

## ERDBEBENINGENIEURWESEN UND BAUDYNAMIK

Eine gemeinsame Publikation von

**D G E B**

Deutsche Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.dgeb.eu

**O G E**

Österreichische Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.oge.or.at

**S G E B**

Schweizer Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.sgeb.ch

**Inhalt****Aufsätze**

- S 2 **Ermittlung der dynamischen  
Kennwerte von Eisenbahnbrücken  
unter Anwendung von unterschiedlichen  
Schwingungsanregungsmethoden**  
M. Reiterer, S. Lachinger, J. Fink,  
S.-Z. Bruschetini-Ambro
- S 14 **Zur Fehlerfortpflanzung in der  
probabilistischen Erdbeben-  
gefährdungsanalyse**  
M. Raschke

**Meldung**

- S 20 **Generalversammlung OGE –  
Neuwahl des Vorstands**

**EDITORIAL**

Liebe Leserinnen,  
liebe Leser,

wenn Sie diese Ausgabe der D-A-CH-Mitteilungsblätter in den Händen halten, wird die 15. D-A-CH-Tagung Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik bereits in Weimar stattgefunden haben. Aufgrund der Terminlage der Tagung und des Redaktionsschlusses können wir in dieser Ausgabe leider weder über die Tagung noch über die Mitgliederversammlung der DGE B berichten. Diese Berichte werden Ihnen in geeigneter Form demnächst zugänglich gemacht.

Heute dürfen wir Ihnen mitteilen, dass die Mitglieder der Österreichischen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik auf ihrer Generalversammlung einen neuen Vorstand gewählt haben. Die Vorstände der beiden Schwestergesellschaften in Deutschland und in der Schweiz, DGE B und SGE B, gratulieren den Kollegen herzlich zu ihrer Wahl und freuen sich auf die Fortsetzung der guten Zusammenarbeit der letzten Jahre. An dieser Stelle sei dem vorherigen Vorstand der OGE für die angenehme Kooperation ausdrücklich gedankt. Über die Generalversammlung der OGE wird auf den folgenden Seiten kurz berichtet.

Sämtliche Prognosen, die auch in der Baudynamik und im Erdbebeningenieurwesen erstellt werden, beruhen auf verschiedensten Annahmen, die unseren Modellen zugrunde liegen. Die beiden Fachaufsätze in dieser Ausgabe der D-A-CH-Mitteilungsblätter befassen sich kritisch mit Beispielen für solche Annahmen, die in dem einen Fall die Prognose von Brückenschwingungen bei der Überfahrt von Eisenbahnzügen und im anderen Fall die Erdbebengefährdungsanalyse betreffen.

Beide Beiträge sollten zur Diskussion der derzeitigen Praxis anregen. Eine Möglichkeit, auf die Aufsätze zu reagieren und zu dieser Diskussion beizutragen, besteht darin, selbst einen Aufsatz in einer der folgenden Ausgaben der D-A-CH-Mitteilungsblätter zu veröffentlichen. Dazu sowie zur Veröffentlichung anderer interessanter Arbeiten sind Sie herzlich eingeladen. Sie können Ihre Beiträge jederzeit über die DGE B, die OGE und die SGE B einreichen. Die Kontaktdaten sowie weiterführende Informationen über die drei Gesellschaften enthalten deren Internetseiten:

[www.dgeb.eu](http://www.dgeb.eu)  
[www.oge.or.at](http://www.oge.or.at)  
[www.sgeb.ch](http://www.sgeb.ch)

Volkmar Zabel  
Günther Achs  
Thomas Wenk

S 1



Volkmar Zabel  
(Vorsitzender DGE B)



Günther Achs  
(Generalsekretär OGE)



Thomas Wenk  
(Vorsitzender SGE B)

# Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken unter Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden

M. Reiterer, S. Lachinger, J. Fink, S.-Z. Bruschetini-Ambro

S 2

**Zusammenfassung** Zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken wurden in den letzten 20 Jahren in Österreich vorwiegend die ambiente Schwingungsanregung, die Analyse des zeitlichen Ausschlagens nach Zugüberfahrt und die Impulsanregung mit einem Sandsack oder Ähnlichem angewendet. Bei der Anwendung dieser unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden zeigte sich, dass insbesondere die Werte für die Strukturdämpfung sehr stark streuen und nicht immer reproduzierbar sind. Die Vergleichbarkeit von Erst- und Folgemessungen sowie die von unterschiedlichen Büros durchgeführten Messungen ist hier oftmals nicht gegeben. Im vorliegenden Artikel wird ergänzend zu den angeführten üblichen Methoden zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte die erst im letzten Jahr systematisch bei einer Vielzahl von Eisenbahnbrücken angewendete krafterreichte Schwingungsanregungsmethode vorgestellt. In den Jahren 2016 und 2017 wurden bei insgesamt 20 Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs sowohl die oben genannten üblichen als auch krafterreichte Schwingungsanregungen mit bis zu vier parallel geschalteten mobilen Long Stroke Shakern sowie einem mechanischen Unwuchterreger durchgeführt. Die erzielten Messergebnisse werden dargelegt und es wird ein Vergleich der mit den unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden erzielten Ergebnisse für die dynamischen Kennwerte durchgeführt. Es zeigt sich, dass die krafterreichte Schwingungsanregungsmethode für die Ermittlung der Eigenfrequenzen und insbesondere der Lehr'schen Dämpfung von Eisenbahnbrücken zu äußerst zuverlässigen, wenig streuenden und reproduzierbaren Ergebnissen führt. Die Lehr'schen Dämpfungen ergeben insbesondere bei Rahmentragwerken wesentlich höhere Werte verglichen mit den Vorgabewerten der derzeit gültigen Normen.

## 1 Einleitung

Die bei Zugüberfahrt sich einstellenden vertikalen Tragwerksbeschleunigungen von Eisenbahnbrücken werden maßgebend von den Eigenfrequenzen des Brückentragwerks  $f_i$  und von der Größe der Lehr'schen Dämpfung  $\zeta$  beeinflusst. Im Zuge von dynamischen Berechnungen der Tragwerke infolge der Zugsüberfahrten wird ein geeignetes Rechenmodell erstellt, bei dem sich die Eigenfrequenzen  $f_i$  in Abhängigkeit von der Spannweite  $L$ , der Lagerungsart, der Masse pro Längeneinheit  $\rho A$  und der Biegesteifigkeit  $EJ$  aus einer Eigenwertberechnung ergeben [1]. Die Größe der Lehr'schen Dämpfung  $\zeta$  wird in Abhängigkeit vom Brückentyp der ÖNORM EN 1991-2 [2] entnommen. Die in [2] angegebenen unteren Grenzwerte für die Lehr'sche Dämpfung liegen bei  $\zeta = 0,5\%$  für Stahlbrücken und bei  $\zeta = 1,5\%$  für Stahlbetonbrücken. Für Brücken mit einer Spannweite  $< 20\text{ m}$  wird in [2] ein von der Spannweite  $L$  abhängiger Dämpfungszuschlag angegeben. Aufgrund der in diesem Artikel präsentierten Ergebnisse von durchgeführten dynamischen Messungen wird sich herausstellen, dass die in [2] angegebenen Werte für die Lehr'sche Dämpfung insbesondere bei Eisenbahnbrücken, die als Rahmentragwerke mit Schotteroberbau ausgeführt sind, äußerst konservativ (zu gering) sind.

Unter Verwendung der aus [2] entnommenen Werte für die Lehr'sche Dämpfung ergeben sich bei dynamischen Berechnungen der Zugsüberfahrten sehr häufig vertikale Tragwerksbeschleunigungen, die den in [2] definierten Grenzwert von  $a_{zul} \leq 3,5\text{ m/s}^2$  (für Neubauten) überschreiten [3]. Zur Ausnützung von Systemreserven (in Eigenfrequenz und Dämpfung) sowie zur Kalibration der theoretischen Rechenmodelle an die realen Verhältnisse, können die dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken durch in-situ-Messungen, unter Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden, ermittelt werden.

In Österreich wurden in den letzten 20 Jahren bei dynamischen Messungen von Eisenbahnbrücken vorwiegend Schwingungsanregungsmethoden angewendet, bei denen die in das Brückentragwerk eingetragenen Erregerkräfte und Erregerfrequenzen nicht definiert sind. Die üblicherweise angewendeten Schwingungsanregungsmethoden sind: ambiente Schwingungsanregung, Impulsanregung mit Sandsack oder Ähnlichem und die Zugüberfahrt mit Analyse des zeitlichen Ausschlagens der Brücke.

Bei der ambienten Schwingungsanregung werden Beschleunigungssensoren an einer Brücke montiert und für die Anregung werden natürlich vorkommende dynamische Umgebungseinwirkungen wie zum Beispiel Windanregung oder Mikroeseismik verwendet. Bei der Sandsackmethode wird dem Brückentragwerk Energie mittels eines Impulses (Sandsack oder Impulshammer) zugeführt. Bei der Zugüberfahrt wird die Schwingungsantwort des Brückentragwerks während der Zugüberfahrt und nach Abfahren des

### Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Reiterer

REVOTEC zt gmbh  
Hermannngasse 18, 1070 Wien, Österreich  
michael.reiterer@revotec.at, Tel. 0043 1 890 99 74

### Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Stefan Lachinger

AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
stefan.lachinger@ait.ac.at, Tel. 0043 50550-6583

### Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink

Technische Universität Wien  
Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau  
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich  
josef.fink@tuwien.ac.at, Tel. 0043 1 58801 21314

### Dipl.-Ing. Dr.techn. Sebastian-Zoran Bruschetini-Ambro

ÖBB Infrastruktur AG  
Nordbahnstraße 50, 1020 Wien, Österreich  
sebastian-zoran.bruschetini-ambro@oebb.at  
Tel. 0043 1 93000 22859



**Bild 1.** Kraftherregte Schwingungsanregung mit dem tragbaren Long Stroke Shaker

Zuges von der Brücke mit Beschleunigungssensoren gemessen. Alle genannten Methoden haben den Nachteil, dass die in das Tragwerk eingetragenen Erregerkräfte und Erregerfrequenzen nicht definiert sind. Dadurch ergeben sich Unsicherheiten und folgend teilweise hohe Streuungen in den ermittelten dynamischen Kennwerten (Eigenfrequenzen und Lehr'sche Dämpfungen). Die Vergleichbarkeit von Erst- und Folgemessungen sowie von unterschiedlichen Büros durchgeführte Messungen ist hier oftmals nicht gegeben.

Zur Lösung der bestehenden oder anderer Problematiken wurde im Jahr 2016 im Auftrag der ÖBB-Infrastruktur AG das Projekt KOMET gestartet, in dem unter anderem die Anwendung von „kraftherregten“ Anregungsmethoden zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken untersucht wird. Neben bis zu vier tragbaren elektromagnetischen Schwingerregern in Parallelbetrieb, den sogenannten Long Stroke Shakern, mit einer maximalen Erregerkraftamplitude von  $4 \cdot 0,445 \text{ kN} = 1,78 \text{ kN}$ , wurde ein mechanischer Unwuchterreger mit einer maximalen Erregerkraftamplitude von  $150 \text{ kN}$  zur Schwingungsanregung der für die dynamischen Messungen ausgewählten Eisenbahnbrücken eingesetzt. Bei diesen „kraftherregten“ Anregungsmethoden ist die Größe der Erregerkraft und die Erregerfrequenz zu jedem Zeitpunkt bekannt, da sowohl die Erregerfrequenz als auch die bewegte Trägheitsmasse genau bekannt sind.

In den Jahren 2016 und 2017 wurde an 20 Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs, dynamische in-situ-Messungen mit Anwendung der genannten unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden durchgeführt. Die dabei ermittelten dynamischen Kennwerte werden im vorliegenden Artikel dargelegt und die mit den unterschiedlichen Methoden ermittelten Werte für die Eigenfrequenzen und die Lehr'sche Dämpfung werden verglichen und diskutiert. Es zeigt sich, dass bei den durchgeführten Messungen je nach Brückentyp signifikant höhere Werte der Lehr'schen Dämpfung  $\zeta$  gegenüber den in der ÖNORM EN 1991-2 [2] angegebenen Werten ermittelt werden. Ebenso zeigen sich bei den gemessenen Eigenfrequenzen der Eisenbahnbrü-

cken, insbesondere bei Stahlbeton-Rahmentragwerken, signifikante Abweichungen zu vorab rechnerisch ermittelten Eigenfrequenzen, da deren Ermittlung bei Rahmentragwerken große Unsicherheiten in den Eingangsdaten birgt.

## 2 Angewendete kraftherregte Schwingungsanregungsmethoden

Aufgrund der großen Bedeutung sowie der bei den durchgeführten in-situ-Messungen erzielten Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die sich bei Anwendung der kraftherregten Schwingungsanregungsmethode zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken ergeben haben, wird diese moderne Methode in diesem Abschnitt detaillierter vorgestellt.

Die kraftherregten Schwingungsanregungsmethoden bieten den großen Vorteil, dass die in das Tragwerk eingetragenen Erregerkräfte und Erregerfrequenzen genau vorgegeben werden können und zu jedem Zeitpunkt bekannt sind. Die verwendeten elektrodynamischen Schwingerreger (Long Stroke Shaker) verfügen über einen geschlossenen Regelkreis, der die voreingestellte Erregerkraft über die gesamte Dauer der Messung regelt. Es ist auch möglich, automatisierte Frequenzsweeps mit unterschiedlichen Sweep-Geschwindigkeiten zur Identifikation der Eigenfrequenzen durchzuführen. Neben den automatisierten Sweeps können auch sogenannte „manuelle“ Frequenzsweeps durchgeführt werden, bei denen bei vorgegebenen Frequenzen der eingeschwingene Zustand erzeugt und das Frequenzspektrum punktuell über verschiedene diskrete Frequenzpunkte ermittelt wird. Aus diesem über den manuellen Sweep generierten Spektrum kann durch Anwenden der Bandbreitenmethode (Half-Power Bandwidth Method) [1] die Größe der Lehr'schen Dämpfung zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden. Durch die bekannte Größe der Erregerkraft sind die bei dynamischen Erst- und Folgemessungen ermittelten Eigenfrequenzen und Lehr'sche Dämpfungen eindeutig miteinander vergleichbar. Insbesondere können mit den kraftherregten Anregungsmethoden auch etwaig vorhandene Amplitudenabhängigkeiten der Eigenfrequenzen und der Lehr'schen Dämpfung ermittelt werden.

### 2.1 Schwingungsanregung mit dem Long Stroke Shaker

Bei dem Long Stroke Shaker handelt es sich um einen tragbaren elektromagnetischen Schwingerreger mit einem Eigengewicht von  $70 \text{ kg}$  (ohne die bewegte Reaktionsmasse von  $30,6 \text{ kg}$ ). Aufgrund seines geringen Eigengewichts kann der Long Stroke Shaker durch zwei Personen auf einer Eisenbahnbrücke aufgestellt und in Betrieb genommen werden (**Bild 1**). Mit den seitlich angeordneten elastischen Gummibändern werden die Reaktionsmassen in eine mittige Gleichgewichtslage gebracht.

Der Long Stroke Shaker kann, in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz, maximale Erregerkraftamplituden von  $445 \text{ N}$  erzeugen und über den Frequenzbereich von  $0,1 \text{ Hz}$  bis  $200 \text{ Hz}$  betrieben werden. Der Betrieb erfolgt mit einem Leistungsverstärker, welcher über einen geschlossenen Regelkreis von der Messkarte angesteuert wird. Ein großer Vorteil dieses Schwingerregers ist die Möglichkeit des Synchronschaltens und Betriebens von bis zu vier Geräten gleichzeitig. Damit können die Erregerkräfte vervierfacht werden und zusätzlich besteht die Möglichkeit, die einzelnen Shaker phasenverschoben zueinander zu betreiben:

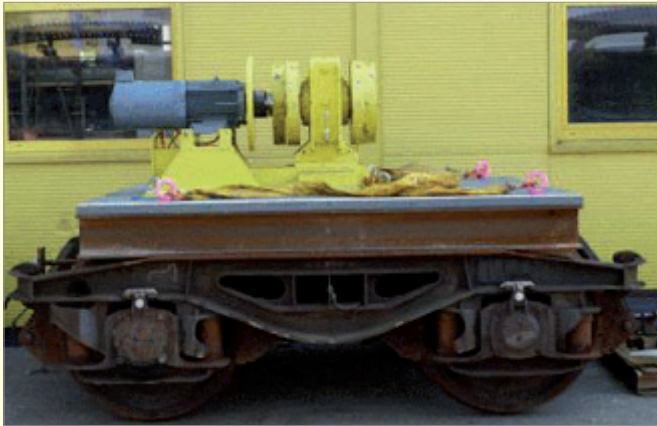


Bild 2. Kraftrerregte Schwingungsanregung mit dem mechanischen Unwuchterreger

Bei Brücken können somit zum Beispiel Torsionsschwingungen und höhere Schwingungsformen gezielt angeregt werden [4].

