteilung	Linear	approximative Versagenswahrscheinlichkeit
	FORM, SORM	alle Typen	Linear oder Quadratisch	

heitsbedürfnis“ bezeichnen. Nach den Angaben in [3] können dabei die in Tabelle 3 angegebenen Werte als Anhaltspunkte herangezogen werden. Die mittleren Zielwerte variieren dabei von 3,6 bis 4,8. Dies entspricht einer akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit zwischen $1,6 \cdot 10^{-4}$ und $7,9 \cdot 10^{-7}$.

Vergleicht man diese Wahrscheinlichkeiten mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von alltäglichen Ergebnissen (Tabelle 4), so erkennt man, dass die akzeptierte mittlere Zuverlässigkeit für Bauwerke in den einzelnen Ländern ganz grob zwischen der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Autounfalls und eines Flugzeugabsturzes liegt.

Die Annahme einer Normalverteilung ist jedoch nur dann gerechtfertigt, wenn die Grundgesamtheit als bekannt vorausgesetzt werden kann und entsprechend viele Ergebnisse vorliegen. Die oben getroffenen Aussagen gelten jedoch nur, wenn tatsächlich eine Normalverteilung und die Annahmen für den Mittelwert und die Streuung korrekt sind. Da sowohl der Mittelwert (z. B. Widerstand) als auch die Streuung aus Versuchen abgeschätzt werden, können diese Werte nur mit einer bestimmten Aussagewahrscheinlichkeit angenommen werden. Leitet man die 5 % Quantile der Normalverteilung ab, so muss davon ausgegangen werden, dass diese 5 % Quantile ebenfalls normalverteilt ist (Bild 6). Gleiches gilt auch für den Mittelwert. Die in EN 1990 geforderte Aussagewahrscheinlichkeit für die 5 % Quantile beträgt 75 %. In der Befestigungstechnik wird hingegen eine Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % angestrebt. Dies liegt daran, dass Verankerungen fast ausschließlich die Zugfestigkeit beziehungsweise die Bruchenergie des Materials planmäßig ausnutzen.

Tabelle 3. Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex in unterschiedlichen Ländern [3].

Zielwerte für die Zuverlässigkeit $\beta_{1, \text{Jahr}}$			
Land	Minimale	Mittlere	Maximale
Argentinien	3,1	4,1	5,1
China	3,1	3,6	4,1
Dänemark	3,7	4,2	4,7
Deutschland	4,2	4,7	5,2
Estland	4,2	4,7	5,2
Italien	4,2	4,7	5,2
Kanada	3,1	3,75	4,4
Niederlande	3,6	3,85	4,1
Österreich	4,2	4,2	4,2
Schweden	3,7	4,25	4,8
Spanien	4,2	4,2	4,2
Südafrika	3,4	4,1	4,8
UK	4,8	4,8	4,8
USA	3,9	3,9	3,9

Tabelle 4. Abgeschätzte Wahrscheinlichkeiten und zugehöriger Zuverlässigkeitsindex β für unterschiedliche Risiken [6].

Zuverlässigkeit / Wahrscheinlichkeit für Tod durch / Gewinn bei	p_f	β
Flugzeugabsturz	$2,5 \cdot 10^{-10}$	6,22
Blitzschlag	$7,2 \cdot 10^{-9}$	5,67
Lotto	$1,0 \cdot 10^{-9}$	6,00
Hundebiss	$2,5 \cdot 10^{-8}$	5,45
Einsturz Tragwerk	$1,0 \cdot 10^{-6}$	4,75
Autounfall	$1,0 \cdot 10^{-4}$	3,72
Roulette	$2,7 \cdot 10^{-2}$	1,93
6er beim Würfeln	$1,67 \cdot 10^{-1}$	0,97

Tabelle 5. Berechnung der 5% Fraktile mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % und 75 % in Abhängigkeit von der Versuchsanzahl.

Anzahl der Versuche n	k-Faktoren zur Berechnung der 5%-Fraktile			
	Standardabweichung s unbekannt		Standardabweichung s bekannt	
	Aussagewahrscheinlichkeit			
	p = 0,90	p = 0,75	p = 0,90	p = 0,75
2	13,090	5,122	2,551	2,122
3	5,312	3,152	2,385	2,034
4	3,957	2,681	2,286	1,982
5	3,400	2,463	2,218	1,946
10	2,568	2,104	2,050	1,858
20	2,208	1,932	1,931	1,796
30	2,080	1,869	1,879	1,768
40	2,010	1,834	1,847	1,751
50	1,965	1,811	1,826	1,740
∞	1,645	1,645	1,645	1,645

Für die Ableitung der 5 % Quantile wird in der Befestigungstechnik daher die sogenannte Owen-Verteilung verwendet. Mit dieser kann die 5 % Quantile in Abhängigkeit der Anzahl der vorliegenden Versuchsergebnisse für unterschiedliche Aussagewahrscheinlichkeiten berechnet werden (Tabelle 5).