Die Erregerkräfte und Erregerfrequenzen sind zu jedem Zeitpunkt bekannt und damit eindeutig definiert. Die Ermittlung der Eigenfrequenzen und Dämpfungen von Eisenbahnbrücken kann amplitudenabhängig erfolgen. Jeder Long Stroke Shaker wird mit einem eigenen Beschleunigungssensor ausgestattet und über diesen Sensor erfolgt die Regelung der in der Steuerungssoftware vordefinierten Erregerkraft und Erregerfrequenz (closed loop control). Durch den geschlossenen Regelkreis kann über den gesamten interessierenden Frequenzbereich eine konstante Erregerkraft sichergestellt werden. Die dynamischen Kennwerte (Eigenfrequenzen und Lehr'sche Dämpfung) können daher mit den Long Stroke Shakern zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden. Es handelt sich um ein tragbares Anregungssystem, das zum Beispiel auch seitlich am Randbalken von Eisenbahnbrücken aufgestellt werden kann und damit den planmäßigen Eisenbahnbetrieb nicht stört.

### 2.2 Schwingungsanregung mit dem mechanischen Unwuchterreger

Der mechanische Unwuchterreger mit elektrischen Antrieb kann mit verschiedenen Unwuchtmassen bei verschiedenen Frequenzen (ca. 2 Hz bis ca. 25 Hz) betrieben werden. Dadurch ist es möglich, die dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken aufgrund der veränderbaren Unwuchtmassen auch amplitudenabhängig zu ermitteln. Im Bild 2 ist der auf einem Drehgestell montierte mechanische Unwuchterreger dargestellt.

Bei den durchgeführten dynamischen in-situ-Messungen wurde der Unwuchterreger ohne Drehgestell auf der Brücke abgestellt und als Zusatzmassen wurden Beton- und Stahlplatten verwendet (Bild 11). Die Anregungskräfte und Anregungsfrequenzen sind auch beim mechanischen Unwuchterreger zu jedem Zeitpunkt bekannt und damit eindeutig definiert. Die mit dem Erreger in die Brücke eintragbare Anregungsenergie ist mit einer Zugüberfahrt vergleichbar. Damit können die dynamischen Kennwerte (Eigenfre-

quenzen und Lehr'sche Dämpfung) auf einem realitätsnahen Schwingungsamplitudenniveau sowie amplitudenabhängig ermittelt werden.

### 3 Dynamische in-situ-Messungen bei Eisenbahnbrücken

In den Jahren 2016 und 2017 wurden unter Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden bei insgesamt 20 einfeldrigen Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs dynamische in-situ-Messungen zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte durchgeführt. Die dynamischen Messungen umfassten folgende Brückentypen:

- Stahldeckbrücken
- WIB Tragwerke
- Rahmentragwerke
- Stahlbetonplatten

In diesem Abschnitt wird die Durchführung der Messungen und die mit den unterschiedlichen angewendeten Methoden erzielten Messergebnisse für zwei ausgewählte Eisenbahnbrücken (eine Stahldeckbrücke und ein Rahmentragwerk) im Detail dargestellt und interpretiert. Die Zusammenstellung der Ergebnisse für die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  aller 20 gemessenen Eisenbahnbrücken erfolgt in Abschnitt 4.

#### 3.1 Dynamische Messung der Mödlingbachbrücke Gleis 2 (Stahldeckbrücke)

##### 3.1.1 Brückenparameter Mödlingbachbrücke Gleis 2

Es handelt sich um eine längsorientierte einfeldrige Stahldeckbrücke mit Schotteroberbau und einer Stützweite von  $L_{STW} = 16\text{ m}$ . Der Schotteroberbau ist durchgehend über beide Tragwerke Gleis 1 und Gleis 2 ausgeführt. Wie man aus der Darstellung des Brückenquerschnittes in Bild 3 erkennt, besteht die Mödlingbachbrücke aus zwei identisch nebeneinander angeordnete Stahltragwerken, die durch eine Längsfuge voneinander getrennt sind. Von den zwei baugleichen Tragwerken auf Gleis 1 und Gleis 2 wurde nur das Tragwerk Gleis 2 messtechnisch untersucht.

Die Mödlingbachbrücke Gleis 2 ist als konventioneller Einfeldträger auf allseits beweglichen Elastomerkissen gelagert und die Längsfesthaltung erfolgt durch einen Schubdorn der auf einer Widerlagerseite nur eine vertikale Bewegung zulässt. Auf der gegenüberliegenden Widerlagerseite ist der Schubdorn längsbeweglich ausgeführt.

Die Mödlingbachbrücke Gleis 2 wurde für die dynamische Messung ausgewählt, da aufgrund der 2-gleisigen Ausführung mit durchgehender Längsfuge mit dem über beide Gleise durchgehenden Schotterbett eine gegenüber dem in

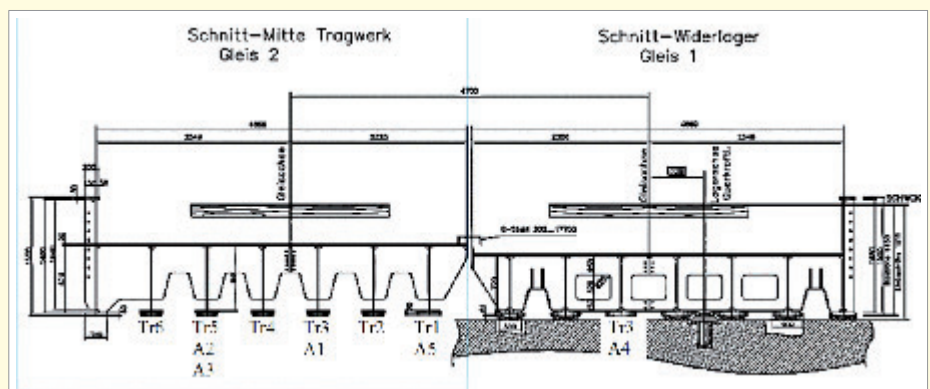


Bild 3. Brückenquerschnitt Mödlingbachbrücke, Träger i (Tri), Beschleunigungssensor i (Ai)



Bild 4. Krafterregte Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern bei der Mödlingbachbrücke Gleis 2

[2] angegebenen theoretischen Wert deutlich erhöhte Lehr'sche Dämpfung erwartet wird.

Im Vorfeld zu den durchgeführten dynamischen Messungen wurde die erste Eigenfrequenz des Tragwerks Gleis 2 mit der in [1] angegebenen analytischen Eigenfrequenzformel für den beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträger rechnerisch ermittelt. Für die Ermittlung der Biegesteifigkeit und des Trägheitsmoments wurden die Blechdicken den vorhandenen Bestandsplänen entnommen. Bei der Masse pro Längeneinheit wurden alle ständigen Lasten (Bleche, Steifen, Schotteroberbau  $2\text{ t/m}^3$ , Gleisrost  $0,5\text{ t/m}$ , Randbalken  $1,04\text{ t/m}$ ) berücksichtigt. Die Grundfrequenz des Tragwerks wurde mit  $f_{1,\text{Rechnung}} = 6,91\text{ Hz}$  vorab rechnerisch ermittelt. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß beträgt gemäß [2] für diesen Brückentyp (STAHL) und bei der gegebenen Spannweite  $\zeta_{\text{EN1991-2}} = 0,5 + 0,125 \cdot (20 - 16,0) = 1,0\%$ .

### 3.1.2 Angewendete Schwingungsanregungsmethoden Mödlingbachbrücke Gleis 2

Die folgenden Schwingungsanregungsmethoden wurden bei der Mödlingbachbrücke Gleis 2 angewendet:

- Krafterregte Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern
- Ambiente Schwingungsanregung
- Impulsanregung mit Sandsack
- Impulsanregung mit Impulshammer
- Anregung durch Zugüberfahrt

Die dynamischen Messungen wurden am 05. Mai 2016 durchgeführt. Das Wetter war bewölkt, mit leichtem Regen und die Lufttemperatur lag bei circa  $14,5$  Grad Celsius. Die Bauteiltemperatur des Stahltragwerks lag bei circa  $14$  Grad Celsius. Die Ergebnisse der durchgeführten dynamischen Messungen werden in den folgenden Abschnitten dargelegt und miteinander verglichen.

### 3.1.3 Krafterregte Schwingungsanregung Mödlingbachbrücke Gleis 2

Die krafterregten Schwingungsanregungen wurden mit vier parallel geschalteten Long Stroke Shakern, die mithilfe einer speziellen Befestigungskonstruktion zwischen den Längsträgern an das Tragwerk fixiert wurden (Bild 4), durchgeführt. Die gesamte Schwingungsanregung mit den Shakern und Messung mit den Beschleunigungssensoren konnte von unterhalb der Brücke durchgeführt werden und damit war keinerlei Einschränkung des laufenden Zugbetriebes notwendig.

Zur Messung der bei Anregung mit den Long Stroke Shakern resultierenden Schwingungsantworten wurden insgesamt fünf Beschleunigungssensoren an unterschiedlichen Stellen der Längsträger mittels Magneten montiert. Die Sensoren A1, A2 und A3 befinden sich unterhalb der Gleisachse an den Längsträgern Tr3 und Tr5, wobei der Sensor A3 am Tr5 außermittig bei circa  $0,35 \cdot L_{\text{STW}}$  montiert wurde. Der Sensor A5 wurde bei dem Längsträger Tr1 in unmittelbarer Nähe zur Längsfuge montiert. Der Sensor A4 wurde am Nachbartragwerk auf Gleis 1 am Längsträger Tr3 montiert. Die gewählte Nummerierung der Längsträger und die Montagepositionen der Sensoren sind in Bild 3 dargestellt.

Die krafterregte Schwingungsanregung mit den vier in Tragwerksmitte installierten Long Stroke Shakern erfolgte mit unterschiedlichen Erregerkräften und Erregerfrequenzen. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen der Mödlingbachbrücke Gleis 2 wurde im ersten Schritt ein automatisierter sinusförmiger Frequenzsweep im Bereich von  $3\text{ Hz}$  bis  $25\text{ Hz}$  durchgeführt (Anm.:  $f_{1,\text{Rechnung}} = 6,91\text{ Hz}$ ). Der Sweep wurde einmal von  $3\text{ Hz}$  bis  $25\text{ Hz}$  hinauf und unmittelbar danach von  $25\text{ Hz}$  auf  $3\text{ Hz}$  hinunter durchgeführt. Die maximale Beschleunigung der an den Shakern montierten Reaktionsmassen ( $m_R = 30,6\text{ kg}$  pro Shaker) wurde mit  $a_{\text{SH,max}} = 7,07\text{ m/s}^2$  gewählt. Über den Regelalgorithmus wurde diese Beschleunigung über den gesamten vorab eingestellten Frequenzbereich konstant gehalten. Die zugehörige Erregerkraftamplitude beträgt demnach für alle Shaker in Parallelbetrieb  $F_0 = 4 \cdot 30,6\text{ kg} \cdot 7,07\text{ m/s}^2 = 865,4\text{ N}$ .

Im Bild 5 ist der beim automatisierten Frequenzsweep mit den vier Long Stroke Shakern generierte zeitliche Verlauf der Schwingbeschleunigung dargestellt. Man erkennt, dass im Zeitbereich  $150$  Sekunden bis  $200$  Sekunden und  $350$  Sekunden bis  $400$  Sekunden jeweils zwei ausgeprägte Beschleunigungsspitzen sichtbar sind. Dies sind ersten zwei Biegeeigenfrequenzen der Mödlingbachbrücke Gleis 2. Da der automatische Frequenzsweep mit den Long Stroke Shakern wie oben angeführt einmal von  $3\text{ Hz}$  bis  $25\text{ Hz}$  hinauf und unmittelbar danach von  $25\text{ Hz}$  auf  $3\text{ Hz}$  hinunter durchgeführt wurde, ist der Zeitverlauf um die Sekunde  $275$  spiegelsymmetrisch.

Durch Transformation des mit dem Long Stroke Shakern generierten Zeitverlaufes der Schwingbeschleunigung in den Frequenzbereich treten die Eigenfrequenzen der Mödlingbachbrücke Gleis 2 als ausgeprägte Spitzen hervor (Bild 5). Die Eigenfrequenzen werden mit  $f_{1,\text{Shaker}} = 6,24\text{ Hz}$  und

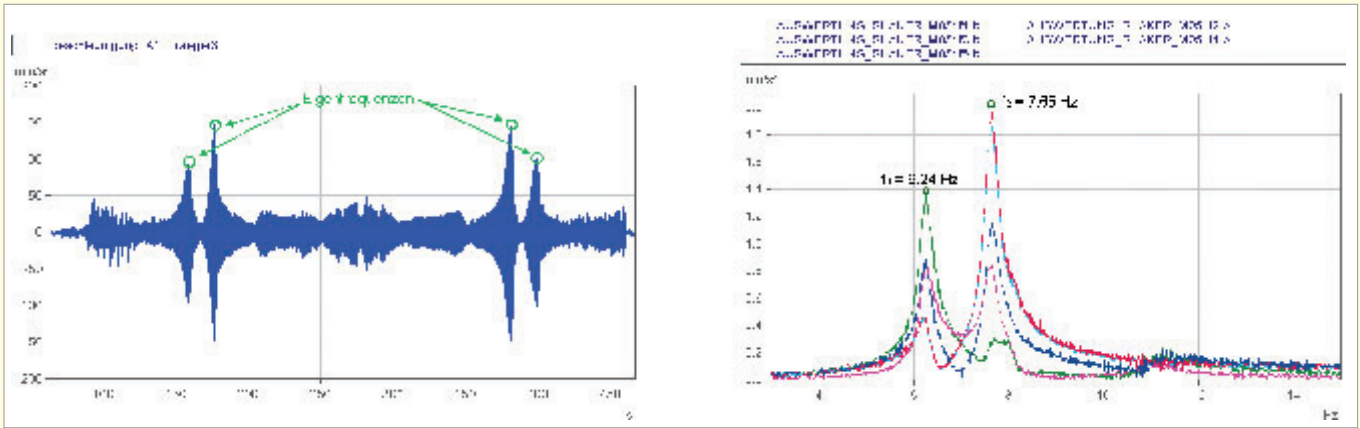


Bild 5. Mödlingbachbrücke Gleis 2 – linkes Bild: Zeitverlauf der Schwingbeschleunigung bei automatisiertem Frequenzsweep mit Long Stroke Shakern, rechtes Bild: zugehöriges Frequenzspektrum (FFT)

$f_{2,Shaker} = 7,65 \text{ Hz}$  identifiziert. Das mittels FFT aus dem Zeitverlauf berechnete Frequenzspektrum ist in Bild 5 für alle fünf installierten Beschleunigungssensoren A1 bis A5 dargestellt. Man kann aus diesem Spektrum die Schwingungsformen der Stahldeckbrücke in den unterschiedlichen Frequenzlagen ableiten. Der Sensor A5 zeigt bei der ersten Eigenfrequenz  $f_{1,Shaker} = 6,24 \text{ Hz}$  die höchste und bei der zweiten Eigenfrequenz  $f_{2,Shaker} = 7,65 \text{ Hz}$  die niedrigste Beschleunigungsamplitude. Dieses Schwingungsverhalten ist dadurch begründet, dass sich der Tragwerksteil, bei dem der Sensor A5 installiert ist, am Schwingungsbauch der tieferen Eigenfrequenz befindet, siehe dazu die in Bild 3 dargestellte Position der Sensoren. Der Sensor A5 wurde direkt bei der Längsfuge installiert – dieser Tragwerksteil weist aufgrund des fehlenden Hauptträgers eine geringere Steifigkeit auf. Es kann damit gefolgert werden, dass die beim Tragwerk Gleis 2 identifizierten Eigenfrequenzen einer Schwingungsform des „rechten“ (ohne Hauptträger bei Längsfuge) und „linken“ (mit Hauptträger) Tragwerksteiles zugehörig sind. Die Schwingungsreaktionen an den Sensoren A2 und A3 sind bei der ersten Eigenfrequenz  $f_1$  am kleinsten und bei der zweiten Eigenfrequenz  $f_2$  am größten. Die Sensoren A2 und A3 liegen dem „steiferen“ Tragwerksteil mit dem hohen Hauptträger am nächsten und zeigen daher bei der höheren Eigenfrequenz  $f_2$  die größte Schwingungsreaktion.