Ermittlung der Bemessungswerte für Widerstand und Einwirkung

Auf der Widerstandsseite muss neben der Festlegung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_M auch der charakteristische Wert berechnet werden. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, aus Versuchen einen Fraktilwert (charakteristischen Widerstand) abzuleiten. Dies kann in Anlehnung an EAD 330232 oder EN 1990 erfolgen (Gleichung 3).

$$R_d = R_k / \gamma_M \tag{3}$$

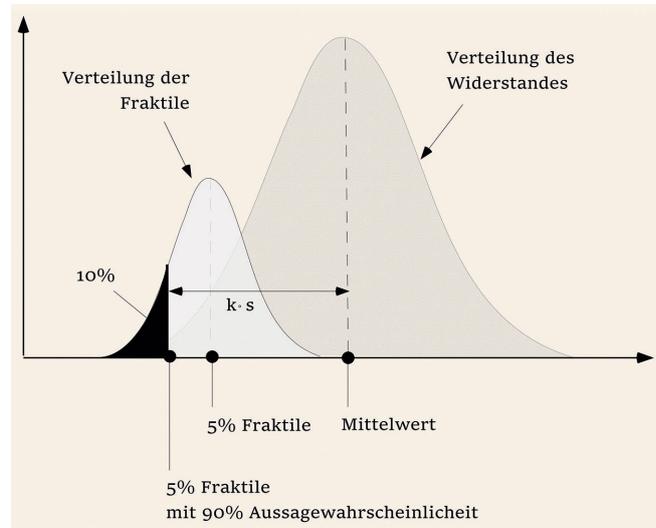


Bild. 6. a) Bestimmung des Fraktilwerts mit einer bestimmten Aussagewahrscheinlichkeit, hier 90 % für Befestigungsmittel. Abb.:

Bei der Festlegung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_M spielen mehrere Faktoren eine Rolle, die bei der Festlegung berücksichtigt werden müssen:

- Modellunsicherheit mit der Berechnung der Widerstandsgrößen
- Kombinationsfaktoren bei mehreren Einwirkungskomponenten
- Kombinationsfaktoren für unterschiedliche Einwirkungskombinationen (selten, häufig, quasi ständig, ...)

$$R_k = R_{u,m} \cdot (1 - k_n \cdot V) = R_{u,m} \cdot (1 - k_n \cdot \frac{s_{R_{u,m}}}{R_{u,m}}) \tag{4}$$

Der Faktor k_n ist hauptsächlich von folgenden Faktoren abhängig:

- Annahme der zugrunde gelegten Verteilung.
(z. B. EAD 330232 Verteilung nach Owen, EN 1990-1 Normalverteilung)
- Annahme der Aussagewahrscheinlichkeit für den Fraktilwert (z. B. EAD 330232 90 %, EN 1990-1 75 %)
- Annahme, ob die Streuung des Widerstandes als bekannt angenommen werden kann, z. B. systembedingt nach oben begrenzt ist.
- Anzahl der durchgeführten Versuche.

Die auftretenden Einwirkungen auf ein Bauteil oder einen Dübel sind nach EN 1991-1 beziehungsweise EN 1992-1 geregelt. Werden zulässige Lasten angegeben, so entspricht dieser Wert derjenigen Last, die tatsächlich auf die Verankerung aufgebracht werden darf.

Die Bemessungseinwirkung berechnet sich mit Gleichung (5).

$$E_d = E_k \cdot \gamma_M \tag{5}$$

Bei der Festlegung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_f spielen mehrere Faktoren eine Rolle, die bei der Festlegung berücksichtigt werden müssen:

- Streuung der Einwirkung
- Modellsicherheit bei der Ermittlung der Einwirkungsgrößen
- Kombinationsfaktoren bei mehreren Einwirkungsarten
- Kombinationsfaktoren für unterschiedliche Einwirkungskombinationen (selten, häufig, quasi ständig, ...)

Für ständig einwirkende Lasten beträgt der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_f = 1,35$ und für veränderliche Lasten (auch quasi ständige Lasten) $\gamma_f = 1,5$.