Die Eigenfrequenzen der Mödlingbachbrücke Gleis 2 wurden im zweiten Schritt als Alternative zum automatisierten Sweep durch Ausführen eines sogenannten „manuellen“ Frequenzsweeps ermittelt. Mit dem manuellen Frequenzsweep wird zudem die Lehr'sche Dämpfung durch Anwenden der Bandbreitenmethode [1] aus dem sich ergebenden diskreten Frequenzspektrum abgeleitet. In der ersten Stufe des manuellen Sweeps wurde die maximale Beschleunigung der Reaktionsmassen ( $m_R = 30,6 \text{ kg}$

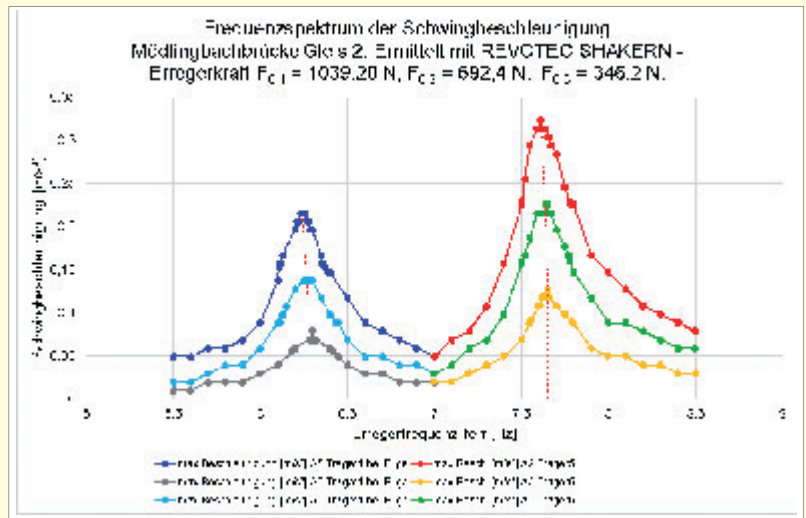


Bild 6. Mödlingbachbrücke Gleis 2 – mit manuellen Sweep generierte Frequenzspektren, Erregerkraftamplituden  $F_{0,1} = 1 039,2 \text{ N}$ ,  $F_{0,2} = 692,4 \text{ N}$  und  $F_{0,3} = 346,2 \text{ N}$

pro Shaker) der vier installierten Long Stroke Shaker mit  $a_{SH,1} = 8,49 \text{ m/s}^2$  gewählt. Über den Regelalgorithmus wurde diese Beschleunigung bei allen Erregerfrequenzen, die bei dem manuellen Sweep ausgewählt wurden, konstant gehalten. Die zugehörige maximale Erregerkraftamplitude beträgt demnach  $F_{0,1} = 4 \cdot 30,6 \text{ kg} \cdot 8,49 \text{ m/s}^2 = 1059,2 \text{ N}$ . Zur Untersuchung und Beurteilung der Amplitudenabhängigkeit der Lehr'schen Dämpfung wurden zwei weitere Erregerkraftniveaus, nämlich die maximalen Shaker Beschleunigungen  $a_{SH,2} = 5,66 \text{ m/s}^2$  und  $a_{SH,3} = 2,83 \text{ m/s}^2$ , mit den sich ergebenden Erregerkraftamplituden  $F_{0,2} = 4 \cdot 30,6 \text{ kg} \cdot 5,66 \text{ m/s}^2 = 692,4 \text{ N}$  und

Tabelle 1. Mödlingbachbrücke Gleis 2 – Ergebnisse bei Anwendung der kräfteerregten Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern

Erregerkraftamplitude [N]	Gemessene Eigenfrequenz [Hz]	Maximale Beschleunigungsamplitude [ $\text{m/s}^2$ ]	Lehr'sche Dämpfung aus Bandbreitenmethode $\zeta_{\text{gemessen}}$ [%]	Lehr'sche Dämpfung gemäß EN41991-2 $\zeta_{\text{EN1991-2}}$ [%]	Verhältnis $\zeta_{\text{gemessen}} / \zeta_{\text{EN1991-2}}$ [-]
$F_{0,1} = 1 039,2$	$f_1 = 6,26$	0,22	2,08	1,00	2,08
	$f_2 = 7,61$	0,32	1,77	1,00	1,77
$F_{0,2} = 692,4$	$f_1 = 6,28$	0,14	2,21	1,00	2,21
	$f_2 = 7,64$	0,23	1,77	1,00	1,77
$F_{0,3} = 346,2$	$f_1 = 6,30$	0,08	1,86	1,00	1,86
	$f_2 = 7,65$	0,13	1,54	1,00	1,54

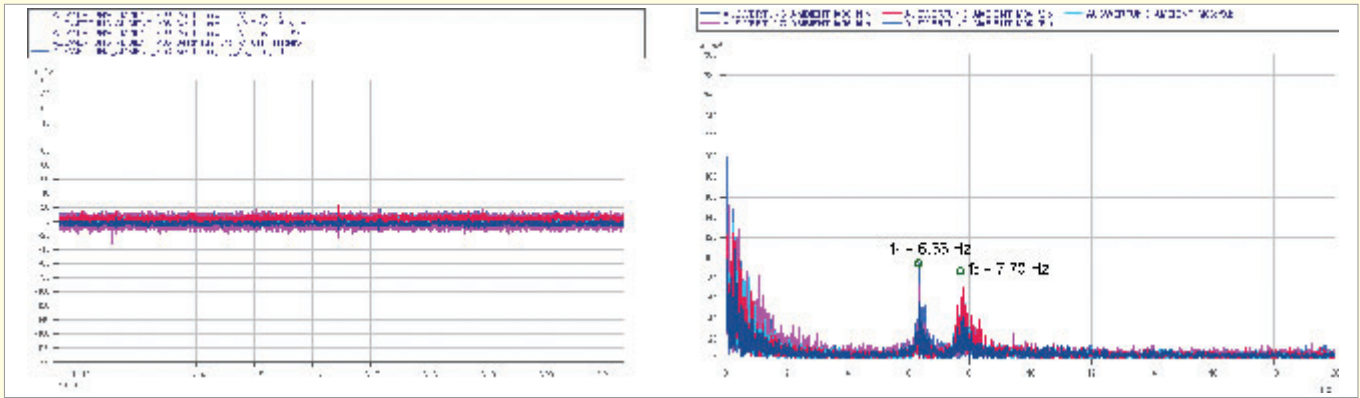


Bild 7. Mödlingbachbrücke Gleis 2, links: Zeitverlauf zufolge ambierter Schwingungsanregung, rechts: Aus dem ambienten Zeitverlauf berechnetes Frequenzspektrum

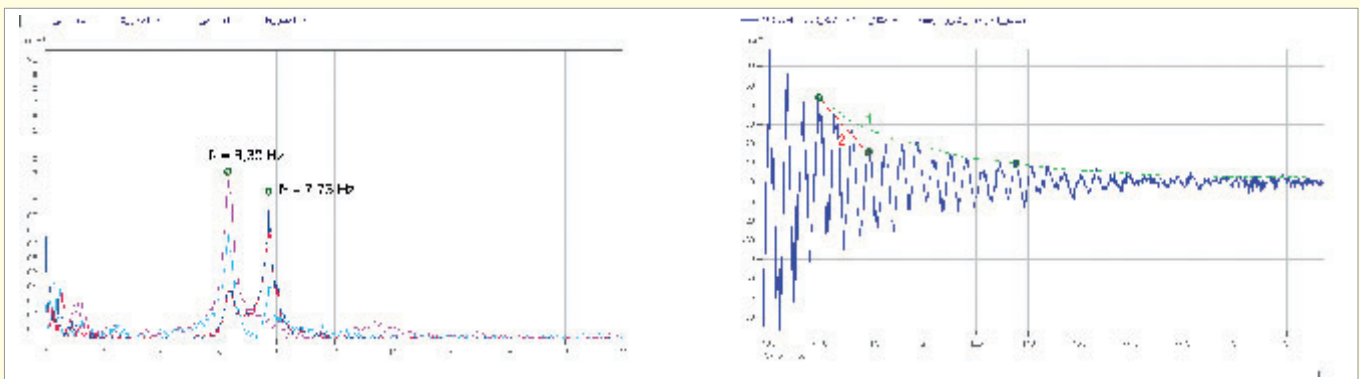


Bild 8. Mödlingbachbrücke Gleis 2, links: Aus Zeitverlauf nach Impulsanregung mit Sandsack berechnetes Frequenzspektrum, rechts: Zeitlicher Verlauf des Ausschwingvorganges

$F_{0,5} = 4 \cdot 30,6 \text{ kg} \cdot 2,83 \text{ m/s}^2 = 346,2 \text{ N}$  für die Anregung der Brücke gewählt.

Der Beschleunigungs-Amplitudenfrequenzgang wurde mit den vier Long Stroke Shakern in Parallelschaltung manuell ermittelt. Dabei wurde der interessierende Frequenzbereich von 5,5 Hz bis 8,5 Hz ausgewählt und nacheinander wurden die unterschiedlichen Erregerfrequenzen an den Shakern und dem Controller eingestellt. Bei jeder Erregerfrequenz wurde bis zum vollständigen Erreichen des eingeschwungenen Zustandes des Stahltragwerks abgewartet und der sich ergebende maximale Beschleunigungswert wurde abgelesen und in ein Excel-Tabellenblatt eingetragen. Die Ableseung des sich ergebenden maximalen Beschleunigungswertes erfolgte bei Sensor A5 für die erste Eigenfrequenz  $f_1$  und bei Sensor A2 für die zweite Eigenfrequenz  $f_2$ . Bei diesen beiden Sensoren haben sich die Maximalwerte der Beschleunigungsantwort in der jeweiligen Eigenfrequenz und zugehörigen Schwingungsform ergeben. Zur eindeutigen Identifikation der Eigenfrequenzspitze erfolgte die Anregung im Bereich der zwei identifizierten Eigenfrequenzen  $f_{1, \text{Shaker}}$  und  $f_{2, \text{Shaker}}$  mit dem kleinen Frequenzschritt von  $\Delta f = 0,01 \text{ Hz}$ . Im Bereich  $a_{\text{max}}/\sqrt{2}$  wurde zur Anwendung der Bandbreitenmethode ebenfalls eine Verdichtung der Stützstellen des Amplitudenfrequenzganges ausgeführt. Im Bild 6 ist der mit dem manuellen Sweep ermittelte Amplitudenfrequenzgang dargestellt.

Bild 6 verdeutlicht, dass mit zunehmender Erregerkraft die identifizierten Eigenfrequenzen geringfügig in ihrem Wert abnehmen (nach links geneigte rote gestrichelter Linie). Dieser Effekt wird bei realen Brückentragwerken immer

wieder beobachtet. Dies ist auf Nichtlinearitäten im Schotteroberbauverhalten zurückzuführen.

Die Anwendung der Bandbreitenmethode auf die in Bild 6 mit dem manuellen Frequenzsweep ermittelten Amplitudenfrequenzgänge liefert die in Tabelle 1 gelisteten Endergebnisse der krafterregeten Schwingungsanregung mit den Long Stroke Shakern.

Die mit den Long Stroke Shakern mit unterschiedlichen Erregerkraftamplituden  $F_{0,i}$  ermittelten Lehr'schen Dämpfungen betragen maximal  $\zeta_{\text{Shaker}} = 2,21 \%$ . Im Vergleich zum theoretischen Wert gemäß [2] liegen die gemessenen Lehr'schen Dämpfungen um bis zu 2,2-fach höher. Aus den messtechnisch bei den unterschiedlichen Anregungsamplituden  $F_{0,1}$ ,  $F_{0,2}$  und  $F_{0,5}$  ermittelten Werten für die Lehr'schen Dämpfungen erkennt man, dass im untersuchten Anregungsamplitudenbereich keine oder nur eine vernachlässigbar geringe Amplitudenabhängigkeit vorliegt. Die Unterschiede in den ermittelten Dämpfungswerten liegen in der Streuung begründet, die derartigen Messungen innewohnt.

### 3.1.4 Ambiente Schwingungsanregung Mödlingbachbrücke Gleis 2

Im Bild 7 (links) ist der zufolge ambierter Anregung der Mödlingbachbrücke Gleis 2 gemessene zeitliche Verlauf der Schwingbeschleunigung für die Sensor A1 bis A5 dargestellt. Man erkennt, dass sich die ambienten Schwingungen im Bereich bis circa  $0,004 \text{ m/s}^2$  bewegen. Das aus dem Zeitverlauf mittels FFT berechnete Frequenzspektrum ist im Bild 7 (rechts) dargestellt. Zwei Frequenzspitzen, die als Brückeneigenfrequenzen identifiziert werden, sind ersicht-

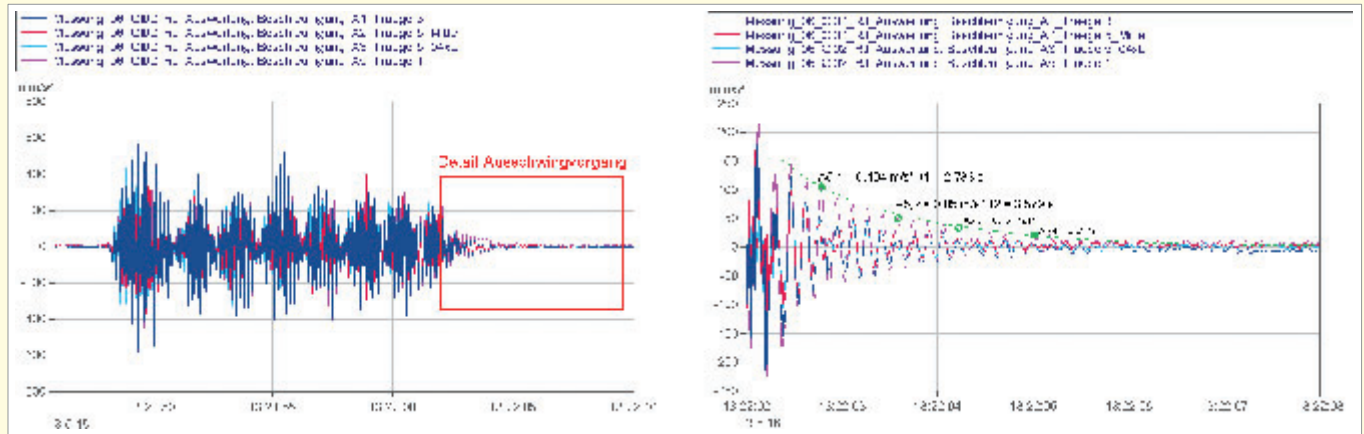


Bild 9. Mödlingbachbrücke Gleis 2, links: Zeitverlauf der vertikale Tragwerksbeschleunigung zufolge Railjet Überfahrt, rechts: Detail des zugehörigen Ausschwingvorgangs

lich. Die beiden Eigenfrequenzen werden mit  $f_{1,ambient} = 6,33 \text{ Hz}$  und  $f_{2,ambient} = 7,70 \text{ Hz}$  ermittelt.

Die mit der ambienten Schwingungsanregung ermittelten Eigenfrequenzen der Mödlingbachbrücke Gleis 2 stimmen mit den Werten, die durch Anwendung der krafterregten Schwingungsanregung mit den Long Stroke Shakern ermittelt wurden, sehr gut überein ( $f_{1,Shaker} = 6,24 \text{ Hz}$  und  $f_{2,Shaker} = 7,65 \text{ Hz}$ ).

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  konnte mit Anwendung der ambienten Schwingungsanregung aus dem Frequenzspektrum nicht plausibel ermittelt werden. Die Anwendung der Bandbreitenmethode auf das mit der ambienten Schwingungsanregung ermittelte Frequenzspektrum liefert unrealistische Lehr'sche Dämpfungen im Bereich von  $\zeta_{ambient} = 0,4 \%$  ( $\zeta_{Shaker} = 1,5 \%$  bis  $2,3 \%$ ).

### 3.1.5 Impulsanregung mit Sandsack Mödlingbachbrücke Gleis 2

Die Mödlingbachbrücke Gleis 2 wurde mit dem Sandsack insgesamt circa 16 mal hintereinander zu Schwingungen angeregt. Zwischen den einzelnen Anregungen wurde zumindest zwei Minuten bis zum vollständigen Ausschwingen des Tragwerks abgewartet. Das Gewicht des verwendeten Sandsackes beträgt 25 kg und der Sack war mit Schotter der Korngröße 10/16 gefüllt. Die Fallhöhe wurde mit circa 1,2 m bis 1,5 m gewählt. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen des Tragwerks wurden die Messsignale, die zum Stoßzeitpunkt selbst auftreten, bei der Anwendung der FFT nicht mitbetrachtet. Zur Erreichung einer möglichst genauen Frequenzauflösung wird ein entsprechend großer Zeitbereich nach dem Stoß betrachtet (40 Sekunden Fenster) und auf diesen wird die FFT angewendet. Bild 8 (links) zeigt das sich ergebende Frequenzspektrum.

Das Bild 8 (rechts) zeigt den zeitlichen Ausschwingvorgang (Sensor A5) der Mödlingbachbrücke Gleis 2 nach Impulsanregung mit dem Sandsack. Sensor A5 wurde ausgewählt, da sich an dieser Stelle der Ausschwingvorgang am besten ausgebildet hat. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass bei Sensor A5 lediglich die Lehr'sche Dämpfung für die Grundschwingungsform  $f_{1,I-Sandsack} = 6,30 \text{ Hz}$  des Tragwerks ausgewertet werden kann. Die höhere Schwingungsform  $f_{2,I-Sandsack} = 7,73 \text{ Hz}$  bildet sich am Ort des Sensors A5 nicht aus.

Anhand Bild 8 (rechts) erkennt man die Schwierigkeit bei der Verwendung des Ausschwingvorganges nach der Impulsanregung mit dem Sandsack zur Ermittlung der Lehr-

'schen Dämpfung: Der auswertende Ingenieur steht vor der Entscheidung, welchen Teil der Abklingkurve er für die Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung heranzieht. Wählt man zum Beispiel den aus  $N = 3$  Zyklen bestehenden kurzen Abschnitt (Linie Nr. 2 in Bild 8 (rechts)), so ergibt sich die Lehr'sche Dämpfung aus dem logarithmischen Dekrement zu  $\zeta_{I-Sandsack} = 4,9 \%$ . Demgegenüber ergibt sich bei Auswahl des langen Abschnittes (Linie Nr. 1 in Bild 8 (rechts)) mit  $N = 12$  Zyklen die Lehr'sche Dämpfung zu  $\zeta_{I-Sandsack} = 1,75 \%$ . Der auswertende Ingenieur nimmt somit Einfluss auf das Ergebnis für die Lehr'sche Dämpfung. Eine Regelung zur Auswahl der Zyklen (Anzahl und Amplitude) die für die Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung aus den Ausschwingvorgängen heranzuziehen sind existiert derzeit weder in Normen noch wird es in Publikationen oder in der vorhandenen Literatur zur Baudynamik angegeben. Empfohlen wird die Verwendung eines Mittelwertes des logarithmischen Dekrements über mehrere Zyklen ausgehend von einem Referenzpeak.

### 3.1.6 Impulsanregung mit Impulshammer Mödlingbachbrücke Gleis 2

Mit dem Impulshammer (Typ Dytran Model 5802A, MOD6251H-HARD ImpactTip) wurde das Tragwerk der Mödlingbachbrücke Gleis 2 circa zehn mal nacheinander zu Schwingungen angeregt. Zwischen den einzelnen Anregungen wurde zumindest zwei Minuten bis zum vollständigen Ausschwingen des Tragwerks abgewartet. Aus dem Zeitverlauf wurde mittels FFT das zugehörige Frequenzspektrum ermittelt und daraus wurden die Eigenfrequenzen des Tragwerks als Spitzen identifiziert. Der Stoßzeitpunkt selbst wurde dabei aus den Messsignalen entfernt und bei der Anwendung der FFT nicht mitbetrachtet. Zur Erreichung einer möglichst genauen Frequenzauflösung wurde ein entsprechender großer Zeitbereich nach dem Stoß betrachtet (100 Sekunden Fenster) und auf diesen wurde die FFT angewendet.

Die mit dem Impulshammer identifizierten Eigenfrequenzen  $f_{1,I-Hammer} = 6,34 \text{ Hz}$  und  $f_{2,I-Hammer} = 7,67$  stimmen sehr gut mit den Eigenfrequenzen die mit der ambienten Schwingungsanregung und mit der Sandsackmethode ermittelt wurden überein ( $f_{1,ambient} = 6,33 \text{ Hz}$  und  $f_{1,I-Sandsack} = 6,30$  bzw.  $f_{2,ambient} = 7,70 \text{ Hz}$  und  $f_{2,I-Sandsack} = 7,73 \text{ Hz}$ ). Ebenso stimmen die Eigenfrequenzen sehr gut mit den Ergebnissen aus der krafterregten Schwingungsanregung



**Tabelle 2. Mödlingbachbrücke Gleis 2 – Vergleich der mit den unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden erzielten Ergebnisse**

Angewendete Schwingungsanregungsmethode	Gemessene Eigenfrequenz [HZ]	Gemessene Lehr'sche Dämpfung [%]	Lehr'sche Dämpfung gemäß EN 1991-2 $\zeta_{EN\ 1991-2}$ [-]	Verhältnis $\zeta_{gemessenen} / \zeta_{EN\ 1991-2}$ [-]
Krafterregte Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern mit $F_{0,2}$	$f_1 = 6,28$ $f_2 = 7,64$	2,21 1,77	1,00 1,00	2,21 1,77
Ambiente Schwingungsmessung	$f_1 = 6,28$ $f_2 = 7,64$	0,40 (Streuung) -	1,00 1,00	0,440 -
Impulsanregung mit Sandsack	$f_1 = 6,30$ $f_2 = 7,65$	1,75 – 4,90 (Streuung) -	1,00 1,00	1,75 – 4,90 -
Impulsanregung mit Impulshammer	$f_1 = 6,28$ $f_2 = 7,64$	0,31 (Streuung) 0,39 (Streuung)	1,00 1,00	0,31 0,39
Anregung durch Zugüberfahrt	$f_1 = 6,28$ $f_2 = 7,64$	1,56 – 2,33 (Streuung) -	1,00 1,00	1,56 – 2,33 -

der für die Auswertung mit einbezogenen Schwingungszyklen beträgt  $N = 5$ . Die Lehr'sche Dämpfung ergibt sich aus dem logarithmischen Dekrement zu  $\zeta_{Zugüberfahrt} = 2,33\%$ . Zu Vergleichszwecken werden für die Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung die Schwingungsamplituden  $A_{5,3} = 0,104\text{ m/s}^2$  und  $A_{5,4} = 0,05\text{ m/s}^2$  des Sensors A5 herangezogen und mit Betrachtung dieses Bereiches des Ausschwingvorganges ergibt sich für die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta_{Zugüberfahrt} = 1,56\%$ . Man erkennt also, dass sich je nach Wahl des für

überein (vgl.  $f_{1,Shaker} = 6,24\text{ Hz}$  und  $f_{2,Shaker} = 7,65\text{ Hz}$ ). Die Abweichungen in den ermittelten Eigenfrequenzen liegen in einem Streubereich, der für diese Art der Versuche charakteristisch ist.

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  konnte mit Anwendung der Impulsanregung mit Impulshammer nicht plausibel ermittelt werden. Nach Ausführung der Impulsanregung war kein zeitliches Ausschwingen des Tragwerks erkennbar (Energieeintrag zu gering). Die Anwendung der Bandbreitenmethode auf das mit Anwendung der Impulsanregung mit Impulshammer ermittelte Frequenzspektrum liefert unrealistisch geringe Lehr'sche Dämpfungen im Bereich von  $\zeta_{1,I-Hammer} = 0,31$  und  $\zeta_{1,I-Hammer} = 0,39\%$  (Größe ähnlich wie bei ambienter Schwingungsanregung).

### 3.1.7 Anregung durch Zugüberfahrt Mödlingbachbrücke Gleis 2

Bei der Mödlingbachbrücke Gleis 2 wurden am Messtag insgesamt circa 27 Zugüberfahrten, die direkt über das Tragwerk Gleis 2 erfolgten, messtechnisch aufgezeichnet. Die folgenden vier unterschiedlichen Zugtypen wurden gemessen: Railjets, Eurocity (EC) Züge, Regionalzüge und Güterzüge.

Im Bild 9 (links) ist der zeitliche Verlauf der bei den Beschleunigungssensoren A1, A2, A3 und A5 gemessenen Schwingbeschleunigung bei Überfahrt des Railjets auf Gleis 2 dargestellt. Die maximalen Schwingbeschleunigungen betragen circa  $0,60\text{ m/s}^2$ . Eine Detailbetrachtung des zeitlichen Ausschwingens der Brücke nach Zugüberfahrt ist in Bild 9 (rechts) dargestellt.

Die Transformation des zeitlichen Ausschwingvorganges der Schwingbeschleunigung liefert die erste und zweite Eigenfrequenz des Tragwerks mit  $f_{1,Zugüberfahrt} = 6,28\text{ Hz}$  und  $f_{2,Zugüberfahrt} = 7,61\text{ Hz}$ . Die durch Analyse des zeitlichen Ausschwingvorganges nach Zugüberfahrt ermittelten Größen der ersten und zweiten Eigenfrequenzen stimmen wiederum sehr gut mit den anderen angewandten Methoden zur Eigenfrequenzermittlung überein.

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  wird aus dem zeitlichen Verlauf des Ausschwingvorganges nach Zugüberfahrt unter Betrachtung der Schwingungsamplituden  $A_{5,1} = 0,104\text{ m/s}^2$  und  $A_{5,2} = 0,05\text{ m/s}^2$  des Sensors A5 ermittelt. Die Anzahl

die Auswertung betrachteten Zeitabschnittes, signifikant unterschiedliche Werte für die Lehr'sche Dämpfung ergeben. Der auswertende Ingenieur nimmt somit wiederum Einfluss auf das Ergebnis für die Lehr'sche Dämpfung. Eine Regelung zur Auswahl des Zeitbereiches, der Mittelwertbildung und/oder der optimalen Wahl der Anzahl der Zyklen, die für die Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung aus dem Ausschwingvorgang heranzuziehen sind, existiert derzeit nicht und damit kommt es bei den ermittelten Dämpfungswerten zu hohen Streuungen oder sie sind bei Folgemessungen nicht reproduzierbar.

### 3.1.8 Mödlingbachbrücke Gleis 2 (Stahldeckbrücke) – Ergebnisvergleich

In Tabelle 2 sind die mit Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden ermittelten dynamischen Kennwerte für die Mödlingbachbrücke Gleis 2 gelistet. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass zwar die Eigenfrequenzen mit allen angewendeten Methoden ausreichend genau ermittelt werden können. Die Lehr'sche Dämpfung kann jedoch nur mit Anwendung der krafterregten Schwingungsanregungsmethode ohne hohe Streuungen, sowie zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden.

## 3.2 Dynamische Messung der Eisenbahnbrücke G5 – GU 06.231 (Rahmentragwerk)

### 3.2.1 Brückenparameter Eisenbahnbrücke G5

Die Eisenbahnbrücke mit der Bezeichnung G5 – GU 06.231 befindet sich auf der Güterzugumfahrung (GZU) in Niederösterreich bei St. Pölten. Es handelt sich um ein zweigleisiges, flach fundiertes Rahmentragwerk mit Schotteroberbau. Die Stützweite beträgt  $L_{STW} = 16,10\text{ m}$  und die Konstruktionshöhe des Rahmenriegels in Feldmitte  $d = 0,80\text{ m}$ . Die Schlankheit beträgt demnach  $L_{STW} / d \approx 20$ . Die Tragwerksplatte weist keine Längsfuge auf (Bild 10). Der Kreuzungswinkel beträgt 88 Grad.

Diese Rahmenbrücke wurde für die Messung ausgewählt, da bei realen Rahmenbrücken generell gegenüber den in [2] angegebenen theoretischen Werten deutlich erhöhte

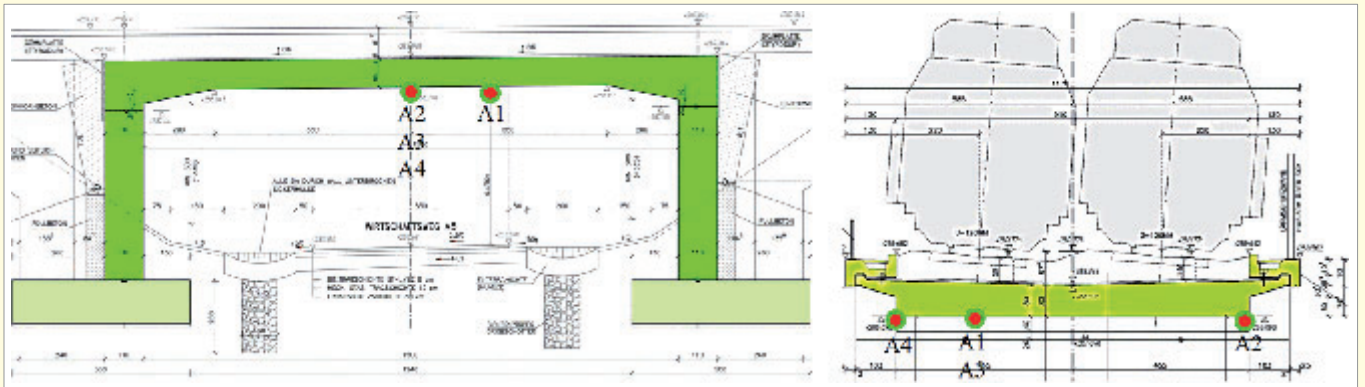


Bild 10. Längs- und Querschnitt der Eisenbahnbrücke G5, Beschleunigungssensor i (Ai)

Lehr'sche Dämpfungswerte erwartet werden. Bei Rahmentragwerken ergeben sich außerdem bei Anwendung der üblichen Schwingungsanregungsmethoden (ambient, Zugüberfahrt und/oder Impulsanregung) häufig Probleme in der Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung. Daher soll untersucht werden, ob die Anwendung der kraftherregten Schwingungsanregungsmethoden (mit Long Stroke Shakern und mit mechanischen Unwuchterregern) zu zuverlässigen und reproduzierbaren Ergebnissen für die dynamischen Kennwerte führt.

Im Vorfeld zur den dynamischen Messungen wurden die ersten zwei Eigenfrequenzen des Rahmentragwerks an einem räumlichen FE-Modell unter Berücksichtigung aller ständigen Lasten, aber ohne Berücksichtigung der seitlichen Bettung der Rahmenstiele, rechnerisch ermittelt. Die Grundfrequenz (Biegeschwingung) des Tragwerks und die 1. Oberschwingung (Torsionsschwingung) haben sich rechnerisch zu  $f_{1, \text{Rechnung}} = 8,51 \text{ Hz}$  und  $f_{2, \text{Rechnung}} = 12,51 \text{ Hz}$  ergeben. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß beträgt gemäß [2] für diesen Brückentyp (BETON) und bei der gegebenen Spannweite  $\zeta_{\text{EN1991-2}} = 1,5 + 0,07 \cdot (20 - 16,10) = 1,77 \%$ .

### 3.2.1 Angewendete Schwingungsanregungsmethoden Eisenbahnbrücke G5

Die folgenden Schwingungsanregungsmethoden wurden bei der Eisenbahnbrücke G5 angewendet:

- Kraftherregte Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern

- Kraftherregte Schwingungsanregung mit mechanischen Unwuchterregern
- Ambiente Schwingungsanregung
- Impulsanregung mit Sandsack
- Impulsanregung mit Impulshammer

Die Anregung der Brücke durch die Zugüberfahrt konnte nicht ausgeführt werden, da zum Zeitpunkt der Messung noch kein Zugverkehr über die Brücke geführt wurde. Die dynamischen Messungen wurden am 05. und 06. September 2016 durchgeführt. Das Wetter war an beiden Messstagen bewölkt, mit leichtem Regen, die Lufttemperatur lag bei circa 16 Grad Celsius. Die Ergebnisse der durchgeführten dynamischen Messungen werden in den folgenden Abschnitten dargelegt und miteinander verglichen.

#### 3.2.1 Kraftherregte Schwingungsanregung Eisenbahnbrücke G5

Die kraftherregten Schwingungsanregungen wurden am 05. September 2016 mit zwei parallel geschalteten Long Stroke Shakern und am 06. September 2016 mit einem mechanischen Unwuchterregern durchgeführt. Im Bild 11 (links) sind die in der Gleisachse in Brückenmitte auf den Schwellen aufgestellten Long Stroke Shaker und Bild 11 (rechts) der ebenfalls in Gleisachse in Brückenmitte positionierte mechanische Unwuchterregern dargestellt. Da der Zugverkehr über den gesamten Messzeitraum gesperrt war, konnte die Aufstellung der Schwingereger in Gleisachse ausgeführt werden.



Bild 11. Eisenbahnbrücke G5 – linkes Bild: zwei Long Stroke Shaker in Gleisachse in Brückenmitte, rechtes Bild: mechanischer Unwuchterregern mit Zusatzmassen (Betonplatten)

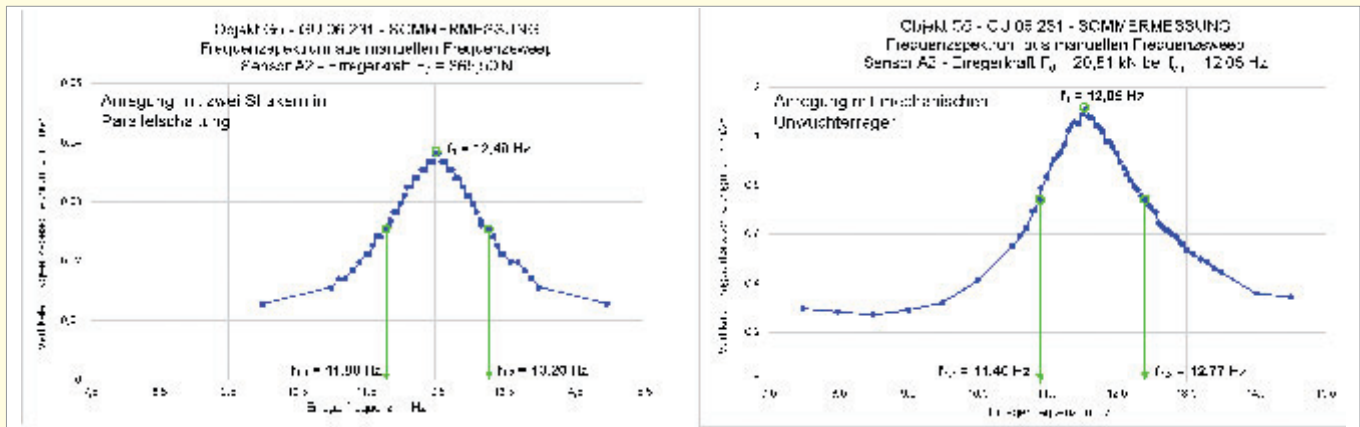


Bild 12. Eisenbahnbrücke G5, aus manuellen Sweep generierte Frequenzspektren – linkes Bild: Anregung mit zwei Long Stroke Shakern, rechtes Bild: Anregung mit mechanischen Unwuchterreger

Zur Messung der bei Anregung mit den Long Stroke Shakern und dem mechanischen Unwuchterreger sich ergebenden Schwingungsantworten wurden insgesamt vier Beschleunigungssensoren an der Tragwerksunterseite mittels Magneten auf, an die Betonoberfläche angeklebte Stahlblättchen, montiert. Die Sensoren A2, A3 und A4 befinden sich dabei in Tragwerksmitte, der Sensor A1 an der Position  $0,35 \cdot L_{STW}$  (Bild 10).