Zusammenfassung

Unter Einhaltung und Berücksichtigung der obigen Ausführungen ist es möglich, sichere Tragwerke und Bauteile herzustellen. Allerdings ist die Anzahl der weltweit erstellten Bauwerke so hoch, dass es trotz der angestrebten hohen Zuverlässigkeit immer wieder zu Tragwerksversagen oder Schäden an Bauwerken kommt und aus Sicht der Wahrscheinlichkeitstheorie kommen muss. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein Tragwerksversagen sehr unterschiedliche Ursachen haben kann. Für die meisten Ursachen gelten dann schlicht und einfach die angenommenen Eingangsvariablen und Verteilungen nicht mehr, wie dies beispielsweise bei einer Naturkatastrophe der Fall wäre.

Für Verankerungen liegt die Versagenswahrscheinlichkeit in einem vergleichbaren Bereich wie diejenige des Bauwerks. In der Regel gilt dies sogar für die ungünstigsten Randbedingungen, sodass die Versagenswahrscheinlichkeit unter günstigen Bedingungen deutlich niedriger liegt. Allerdings ist die tatsächliche Berechnung der Einwirkung auf die Verankerungen deutlich aufwendiger und komplexer, da lokale Effekte aus der Ankerplatte oder der Anschlusskonstruktion mitberücksichtigt werden müssen. Die Widerstände von Verankerungen können nach EN 19924 berechnet werden, sodass eine Zuverlässigkeit von $\beta = 3,8$ für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren erreicht wird.

Literatur

- [1] *Zilch, K.; Zehetmaier, G.*: Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 (Fassung 2008), und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Springer-Verlag, Heidelberg, 2009.
- [2] *fib Model Code for Concrete Structures 2010: First Edition* fib – fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete. © 2013 fib – fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete. 2013.
- [3] *Hansen, M.*: Vortrag zur Handlungsanleitung der Sicherheit im Bauwesen: FORUM46 – Interdisziplinäres Forum für Europa e. V.
- [4] *Schnell, J.; Fischer, A.; Loch, M.*: Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Bestandsbauten im Hochbau, Abschlussbericht, Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7 – 06.8 / II 2 – F20-06-019, Kaiserslautern, 2008.
- [5] *Bergmeister, K.; Curbach, M.; Strauss, A. et al.*: Sicherheit und Gefährdungspotenziale im Industrie- und Gewerbebau. In: Beton-Kalender 2006, S. 289.
- [6] *Graubner, A.*: Weiterbildung für Tragwerksplaner, DIN 1055, T3, T5 und T100, TU Darmstadt, 2007.
- [7] *Prose D.*: Bridge Collapse Frequencies and Failure Probabilities. Springer-Verlag, Berlin, 2018.



Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Universität Stuttgart
 Institut für Werkstoffe
 Stellvertretender Direktor der MPA (Materialprüfungsanstalt) der Universität Stuttgart

Abb.: MPA Universität Stuttgart

Sonderdrucke: Werbewirksames Marketing- und PR-Instrument

UNSER ANGEBOT !



In einer unserer Fachzeitschriften ist ein Beitrag von Ihrem Unternehmen erschienen? Nutzen Sie das für eine PR-Aktion der besonderen Art – lassen Sie einen werbewirksamen Sonderdruck davon erstellen:

- Sonderdrucke werden individuell nach Ihren Wünschen gestaltet
- Logo und Kontaktdaten können eingefügt werden
- Fremdanzeigen und Fremdtexthe werden entfernt
- Sonderdrucke sind kostengünstig und lassen sich vielseitig einsetzen (z. B. auf Ihrem Messestand, für Kunden und Mitarbeiter etc.)

Profitieren Sie vom Imagetransfer und dem hohen Renommee unserer Fachzeitschriften.

Ihr Kontakt für Informationen oder ein Angebot:
Kornelia Grund
Telefon: +49 211 6103-369
kgrund@vdi-fachmedien.de
www.vdi-fachmedien.de

vdi fachmedien

TECHNIKWISSEN FÜR INGENIEURE.

Jetzt Bauingenieur*
abonnieren,
20 % RABATT
bekommen.



10
AUSGABEN
PRO JAHR

*
Angebot nur gültig
für Neu-Abonnenten

Sie wollen einzigartige Fachinformationen zum konstruktiven Ingenieurbau, bei der Planung und Ausführung von Bauprojekten? Dann abonnieren Sie die richtungweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen. Auf das Jahres-Abo erhalten Sie im ersten Jahr 20% Rabatt – statt 453 EUR zahlen Sie nur 362,40 EUR zzgl. 14,50 EUR Versandkosten innerhalb Deutschlands!

Jetzt abonnieren!

VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Leserservice, 65341 Eltville

Telefon: +49 6123 9238-202, Telefax: +49 6123 9238-244, vdi-fachmedien@vuservice.de

TECHNIKWISSEN FÜR INGENIEURE.

www.vdi-fachmedien.de

VDI fachmedien