Im Bild 12 (links) ist für das mit den zwei Shakern in Parallelbetrieb messtechnisch untersuchte Rahmentragwerk G5 das Frequenzspektrum aus dem manuell durchgeführten Sweep im relevanten Frequenzbereich von 10 Hz bis 15 Hz dargestellt. Die Erregerkraftamplitude wurde hier mit  $F_0 = 870 \text{ N}$  gewählt. Zur Identifikation der ersten Eigenfrequenz  $f_1$  wurden die beiden Shaker im Synchronmodus betrieben, das heißt die Erregerkräfte der beiden Shaker wirken phasengleich auf das Brückentragwerk ein. Die erste Eigenfrequenz des Rahmentragwerks wird als Spitze im Frequenzspektrum mit  $f_{1,Shaker} = 12,48 \text{ Hz}$  identifiziert. Die Anwendung der Bandbreitenmethode liefert eine Lehr'sche Dämpfung von  $\zeta_{1,Shaker} = 5,60 \%$ .

Im Bild 12 (rechts) ist das mit dem mechanischen Unwuchterreger aus dem manuell durchgeführten Sweep im relevanten Frequenzbereich von 8 Hz bis 15 Hz generierte Frequenzspektrum dargestellt. Die Erregerkraftamplitude ist bei dem mechanischen Unwuchterreger frequenzabhängig  $F_0 = m \cdot e \cdot \omega_2^2$ . Für das untersuchte Brückenobjekt wurde das Produkt aus Unwuchtmasse und Exzentrizität mit  $m \cdot e = 3,63 \text{ kgm}$  gewählt. Daraus ergibt sich bei der Erre-

gerfrequenz  $f_{err} = 12,05 \text{ Hz}$  die Erregerkraftamplitude zu  $F_0 = 20,8 \text{ kN}$ . Aufgrund der im Vergleich zu den Long Stroke Shakern höheren Eigenmasse des mechanischen Unwuchterregers (inkl. Zusatzmasse beträgt die Eigenmasse ca. sechs Tonnen) kommt es zu einer geringfügigen Verschiebung der ersten Eigenfrequenz  $f_1$  des Rahmentragwerks auf den Wert  $f_{1,Unwuchterreger} = 12,05 \text{ Hz}$ . Diese Verschiebung ist aufgrund des Masseneffektes aber eindeutig begründbar. Die Anwendung der Bandbreitenmethode liefert mit  $\zeta_{1,Unwuchterreger} = 5,67 \%$  einen im Vergleich zu den Shakermessungen nahezu identischen Wert für die Lehr'sche Dämpfung.

Die mit der krafterregeten Schwingungsanregungsmethode ermittelte Lehr'sche Dämpfung liegt mit  $\zeta = 5,67 \%$  im Fall des Unwuchterregers um den Faktor 3,2 höher als der in [2] angegebene theoretische Wert. Man erkennt, dass im Fall des Rahmentragwerks G5 die Größe der Lehr'schen Dämpfung weitgehend unabhängig von der Erregerkraftamplitude sowie der maximalen Schwingungsamplitude ist. Die mit den Long Stroke Shakern (geringe Anregungskraft) und mit dem mechanischen Unwuchterreger (hohe Anregungskraft) ermittelte Lehr'sche Dämpfung ist nahezu gleich groß.

### 3.2.4 Ambiente Schwingungsanregung Eisenbahnbrücke G5

Im Bild 13 (links) ist das durch Anwendung der ambienten Schwingungsanregung ermittelte Frequenzspektrum dargestellt. Das Spektrum zeigt sehr viele Spitzen und die erste Eigenfrequenz des Rahmentragwerks bildet sich nicht ein-

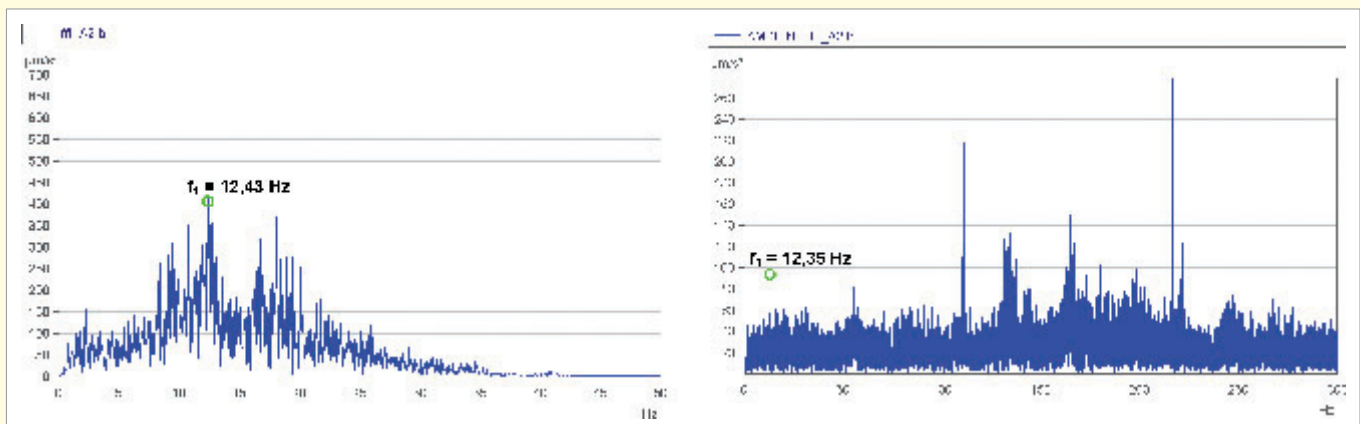


Bild 13. Eisenbahnbrücke G5, links: Aus dem ambienten Zeitverlauf berechnetes Frequenzspektrum, rechts: Aus der Impulsanregung mit Sandsack berechnetes Frequenzspektrum

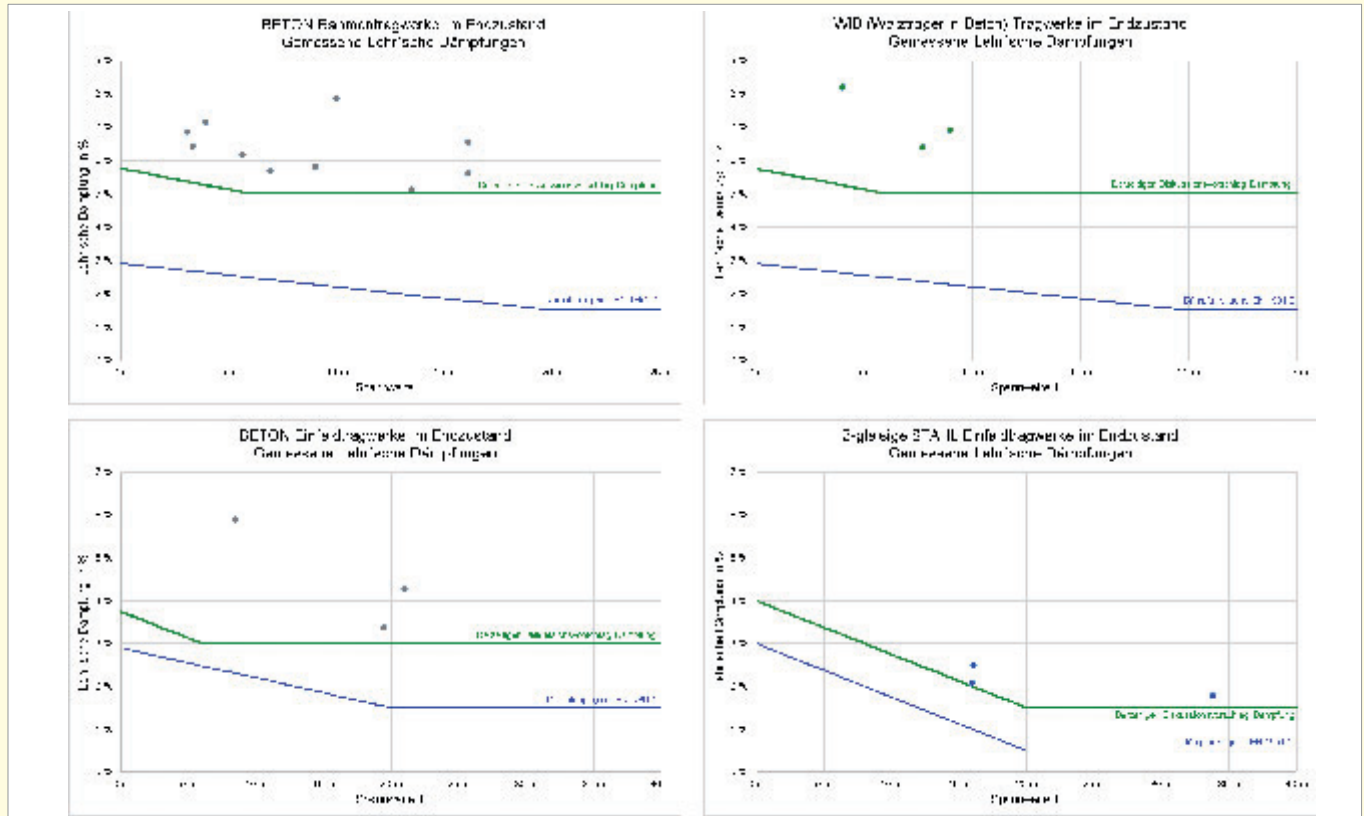


Bild 14. Mit krafterreger Schwingungsanregungsmethode messtechnisch ermittelte Werte für die Lehr'sche Dämpfungen bei 20 Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs

deutig aus. Da die erste Eigenfrequenz mit den krafteregeren Schwingungsanregungsmethoden bereits sehr genau ermittelt wurde, lässt sich im Spektrum die Spitze bei  $f_{1,ambient} = 12,35\text{Hz}$  als erste Eigenfrequenz identifizieren. Dieser Wert stimmt mit der Eigenfrequenz, die durch Anwendung der krafteregeren Schwingungsanregung ermittelt wurden, sehr gut überein ( $f_{1,Shaker} = 12,48\text{Hz}$  und  $f_{1,Unwuchterreger} = 12,05\text{Hz}$ ).

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  konnte mit Anwendung der ambienten Schwingungsanregung nicht plausibel ermittelt werden und daher wird der Wert hier nicht dargestellt.

### 3.2.5 Impulsanregung mit Sandsack Eisenbahnbrücke G5

Die Eisenbahnbrücke G5 wurde mit dem Sandsack insgesamt circa zehn mal hintereinander zu Schwingungen angeregt. Das Gewicht des verwendeten Sandsackes beträgt 25 kg und die Fallhöhe wurde mit circa 1,5 m gewählt. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen wurden die Messsignale, die zum Stoßzeitpunkt selbst auftreten, bei der Anwendung der FFT nicht mitbetrachtet. Im Bild 15 (rechts) ist für die Eisenbahnbrücke G5, die mit Impulsanregung mit Sandsack ermittelte erste Eigenfrequenz dargestellt. Die erste Eigenfrequenz wird als Spitze im Spektrum mit  $f_{1,1-Sandsack} = 12,45\text{Hz}$  identifiziert. Dieser Wert stimmt mit den Werten die mit den krafteregeren Methoden und mit der ambienten Schwingungsanregung ermittelt wurden sehr gut überein.

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  konnte bei der Eisenbahnbrücke G5 mit Anwendung der Impulsanregung mit Sandsack nicht ermittelt werden. Der Energieeintrag war derartig gering, dass im Zeitverlauf der Schwingbeschleunigung keine Abklingfunktion sowie kein zeitliches Ausschwingen nach der Impulsanregung sichtbar war.

### 3.2.6 Impulsanregung mit Impulshammer Eisenbahnbrücke G5

Mit dem Impulshammer wurde die Eisenbahnbrücke G5 ebenfalls circa zehn mal nacheinander zu Schwingungen angeregt. Aus dem Zeitverlauf wurde mittels FFT das zugehörige Frequenzspektrum ermittelt und daraus wurde die erste Eigenfrequenz mit  $f_{1,1-Hammer} = 12,68\text{Hz}$  identifiziert. Dieser Wert stimmt mit den Werten der anderen angewendeten Methoden wurden sehr gut überein.

Die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  konnte mit Anwendung der Impulsanregung mit Impulshammer ebenfalls nicht ermittelt werden. Nach Ausführung der Impulsanregung war kein zeitliches Ausschwingen des Tragwerks erkennbar (Energieeintrag zu gering).

### 3.2.7 Eisenbahnbrücke G5 (Rahmentragwerk) – Ergebnisvergleich

In der **Tabelle 3** sind die mit Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden ermittelten dynamischen Kennwerte für die Eisenbahnbrücke G5 gelistet. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Eigenfrequenzen mit allen angewendeten Methoden ausreichend genau ermittelt werden können. Die Lehr'sche Dämpfung kann jedoch nur mit Anwendung der krafteregeren Schwingungsanregungsmethode ohne hohe Streuungen sowie zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden.

## 4 Darstellung der Ergebnisse für die Lehr'sche Dämpfung aller 20 gemessenen Eisenbahnbrücken

In den Jahren 2016 und 2017 wurden unter Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden, bei insgesamt 20 einfeldrigen Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs, dynamische in-situ-Messungen zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte (Eigenfrequenz und Lehr-

**Tabelle 3. Eisenbahnbrücke G5 (Rahmentragwerk) – Vergleich der mit den unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden erzielten Ergebnisse**

Angewendete Schwingungsanregungsmethode	Gemessene Eigenfrequenz [HZ]	Gemessene Lehr'sche Dämpfung [%]	Lehr'sche Dämpfung gemäß EN 1991-2 $\zeta_{EN\ 1991-2}$ [-]	Verhältnis $\frac{\zeta_{gemessenen}}{\zeta_{EN\ 1991-2}}$ [-]
Krafterregte Schwingungsanregung mit Long Stroke Shakern mit $F_0 = 0,87\text{ kN}$	$f_1 = 12,48$	5,60	1,77	3,16
Krafterregte Schwingungsanregung mit Unwuchterreger mit $F_0 = 20,80\text{ kN}$	$f_1 = 12,05$	5,67	1,77	3,20
Ambiente Schwingungsmessung	$f_1 = 12,35$	-	1,77	-
Impulsanregung mit Sandsack	$f_1 = 12,43$	-	1,77	-
Impulsanregung mit Impulshammer	$f_1 = 12,68$	-	1,77	-
Anregung durch Zugüberfahrt	Ein Zugbetrieb war auf der Strecke noch nicht vorhanden und daher konnte diese Anregungsmethode nicht ausgeführt werden.			

mentragwerke), aufgrund des nicht vorhandenen Ausschwingvorganges nach Impulsanregung und/oder nach Zugüberfahrt gar keine Möglichkeit zur Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung möglich ist. Demgegenüber konnte bei Anwendung der krafterregten Schwingungsanregungsmethoden bei allen untersuchten Brücken die Lehr'sche Dämpfung zuverlässig, mit geringer Streuung und reprodu-

zierbar ermittelt werden. Die mit Anwendung der krafterregten Schwingungsanregungsmethode erzielten Ergebnisse werden für die Lehr'sche Dämpfung  $\zeta$  zusammenfassend für alle 20 gemessenen Brücken dargestellt. Mit der krafterregten Schwingungsanregungsmethode wurden die Lehr'schen Dämpfungen bei allen untersuchten Brücken mit sehr geringen Streuungen, zuverlässig und am besten reproduzierbar ermittelt. Für jede gemessene Brücke wurde die Lehr'sche Dämpfung in Abhängigkeit vom Brückentyp („Brückenfamilie“) und von der zugehörigen Brückenspannweite  $L$  in ein Diagramm eingetragen (Bild 14).

## 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung von unterschiedlichen Schwingungsanregungsmethoden zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte (Eigenfrequenzen und Lehr'sche Dämpfungen) von Eisenbahnbrücken anhand von zwei ausgewählten Brücken (eine Stahldeckbrücke und ein Rahmentragwerk) im Detail vorgestellt und die mit den unterschiedlichen Methoden erzielten Ergebnisse werden untereinander verglichen. Die krafterregte Schwingungsanregungsmethode wird aufgrund ihrer hohen Bedeutung und ausgezeichneten Eignung für die Ermittlung der dynamischen Kennwerte detaillierter beschrieben.

Es stellt sich heraus, dass die krafterregte Schwingungsanregungsmethode sowohl für die Ermittlung der Eigenfrequenzen von Eisenbahnbrücken aber insbesondere für die Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung aus dem mit einem manuellen Sweep generierten Frequenzspektrum und Anwendung der Bandbreitenmethode auf dieses Spektrum, im Vergleich mit den anderen üblichen Schwingungsanregungsmethoden zuverlässige, sehr gering streuende und eindeutig reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die mit üblichen Methoden, wie der ambienten Schwingungsanregung, der Impulsanregung mit Sandsack oder Impulshammer sowie der Anregung durch Zugüberfahrt, ermittelten Werte für die Lehr'sche Dämpfung können sehr deutlich streuen und sie sind in den meisten Fällen nicht reproduzierbar. Die an insgesamt 20 Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs durchgeführten dynamischen Messungen zeigen weiterhin, dass bei Anwendung der üblichen Schwingungsanregungsmethoden bei gewissen Brückentypen (z. B. Rah-

mentragwerke), aufgrund des nicht vorhandenen Ausschwingvorganges nach Impulsanregung und/oder nach Zugüberfahrt gar keine Möglichkeit zur Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung möglich ist. Demgegenüber konnte bei Anwendung der krafterregten Schwingungsanregungsmethoden bei allen untersuchten Brücken die Lehr'sche Dämpfung zuverlässig, mit geringer Streuung und reprodu-

zierbar ermittelt werden. Die Eigenfrequenzen von Eisenbahnbrücken konnten aber bei nahezu allen untersuchten Brücken, mit Anwendung der üblichen Schwingungsanregungsmethoden ausreichend genau ermittelt werden. In manchen Fällen haben sich Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Eigenfrequenz aus dem Frequenzspektrum ergeben. Die Spitzen im Spektrum traten zum Teil nicht eindeutig heraus. Demgegenüber konnte bei Anwendung der krafterregten Schwingungsanregungsmethoden bei allen untersuchten Brücken sowohl die Eigenfrequenz eindeutig, zuverlässig und reproduzierbar ermittelt werden

Die Ergebnisse der bei insgesamt 20 Eisenbahnbrücken unterschiedlichen Typs durchgeführten dynamischen Messungen zeigen insbesondere bei Rahmentragwerken (aber auch bei den anderen Brückentypen) eine gegenüber den theoretischen Normwerten um bis zu dem Faktor 3,2 erhöhte Lehr'sche Dämpfungen. In Österreich wird aufgrund der Erkenntnisse aus den Messungen derzeit ein Vorschlag zur Erhöhung der Lehr'schen Dämpfungswerte für bestimmte Brückentypen gegenüber den Normwerten erarbeitet. Zusammenfassend wird aufgrund der vorliegenden Messergebnisse festgestellt, dass die krafterregten Schwingungsanregungsmethoden zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Eisenbahnbrücken ausgezeichnet geeignet sind und zu zuverlässigen, sehr gering streuenden und reproduzierbaren Ergebnissen führen.

## Literatur

- [1] Petersen, Ch.: Dynamik der Baukonstruktionen. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden, 1996.
- [2] ÖNORM EN 1991-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Deutsche Fassung, Ausgabe März 2012.
- [3] Reiterer, M. et al.: Dynamische Beurteilung der zuginduzierten Schwingungen von Eisenbahnbrücken. Brückentagung Kahlenberg, 18–19 Mai 2017, Paper und Präsentation online: [http://brueckentagung.at/#\(Rückblicke\)](http://brueckentagung.at/#(Rückblicke)).
- [4] Reiterer, M. et al.: Forced vibration monitoring by use of multiple long stroke shakers. In: Proceedings of 11<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2017), September 12–14, 2017, Stanford University, CA, Paper in press.

# Zur Fehlerfortpflanzung in der probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse

M. Raschke

S 14

**Zusammenfassung** Die Quantifizierung der Schätzunsicherheit einer probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse mittels des Logic-Tree-Ansatzes muss aus statistischer Sicht verworfen werden. Denn zum einen wird in der Logic-Tree Analyse die Fehlerfortpflanzung nicht konsequent berücksichtigt, zum anderen können die verwendeten Expertenmeinungen nicht wissenschaftlich validiert oder falsifiziert werden. Der Logic-Tree-Ansatz kann nur als eine Art Sensitivitätsstudie und/oder Model-Averaging, verstanden werden, wobei der Mehrwert des Model-Averaging statistisch zweifelhaft ist. Die Darstellung der Ergebnisse einer Logic-Tree Analyse als Quantile, Vertrauens- oder Fehlerintervalle ist irreführend. Im Gegensatz zum Logic-Tree kann die hier vorgestellte Variante der Fehlerfortpflanzung nach der Delta-Methode wissenschaftlich überprüft werden. In dem Beispiel funktioniert die Verknüpfung von Delta-Methode und Monte-Carlo-Simulation gut. Die geschätzten Standardfehler der Gefährdungskurve stimmen mit den wirklichen Standardfehlern überein. Auch können Vertrauensbereiche mit der Annahme der Normalverteilung approximiert werden. Nur die Berücksichtigung der relevanten Schätzfehler aller Teilmodelle einer Gefährdungsanalyse ermöglicht eine realistische und prüfbare Quantifizierung der Unsicherheiten der Gefährdungsschätzung. Unabhängig davon können unbekannte, signifikante systematische Fehler (Bias) und Überparametrisierung (Overfit) von Teilmodellen ein Problem sein. Letzteres treibt den kumulierten Schätzfehler in die Höhe.

## 1 Einleitung

Bauwerke und technische Anlagen werden unter anderem für die Einwirkungen von Naturgefahren bemessen. Windlasten sind ein klassisches Beispiel. Aber auch sehr seltene, außergewöhnliche Lasten können bei einer Bemessung eine Rolle spielen, wie die Erdbebenlast. Die für die Bemessung notwendigen Lastannahmen werden in Erdbebennormen wie dem EC-8 [1] und DIN 4149 [2] bereitgestellt. Diese beruhen auf den Ergebnissen probabilistischer Erdbebengefährdungsanalysen [3] oder sind mit diesen mehr oder weniger äquivalent [4]. In einer probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse wird die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer definierten Einwirkung oder lokalen Erdbebenerschütterungsintensität für einen sowie Zeitraum ermittelt [5], [6]. Das Ergebnis einer Gefährdungsana-

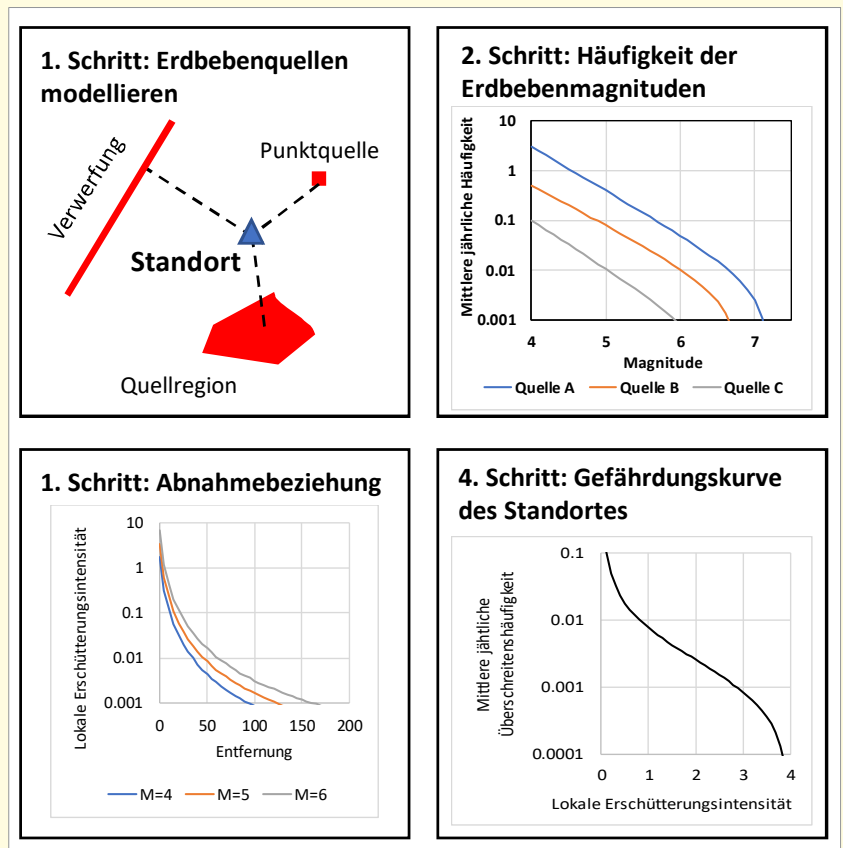


Bild 1. Grundlegende Schritte einer Erdbebengefährdungsanalyse (Schema nach [7]).

lyse für definierte Standorte sind Gefährdungskurven bzw. bijektive Gefährdungsfunktionen für die zufällige Erschütterungsintensität  $Y$  mit definierter Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P(Y > x)$  und/oder mittleren Überschreitungshäufigkeit, dem Reziproke der Wiederkehrperiode,  $\lambda(x)$  mit  $Y > x$  für einen definierten Zeitraum. Allerdings wird in der Praxis die Überschreitungshäufigkeit sowie Wahrscheinlichkeit definiert und gesucht ist die entsprechende Erschütterungsintensität. Entsprechend wird die inverse Gefährdungsfunktion  $\lambda^{-1}(x)$  für die Erstellung von Gefährdungskarten [5] verwendet. Wiederkehrperioden von 100 Jahren bis 1 000 Jahren sind für diese typisch.

Eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse beruht auf der Kombination von verschiedenen wissenschaftlichen Modellen [3], [5], [6], wie sie in **Bild 1** schematisch dargestellt sind. Diese zumeist statistischen Modelle beschreiben unter anderem die Häufigkeit von Erdbeben in Zeit und Raum und die möglichen Erschütterungsfelder durch die Abnahmebeziehung. Da verschiedene Erdbebenquellen verschiedene Parameter aufweisen, sind Erdbebengefährdungsmodelle sehr komplex und haben eine große Anzahl an Parametern.

Die Teilmodelle enthalten verschiedene Schätzfehler, welche sich in der Gefährdungsanalyse fortpflanzen und die kumulierten Schätzfehler der lokalen Gefährdungskurve generieren. Diese Schätzfehler sind die Unsicherheit der Ergebnisse der Gefährdungsanalyse. In der Erdbebenge-

Mathias Raschke

Firma M. Raschke  
mathiasraschke@t-online.de

fährungsanalyse wird seit Jahrzehnten versucht, diese Schätzunsicherheiten mittels dem Logic-Tree-Ansatz zu quantifizieren [8], was auch in anderen Bereichen Nachahmung findet [9], [10].

Aus statistischer Sicht wird die wirkliche Fehlerfortpflanzung im Logic-Tree-Ansatz nicht angemessen berücksichtigt, was Motivation für den vorliegenden Beitrag ist. Da in verschiedenen Wissenschaftsgebieten gleiche Begriffe für verschiedene Sachverhalte (oder umgekehrt) verwendet werden, werden im folgenden Abschnitt Begrifflichkeiten geklärt. Danach wird kurz im Abschnitt 3 die statistische Fehlerfortpflanzung erläutert. Details des Logic-Tree-Ansatzes werden im Abschnitt 4 aus der Perspektive der mathematischen Statistik diskutiert, bevor im Abschnitt 5 eine praktikable Berechnungsmethode für die statistische Fehlerfortpflanzung in Erdbebengefährdungsanalysen vorgestellt und validiert wird. Probleme und Ergebnisse werden in Abschnitte 6 und Abschnitt 7 diskutiert.

## 2 Zufall, Fehler, Unsicherheit und Sensitivität

Zufälliger Fehler treten in vielen Bereichen auf. In der Industrie sind zufällige Mess- und Fertigungsfehler üblich. In der Technik und Wissenschaft werden geringe Abweichungen zwischen Beobachtung und Modell auch als zufällige Fehler betrachtet. Der zufällige Fehler variiert und grundsätzlich wird für ein Modell oder technische Analyse sowie Messung angestrebt, dass der zufällige Fehler  $X$  einen Erwartungswert (Mittelwert, Durchschnitt) 0 hat. Dies bedeutet, dass der Mittelwert (Durchschnitt) einer Stichprobe von zufälligen Fehlern bei steigender Stichprobengröße gegen 0 tendiert. Wenn dies nicht der Fall ist, liegt ein systematischer Fehler vor, der Bias genannt wird [11]. In der Statistik wird grundsätzlich zwischen systematischer und zufälliger Fehlerkomponente unterschieden. Allerdings muss Zufälligkeit in einem Modell nicht auf die Fehler beschränkt sein. Die Erdbebeneinwirkung an sich wird auch als Zufallsgröße verstanden.

Diese Zufälligkeit von Variablen wie Magnitude oder Herdtiefe (nicht der Fehler) wird in der konventionellen Erdbebengefährdungsanalyse als aleatorische Unsicherheit bezeichnet, der Schätzfehler ist die epistemische Unsicherheit [8], [12]. Diese Unterscheidung wird in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft und Technik verwendet und wird hier aus zwei Gründen kritisch betrachtet. Zum einen wird nicht zwischen zufällige und systematische Fehlerkomponente unterschieden. Zum anderen ist eine absolut klare Trennung von aleatorisch und epistemisch nicht möglich. In einem statistischen Schätzverfahren beruht die epistemische Unsicherheit auf der Zufälligkeit der Stichprobe, welche eine aleatorische Unsicherheit ist. Ein klassisches Beispiel ist hierfür die Schätzunsicherheit des Erwartungswertes einer Zufallsvariable, die unter anderem durch die Standardabweichung dieser Zufallsvariable determiniert ist [11]. Auch ein (pseudo) Zufallszahlengenerator illustriert die Unschärfe zwischen aleatorisch und epistemisch: Grundsätzlich ist ein numerischer Zufallszahlengenerator eine Berechnungsvorschrift, in der die nachfolgende Zufallszahl durch die vorrangegangene determiniert ist. Wenn wir den Startpunkt (Initialisierung) des Generators kennen, so kennen wir auch die Sequenz an Zahlen, die generiert werden. Wenn aber epistemische Unsicherheit vorliegt und der Startpunkt unbekannt ist, so wird die generierte Se-

quenz an Zahlen am besten als Sequenz unabhängiger Zufallszahl modelliert, also als aleatorische Unsicherheit gehandhabt. Dieses Beispiel veranschaulicht auch, dass die Unterscheidung zwischen deterministisch und zufällig einer gewissen Relativität unterliegt. Hier wird Zufälligkeit als ein mathematisches Konzept verstanden, welches unter prüfbareren, wissenschaftlichen Bedingungen benutzt werden kann, um die Realität zu beschreiben. Die statistischen Schätzfehler werden in diesem Beitrag als die Hauptquelle der Schätzunsicherheiten betrachtet. Das Problem der möglichen Fehler in statistischen Tests und der statistischen Selektion von Modellen wird hier weitgehend vernachlässigt, da es den Rahmen des Artikels sprengen würde. Das gleiche gilt für die Problematik eines lokalen Bias in einem Erdbebengefährdungsmodell welches global biasfrei ist [13].

Unabhängig von der Unterscheidung zwischen zufälligem und systematischem Fehler sowie aleatorischer und epistemischer Unsicherheit kann die Sensitivität eines Modells oder einer Berechnung quantifiziert werden. Dabei werden die Parameter variiert und die resultierende Variabilität der Ergebnisse, in unserem Fall der Gefährdungskurve, betrachtet. Sensitivitätsrechnungen sind typisch für das Ingenieurwesen und ermöglichen dem Bearbeiter/der Bearbeiterin, mit dem Problem vertraut zu werden und kritische Parameter zu identifizieren. Aber eine Sensitivitätsanalyse macht keine Aussagen zu den Schätzfehlern.

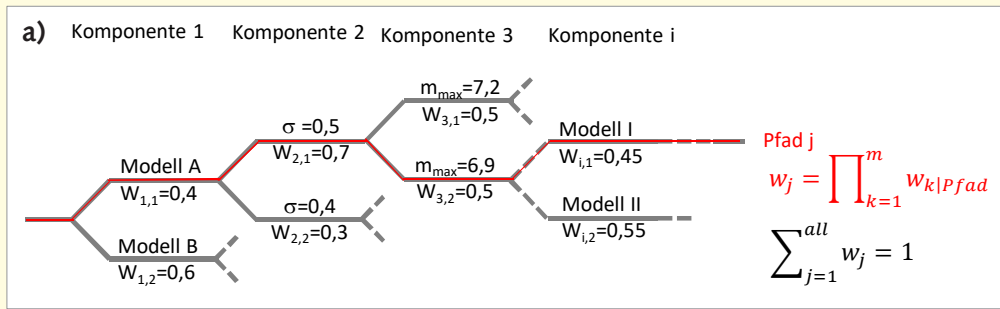
## 3 Fehlermaß und Fehlerfortpflanzung in der Statistik

Die Aufmerksamkeit liegt in der mathematischen Statistik hauptsächlich auf der Fortpflanzung zufälliger Fehler, da Schätzmethoden biasfrei sein sollten [11]. Zumindest sollte der Betrag eines möglichen Bias kleiner werden mit dem Wachsen der zugrundeliegenden Stichprobe. Gleiches gilt für die Standardabweichung  $S$  des zufälligen Fehlers der Schätzmethode. Die Standardabweichung  $S$  ist ein typisches Maß für den zufälligen Fehler und wird deshalb auch Standardfehler genannt. Sie ergibt sich aus der Wurzel der Varianz  $V$ , welche der Erwartungswert des quadrierten, zufälligen Fehlers ist, wenn kein Bias vorliegt. Die Standardabweichung skaliert auch die Vertrauensbereiche (Konfidenzintervalle). Dieser ist ein Schätzbereich, welcher den gesuchten, wirklichen Parameter mit einer definierten Wahrscheinlichkeit enthält. Ein kleinerer Vertrauensbereich entspricht einer genaueren Schätzung mit kleinerem Standardfehler. In manchen Ergebnispräsentationen wird aber pauschal ein Bereich in der Umgebung der Punktschätzungen größer und kleiner eines Vielfachen des Standardfehlers angegeben – der Fehlerbereich und Fehlerintervall.

Die einfachste Variante der statistischen Fehlerfortpflanzung ist die Aggregation von zufälligen, voneinander unabhängigen Fehlern mit  $X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ . Die Standardabweichung des aggregierten zufälligen Fehlers  $X$  ergibt sich dann mit der bekannten Formel [11]

$$S_{all} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_i}.$$

In komplexen Modellen können die zufälligen Schätzfehler korrelieren und die Auswirkungen auf den endgültigen Fehler sind nicht linear. Allerdings wird lokale Linearität



S 16

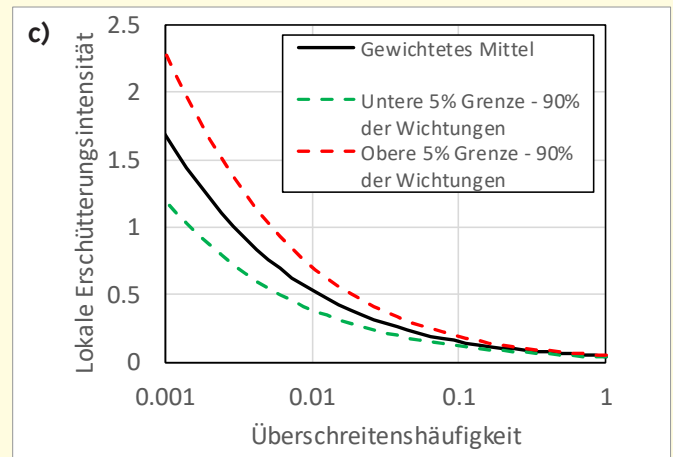
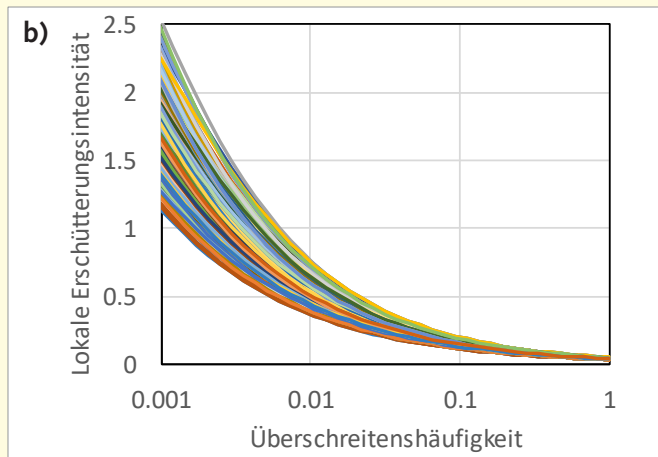


Bild 2. Schematisches Beispiel für einen Logic-Tree-Analyse: a) Wichtungen im Logic-Tree, b) Schar der Gefährdungskurven aller Pfade, c) Zusammenfassung der Ergebnisse.

angenommen, wenn die Fehlerfortpflanzung mit der Delta-Methode approximiert wird [11], [14]. Dabei ergibt sich eine sekundäre Parameterschätzung  $\hat{\phi}$  aus der ursprünglichen, primären Parametrisierung des Modells mit dem geschätzten Vektor  $\hat{\theta}$  über die Funktion  $\theta \rightarrow \phi$ . Die Fehlervarianz  $V_{\hat{\phi}}$  der sekundären Parameterschätzung  $\hat{\phi}$  wird durch die Varianz-Kovarianz-Matrix  $V_{\theta}$  der Fehler der primären Schätzung  $\hat{\theta}$  determiniert mit

$$V_{\hat{\phi}} = \nabla_{\phi}^T V_{\theta} \nabla_{\phi}, \text{ wobei der Nabla-Operator benutzt wird}$$

$$\nabla_{\phi} = \left[ \frac{\partial}{\partial \phi_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial \phi_i}, \dots, \frac{\partial}{\partial \phi_k} \right].$$

Dieser enthält die partiellen Ableitungen der Funktion  $\theta \rightarrow \phi$ , welche als Sensitivität des Modells interpretiert werden könnte. Häufig kann Normalverteilung angenommen werden mit  $\hat{\phi} \sim N(\phi_0, V_{\hat{\phi}})$ , mit dem  $\phi_0$  als wirklichen Parameter und Erwartungswert der Verteilung.

Die Methode hat verschiedene Namen, im Ingenieurwesen wird es auch als Näherungsrechnung mithilfe von Taylor-Reihen bezeichnet.

#### 4 Der Logic-Tree in der Erdbebengefährdungsanalyse

Die beschriebenen, klassischen, statistischen Methoden zur Berechnung der Fehlerfortpflanzung werden in der Erdbebengefährdungsanalyse nicht verwendet. Stattdessen werden umfangreiche Berechnungen für eine Vielzahl an Modell- und Parameterkombinationen durchgeführt. Organisiert werden diese Parameterkombinationen über den Logic-Tree [8], [15], [16]. Der Logic-Tree-Ansatz wurde ursprünglich für die Gefährdungsanalyse von Nuklearanlagen entwickelt [12]. Hier wird vermutet, dass der Logic-Tree-Ansatz durch die Fehlerbaumanalyse (Versagensbaum, Fault-Tree) für Nuklearanlagen [17], [18] inspiriert

wurde. Allerdings unterscheiden sich Inhalt und Ergebnis beider Baumanalysen grundsätzlich. Die Pfade des Fehlerbaums beschreiben die Kombination des Versagens oder Nichtversagens von Teilen einer technischen Anlage. Das Endergebnis ist die Wahrscheinlichkeit des technischen Versagens des Systems.

Im Logic-Tree beschreibt jeder Pfad die Kombination von Modellen und/oder Parametern. Jede Verzweigung des Baumes enthält eine Wichtung, wie in Bild 2a dargestellt. Die Summe der Wichtung je Verzweigung ist 1. Jeder Pfad des Baumes steht auch für eine Gefährdungskurve. Deren Gesamtgewichtung ist das Produkt aller Wichtungen des Pfades. Am Ende der Analyse liegt eine Schar an Kurven entsprechend Bild 2b vor, die in Bild 2c zusammengefasst werden.

Die Wichtungen werden zu einem großen Teil durch Experten festgelegt. Solche Expertenschätzungen können in der Statistik durchaus akzeptabel sein und fallen in die Kategorie Delphi-Methode [11] nach dem gleichnamigen griechischen Orakel. Beispiele hierfür sind Wirtschaftsprognosen für das kommende Jahr oder spezielle technische Lösungen für eine Bauwerksgründung für ständige Lasten. Solche Fälle unterscheiden sich aber von der Erdbebengefährdungsanalyse in zweierlei Hinsicht. Zum einen liegt der geschätzte Parameter im normalen Erfahrungsbereich des schätzenden Experten und zum anderen kann die jeweilige Expertenmeinung anhand der tatsächlichen, kurzfristigen Entwicklung validiert oder falsifiziert werden. Im Logic-Tree-Ansatz wird versucht, mit nicht validierbaren subjektiven Meinungen eine objektive Schätzunsicherheit für sehr langfristige Phänomene zu quantifizieren. Dies ist aus statistischer Sicht nicht möglich.

Außerdem werden im Logic-Tree die wirklichen Schätzfehler der Teilmodelle nicht konsequent und umfassend be-



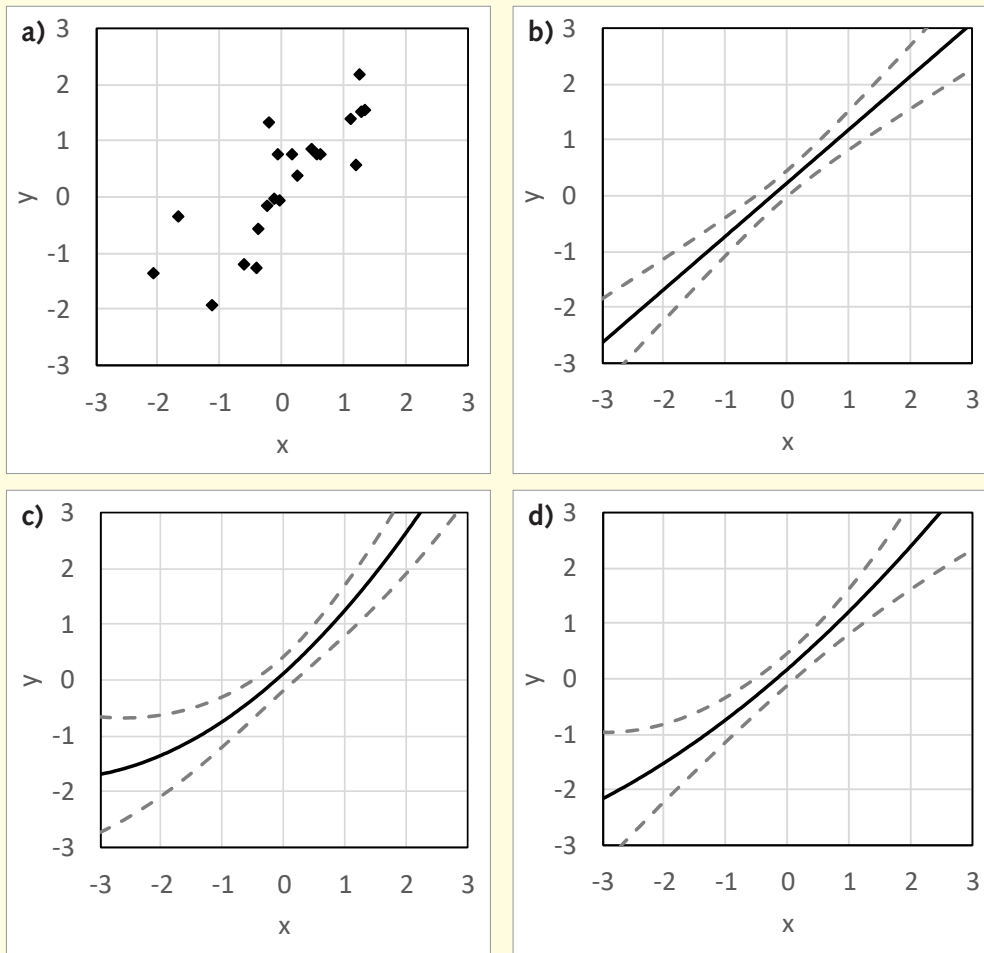


Bild 3. Schematisches Beispiel für die Mischung von Regressionsmodellen, a) Stichprobe, b) Polygon ersten Grades, c) Mischung mit jeweils 50 % (durchgehende Linie – Regressionsfunktion, gestrichelte Linien 90 % Vertrauensbereich).

rücksichtigt. Nur der Schätzfehler für die obere Grenzmagnitude, der maximal möglichen Magnitude findet regelmäßig Eingang in den Logic-Tree [15]. Da sich aber der Schätzfehler einer komplexen Modellierung aus den Schätzfehlern der Teilmodelle entsprechend der statistischen Fehlerfortpflanzung zusammensetzt, kann eine Logic-Tree Analyse die Schätzunsicherheit nicht quantifizieren. Im Gegenteil, jede Gefährdungskurve des Logic-Trees (Bild 2b) beinhaltet Schätzunsicherheiten, die aber nicht ermittelt werden.

Eine weitere Interpretation des Logic-Tree-Ansatzes ist die Mischung von Modellen, genannt Model-Averaging. Diese wurde bereits in anderen Bereichen der angewandten Statistik erwogen [19]. Soweit hier bekannt, ist diese Art von Mischung von Modellen nicht in der mathematischen Statistik etabliert [20]. Und eine allgemeine Sinnhaftigkeit einer solchen Mischung lässt sich mit einem einfachen statistischen Beispiel aus der Regressionsanalyse in Zweifel ziehen, welches in Bild 3 dargestellt ist. Es werden ein Polynom ersten Grades (Bild 3b) und ein Polynom zweiten Grades (Bild 3c) als Regressionsfunktion be-

rücksichtigt. Die Mischung dieser Modelle ergibt ein Polynom zweiten Grades (Bild 3d), welches die Beobachtungen aber nicht sehr gut fittet, denn das ursprüngliche, gemischte Polynom zweiten Grades (Bild 3c) fittet die Beobachtungen besser. Dessen Parameter wurden ja dahingehend optimiert. Außerdem kann das gemischte Modell das breiteste Konfidenzintervall aufweisen. So stellt sich die Frage: Welches ist der Mehrwert einer solchen Mischung?

Des Weiteren wird die Logic-Tree Analyse als Sensitivitätsanalyse verstanden [21], deren Mehrwert hier akzeptiert wird (Abschnitt 5). Aber die Schätzfehler kann eine Logic-Tree Analyse nicht quantifizieren. Entsprechend ist die Darstellung der Ergebnisse einer Logic-Tree Analyse als Fehler- oder Vertrauensbereich im Sinne der Statistik [11], [14] irreführend und damit nicht wissenschaftlich. So werden die Bereiche der Wichtigung (Bild 2c) oft als Quantile bezeichnet (z. B. Abbildung 20 in [15]). Diese Bezeichnung sollte aber wirklichen Zufallsverteilungen und Konfidenzbereichen vorbehalten sein, denn Expertenwichtigungen sind keine Wahrscheinlichkeiten.

### 5 Statistische Fehlerfortpflanzung für die Gefährdungsanalyse

Ein Erdbebengefährdungsmodell kann sehr viele Parameter enthalten [15]. Zur Ermittlung des Nabla-Operators für die klassische Delta-Methode (Abschnitt 4) wären also viele Berechnungen notwendig, welche nicht mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden können. Dies könnte auch eine Motivation für die Einführung des Logic-Trees gewesen sein. Da dieser aber die Folgefehler nicht wirklich quantifizieren kann, wird hier eine Alternative vorgestellt.

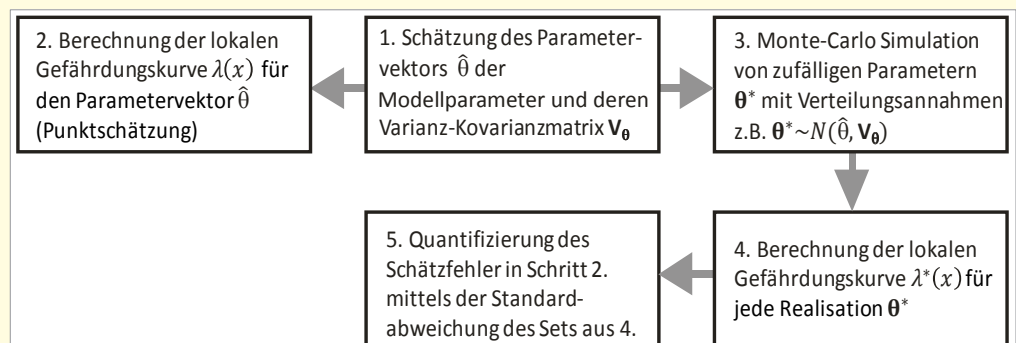


Bild 4. Schema der modifizierten Delta-Methode für die Erdbebengefährdungsanalyse

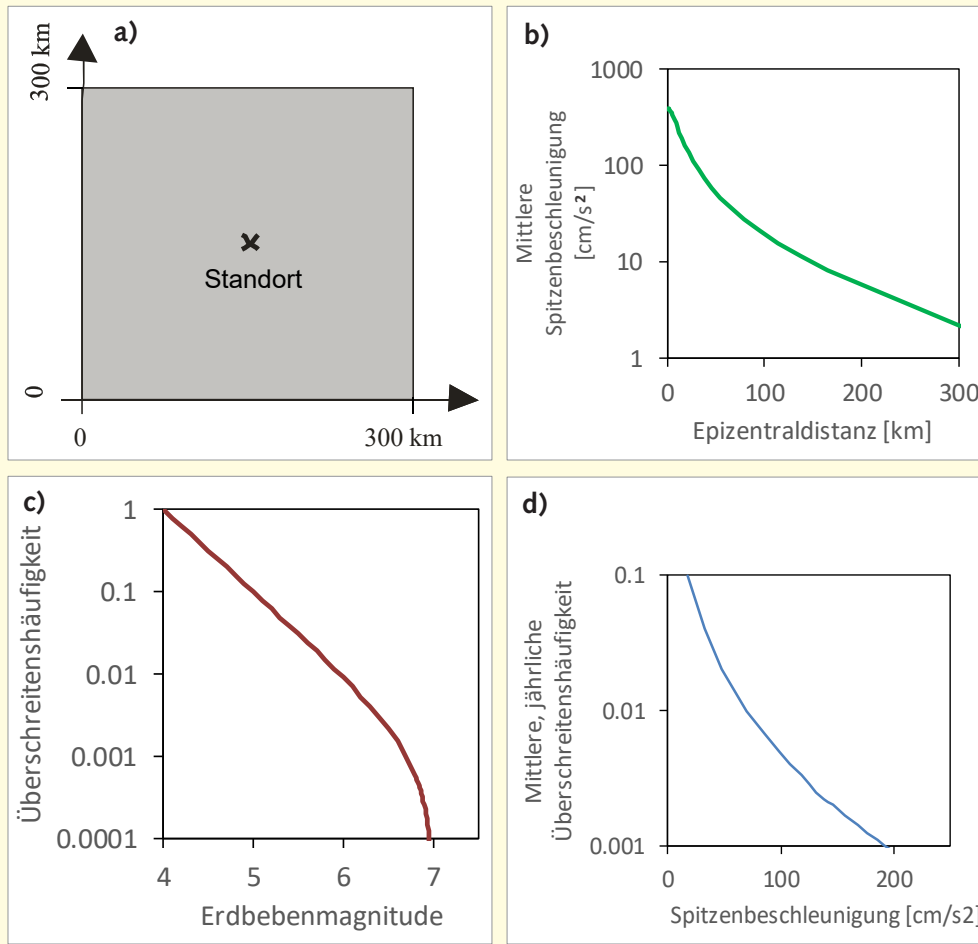


Bild 5. Definierte Situation der seismischen Erdbebengefährdung: a) Flächige Erdbebenquelle (Quellregion) und berücksichtigter Standort, b) Abnahmebeziehung, c) Magnitudenhäufigkeit, d) resultierende Gefährdungsfunktion des berücksichtigten Standorts.

Darin wird die Delta-Methode adaptiert. Der probabilistische Hintergrund der neuen Methode ist derselbe wie der der Delta-Methode, womit theoretische Begründungen entfallen. Die Transformation wird aber nicht über den Matrizen Operationen realisiert, sondern über eine Monte-Carlo-Simulation entsprechend Bild 4. Nachdem die Gefährdungskurve für den Parametervektor  $\hat{\theta}$  geschätzt wurde, werden zufälligen Parametervektoren  $\theta^*$  per Monte-Carlo-Simulation generiert. Grundlage dafür sind angemessene Verteilungsannahmen, ein Vektor der Erwartungswerte, welcher identisch mit  $\hat{\theta}$  ist, und die Varianz-Kovarianz-Matrix  $V_{\theta}$ . Für jede Realisation  $\theta^*$  wird nun wieder eine Gefährdungskurve berechnet. Aus dem so generierten Set an zufälligen Kurven kann der Schätzfehler der eigentlichen Punktschätzung ermittelt werden. Die korrigierte Standardabweichung der generierten Stichprobe entspricht dem Schätzfehler der Gefährdungskurve. Der Rechenaufwand ist relativ gering.

Im Gegensatz zum Logic-Tree kann die Funktionalität dieses neuen Ansatzes, wie in der Statistik üblich [22], mittels Monte-Carlo-Simulationen und anschließender Analysen überprüft werden. Hier wird auf eine Studie des Autors zurückgegriffen [23], in der eine einfache Situation der seismischen Gefährdung entsprechend Bild 5 konstruiert wurde. Details der Teilmodelle, Schätzung und Verteilungsannahmen sind in der Studie erläutert. Hier werden aber weitere Ergebnisse präsentiert und Mängel in den Erläuterungen korrigiert. Gewisse Aspekte der statistischen Modellelekti-

on wurden in der Studie berücksichtigt.

Zehn Modellparameter wurden in jedem der 2 000 Modelldurchläufe der Studie anhand simulierter Stichproben geschätzt und mit diesen Punktschätzungen die Gefährdungskurve ermittelt. Je Durchlauf wurden zur Quantifizierung des Schätzfehlers der Gefährdungskurve 20 zufällige Parametervektoren  $\theta^*$  per Monte-Carlo-Simulation generiert und die entsprechenden Gefährdungskurven berechnet. Die damit ermittelten Fehler bezieht sich hier auf die geschätzten Spitzenbeschleunigungen für definierte Überschreitungshäufigkeiten. Alle wichtigen Modellkomponenten wurden geschätzt, nur die Form der Quellregion wurde als gegeben betrachtet, da es in der Statistik kein etabliertes Schätzverfahren für die Polygone der Quellregionen gibt. Allerdings werden in jüngster Zeit auch Verfahren der parameterfreien Dichteschätzung für Gefährdungsmodelle verwendet [15]. Für diese kann sehr wohl der Schätzfehler bestimmt werden [24]. Für die grundsätzliche Beurteilung der vorgeschlagenen Variante der Delta-Methode, sollen die hier berücksichtigten Parameter und deren Schätzfehler genügen. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Aus den 2 000 Gefährdungskurven der Punktschätzungen kann der wirkliche Schätzfehler (bezogen auf die wirkliche Gefährdungskurve) ermittelt werden und dem Durchschnitt der 2 000 Schätzungen der Schätzfehler (bezogen auf die jeweilige Punktschätzung) gegenübergestellt werden. Dies geschieht für jede Überschreitungshäufigkeit, für welche die entsprechende lokale Spitzenbeschleunigung in der Gefährdungsanalyse ermittelt wird. Es wurde auch geprüft, ob ein Vertrauensbereich für die Spitzenbeschleunigung konstruiert werden kann. Die Annahme der Normalverteilung funktioniert als Näherung recht gut (Bild 6c). Der 80 % Bereich wird in der Tendenz eher zu groß geschätzt, der 95 % Bereich eher etwas zu klein. Für die geschätzten Gefährdungskurven konnte auch kein relevanter Bias festgestellt werden.

## 6 Fallstricke: Bias und Überparametrisierung

Das beschriebene Vorgehen funktioniert, wenn alle Teilmodelle und die damit verbundenen Schätzungen keine systematischen Fehler enthalten. Auch ein bekannter Bias könnte berücksichtigt werden. Ein Problem jeder Modellierung ist die Möglichkeit eines unerkannten und damit unberücksichtigten signifikanten systematischen Fehlers. In der Erdbebengefährdungsanalyse könnte beispielsweise eine be-

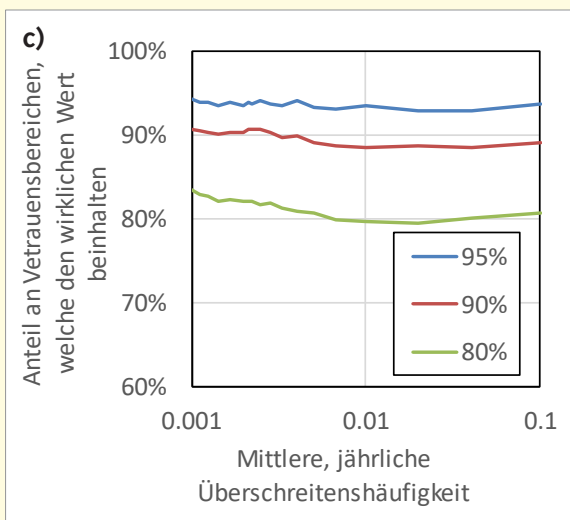
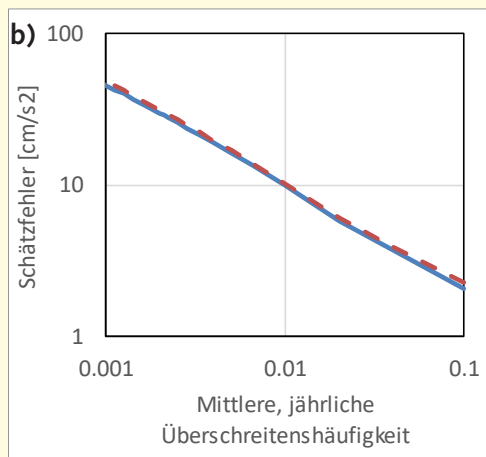
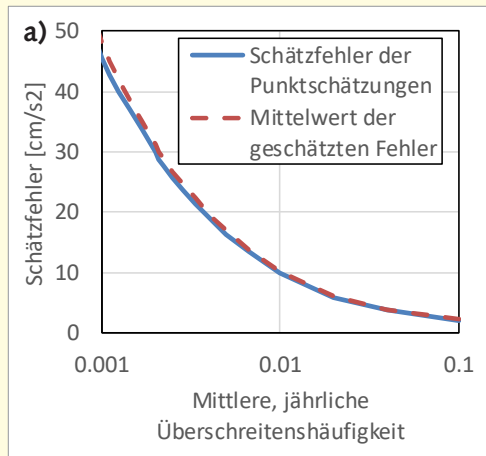


Bild 6. Ergebnisse der Fehlerschätzung. a) Schätzfehler der Punktschätzungen und Mittelwert der Schätzfehler, b) wie a), aber mit logarithmischer Fehlerskala, c) Prüfung von Vertrauensbereichen für 80 %, 90 % und 95 %, konstruiert mit einer Normalverteilung

trächtliche Inkompatibilität zwischen den Magnitudenskalen des Häufigkeitsmodells und der Abnahmebeziehung bestehen. Und im Erdbebenhäufigkeitsmodell generiert der zufällige Fehler der Magnitudenschätzung eine systematische Verzerrung im Häufigkeitsmodell [25], [26], die durchaus relevant sein kann und in bisherigen Erdbebenmodellen nur selten berücksichtigt wird. Auch die Interpretation der Abweichung zwischen modellierter Abnahmebeziehung und Beobachtung des Erschütterungsfeldes als reine Zufallskomponente im Sinne eines Regressionsmodells

führt zu einem systematischen Fehler, da das Erschütterungsfeld eine messbare Zufallsfunktion im Sinne der Statistik ist [27].

Daneben führen die Bemühungen, die Modelle immer genauer zu gestalten, häufig zu einer größeren Anzahl an Modellparametern. Dabei wird oft außer Acht gelassen, dass eine größere Anzahl an Parametern in einen höheren Folgefehler führt (Bild 3b und Bild 3c). Dies fällt bei den klassischen Erdbebengefährdungsanalysen nicht auf, da sie die Fehlerfortpflanzung nicht wirklich und vollständig berücksichtigen. Im schlimmsten Fall liegt eine Überparametrisierung (Overfit) vor. Das heißt, die größere Anzahl an Parametern führt nicht zu einem besseren statistischen Modell.

## 7 Diskussion

Bezüglich der Behandlung von Schätzunsicherheiten bestehen erhebliche Differenzen zwischen der Praxis der Erdbebengefährdungsanalyse und den Regeln und Möglichkeiten der mathematischen Statistik. Der Nutzen des Mischungseffektes im Logic-Tree-Ansatz ist zweifelhaft und ein wirklicher Schätzfehler oder gar Vertrauensintervall kann mit dem Logic-Tree nicht ermittelt werden. Hauptargumente dafür sind, dass die subjektiven Wichtungen per Expertenmeinung im Logic-Tree nicht wissenschaftlich validierbar sind, und dass die signifikanten Schätzfehler der Teilmodelle (z.B. Magnitudenhäufigkeit und Abnahmebeziehung) nicht konsequent berücksichtigt werden. Jede Darstellung der Ergebnisse einer Logic-Tree Analyse als Fehler- oder Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) ist irreführend und damit unwissenschaftlich. Die Intervalle der Logic-Tree Analyse (Bild 2c) sollten explizit Sensitivitätsbereiche oder Wichtungsbereiche genannt werden um eine falsche Interpretation der Ergebnisse der Logic-Tree Analyse durch Wissenschaftler und Ingenieure anderer Bereiche zu vermeiden.

Im Gegensatz zum Logic-Tree-Ansatz lassen sich mit der hier vorgestellten Variante der Delta-Methode der mathematischen Statistik die Folgefehler sehr gut quantifizieren. Notwendig dafür sind Informationen der Schätzfehler der Teilmodelle wie den Magnituden-Häufigkeitsfunktionen und den Abnahmebeziehungen. Die Schätzfehler sollten eigentlich in wissenschaftlichen Publikationen aufgeführt werden, aber selbst namhafte Autoren von Abnahmemodellen veröffentlichen nicht konsequent die Fehler ihrer Schätzungen [27]. Unabhängig davon sollte die beschriebene Variante der Delta-Methode um die Aspekte der statistischen Tests und statistischen Selektion von Modellen erweitert werden. Entsprechende Forschungsvorhaben in der mathematischen Statistik und/oder dem Erdbebeningenieurwesen würde der Autor begrüßen. In diesen sollte auch die Problematik von lokalem und globalem Bias von Erdbebengefährdungsanalysen [13] berücksichtigt werden, die hier nicht besprochen werden konnte.

## Literatur

- [1] EN 1998-1: 2004. Eurocode 8. Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.
- [2] DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN – April 2005, Berlin

- [3] McGuire, R. K.: Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop. *In: Bulletin of the Seismological Society of America* October, Vol. 85 (1995) Iss. 5, pp. 1 275–1 284.
- [4] Schwarz, J.; Raschke, M.; Rosenhauer, W.: Konservativität der seismischen Bemessungsgrößen nach KTA 2201.1 am Maßstab probabilistischer Gefährdungsanalysen. Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar 116, 2004.
- [5] Grünthal, G.; Mayer-Rosa, D.; Lenhardt, W.: Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz. *In: Bautechnik* 75 (1998), Heft 10, S. 753–767.
- [6] Habenberger, J.: Gefährdungskonsistente Erdbebenzenarien für das Gebiet von Deutschland. *In: Bauingenieur* 81 (2006), Heft 9, S. S2-S8.
- [7] Hing-Ho Tsang, H.-H.; Chandler, A. M.: (2006) Site-Specific Probabilistic Seismic-Hazard Assessment: Direct Amplitude-Based Approach. *In: Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96 (2006), Iss. 2, pp. 392–403.
- [8] Bommer, J. J., Scherbaum, F.: The Use and Misuse of Logic Trees in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *In: Earthquake Spectra* Vol. 24 (2008), Iss. 4, pp. 997–1009.
- [9] De Risi, R.; Jalayer, F.; Iervolino, I.; Manfredi, G.; Carozza, S.: Visk: A Gis-Compatible Platform For Micro-Scale Assessment Of Flooding Risk In Urban Areas. COMPDYN 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Kos Island, Greece, 12–14 June 2013.
- [10] Grossi, P.: Sources, Nature, and Impact of Uncertainties on Catastrophe Modeling. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1–6, 2004 Paper No. 1635.
- [11] Rinne, H.: Taschenbuch der Statistik. 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Hattl Deutsch, Frankfurt am Main, 2008.
- [12] Budnitz, R. J.; Apostolakis, G.; Boore, D. M.; Cluff, L. S.; Coppersmith, K. J.; Cornell, C. A.; Morris, P. A.: Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts. NUREG/CR-6372, Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1997.
- [13] Raschke, M.: The average function of local exceedance rates and area-equivalent ground motion relations in seismic hazard analysis. 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, 2014.
- [14] Coles, S.: An introduction to statistical modelling of extreme values. Springer, London, 2001.
- [15] Woessner, J.; Danciu, L. et al.: The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *In: Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 13 (2015), pp. 3 553–3 596.
- [16] Wiemer, St.; Danciu, L. et al.: Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland (SUH2015). Report, Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich, 2016.
- [17] Vesely, W. E.; Goldberg, F. F.; Roberts, N. H.; Haas, D. F.: Fault Tree Handbook, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC 1981.
- [18] Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Dez. 1996, BFS-KT-16–97.
- [19] Burnham, K. P.; Anderson, D. R.: Model selection and multimodel inference – A practical Information-Theoretic Approach. 2. Auflage, Springer-Verlag, New York, 2002.
- [20] DasGupta, A.: Asymptotic theory of statistics and probability. Springer Texts in Statistics, Springer Science+Business Media, 2008.
- [21] Grünthal, G.; Wahlström, R.: Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. *In: Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5 (2001), Iss. 3, pp. 309–328.
- [22] Hüsler, J.; Li, D.; Raschke, M.: Estimation for the generalized Pareto distribution using maximum likelihood and goodness-of-fit. *In: Communication in Statistics – Theory and Methods* 40 (2011), Iss. 14, pp. 2 500–2 510.
- [23] Raschke, M.: Estimation of uncertainties in probabilistic seismic hazard analysis. Proceedings: 12th International Probabilistic Workshop, Weimar, 2014.
- [24] Silverman, B. W.: Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Published in Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman and Hall, London, 1986.
- [25] Tinti, St.; Mulargia, F.: Effects of Magnitude Uncertainties on Estimating the Parameters in the Gutenberg-Richter Frequency-Magnitude Law. *In: Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75 (1985), Iss. 6, pp. 1 681–1 697.
- [26] Rhoades, D. A.; Dowrick, D. J.: Effects of Magnitude Uncertainties on Seismic Hazard Estimates. Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, 2012.
- [27] Raschke, M.: Statistical modelling of ground motion relations for seismic hazard analysis. *In: Journal of Seismology*, Vol. 17 2013, Iss. 4, pp. 1 157–1 182.

## Meldung

## Generalversammlung OGE – Neuwahl des Vorstands

Im Rahmen der am 17. Mai 2017 stattgefundenen Generalversammlung der Österreichischen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (OGE) wurde die Wahl eines neuen Vorstands durchgeführt. Nach einer Amtszeit von insgesamt sechs Jahren beendeten der Vorsitzende Univ.-Prof. Dr. Andreas Kolbitsch und der Generalsekretär Ao. Univ.-Prof. Dr. Rudolf Heuer ihre Vorstandstätigkeit. In dieser Zeit war die OGE unter anderem für die Organisation und Austragung der sehr erfolgreichen VEESD & D-A-CH Tagung 2015 verantwortlich. Für die kommende Funktionsperiode wurden Univ.-Prof. Dr. Christoph Adam als Vorsitzender und Dr. Günther Achs als Generalsekretär des Vorstands der OGE gewählt. Assoc. Prof. Dr. Bernhard Pichler wurde als Kassierer bestätigt.



Christoph Adam (Vorsitzender)



Günther Achs (Generalsekretär)