

Eigenschwingungsverhalten der Beton-, Holz- und Kunststoffschwelle

Die Schwelle als Einzelbauteil und im Verbund mit dem Gleisrost

JOHANNES MACK | WALTER STAHL |
STEPHAN FREUDENSTEIN

Im Zuge von Voruntersuchungen zur Analyse der dynamischen Beanspruchung des Unterbaus durch verschiedene Schwellentypen erfolgten Laborversuche zum Schwingungsverhalten von Schwellen. In der Vergangenheit wurden Ergebnisse zum Eigenschwingungsverhalten von Einzelschwellen aus Spannbeton publiziert [1, 2, 3]. An dieser Stelle soll daran angeknüpft und nun verschiedene Schwellentypen aus den Werkstoffen Beton, Holz und Kunststoff untersucht werden. Zusätzlich wird der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Eigenfrequenzen einer Buchenschwelle betrachtet. Abschließend wird ein Vergleich des Eigenschwingungsverhaltens einer Einzelschwelle und einer Schwelle im Verbund mit einem Gleisrost in Schotterbettung gegeben.

Einzelschwellen – Versuchsaufbau und Durchführung

Die Laborversuche wurden an neuwertigen Einzelschwellen mit vormontierter Schie-

nenbefestigung und ohne Schienen durchgeführt. Die Schwellen lagerten vor den Messungen mindestens zwei Wochen bei Raumtemperatur im Trockenen. Sie wurden vorab gewogen und vermessen.

Zur experimentellen Charakterisierung des Eigenschwingungsverhaltens ist eine spezielle Auflagerung im Labor erforderlich, welche die Schwingung der Einzelschwelle so wenig wie möglich behindert. Die Schwellen wurden vollflächig auf einer zweilagigen Polyurethan Weichschaummatte (Getzner Sylomer SR11) mit einer Gesamthöhe von 56 mm gebettet. Die piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer (Brüel & Kjær 4370 mit Ladungswandlern Brüel & Kjær 2646) wurden an beiden Schwellenköpfen in Schwellenmitte sowie zu Vergleichszwecken an weiteren Positionen platziert (Abb. 1). Es wurden die Schwingbeschleunigungen in vertikaler Richtung erfasst. Die Anregung erfolgte mit einem Impulshammer (Brüel & Kjær 8208) mit integrierter Kraftmessdose an den Schwellenköpfen A und B ebenfalls in vertikaler Richtung. Ein Anschlagen am Schwellenkopf hat sich bei Vorversuchen als zweckmäßig erwiesen, da bei den vertikalen Biegeeigenschwingungen an den Köp-

fen eine maximale Schwingungsamplitude erwartet wird.

Je Schwelle und Schwellenkopf (Seite „A“ und „B“) wurden fünf Schläge mit dem Impulshammer aufgebracht. Der Impulshammer lieferte ein breitbandiges Anregungsspektrum für die Modalanalyse. Für die Erfassung der Messwerte wurde das Frontend MEDA Bluestack (Wölfel Monitoring Systems) und zur Datenauswertung die Software MEDA (Wölfel Monitoring Systems) verwendet.

Aus dem Anregungssignal des Impulshammers (Kraft in Abhängigkeit der Zeit) und dem Antwortsignal der Schwelle (Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit) wurde die spektrale Übertragungsfunktion berechnet. Die Auswertung der Spektren ist nur im Frequenzbereich sinnvoll, in dem die Kohärenz der Übertragungsfunktion nahe bei Eins liegt. Durch eine Betrachtung des Betrages und der Phase der Übertragungsfunktion konnten die Eigenschwingungsfrequenzen identifiziert werden: Es liegt nur dann eine Eigenschwingung vor, wenn bei einer bestimmten Frequenz der Betrag der Übertragungsfunktion ein lokales Maximum aufweist und zugleich ein Sprung im Phasenspektrum auftritt. Durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionen der Schwingungsaufnehmer ist eine Zuweisung der Ordnung der vertikalen Biegeeigenschwingungen zu den entsprechenden Frequenzen möglich. So zeichnet sich beispielsweise die erste und dritte Biegeeigenschwingung durch einen Schwingungsbauch in Schwellenmitte aus, wobei hingegen bei der zweiten und vierten Biegeeigenschwingung ein Schwingungsknoten in Schwellenmitte beobachtet wird.

Zur Untersuchung des Einflusses von Feuchtigkeit auf das Eigenschwingungsverhalten wurde je eine Beton- und Buchenschwelle für 48 h unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert. Das Aufschwimmen der Buchenschwelle im Wassertrog wurde durch eine Ballastierung verhindert. Nach der Wasserlagerung wurden die Schwellen gewogen und sofort einer erneuten Modalanalyse, analog zum oben beschriebenen Verfahren, unterzogen. Zur Kontrolle erfolgte eine zweiwöchige Rücktrocknung der Schwellen bei Raumtemperatur, gefolgt von einem erneuten Wiegen und einer dritten Modalanalyse.

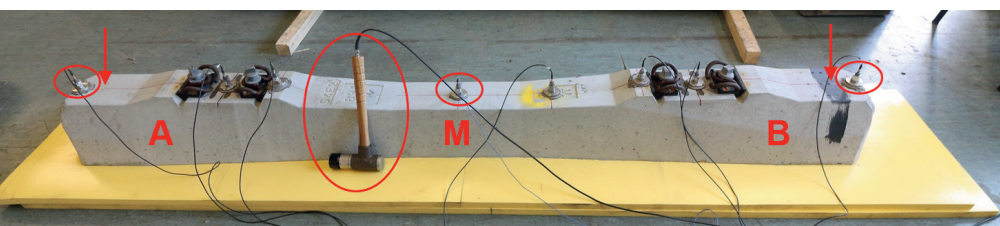


Abb. 1: Versuchsaufbau zur experimentellen Modalanalyse an weich gelagerten Einzelschwellen im Labor. Positionen der Schwingungsaufnehmer: A, M, B und zusätzlich an den Schienenaflagern.

Anschlagpunkte mit dem Impulshammer: neben A und B (Kennzeichnung mit Pfeil)

Quelle: TUM, J. Mack

Schwellentyp	Schienenbefestigung	Abmessungen L x B x H [cm ³]	Masse (*) [kg]
Betonschwelle B70W54	W14	Länge: 260 cm	289,0
Betonschwelle B70W60 (**)	W14	Länge: 260 cm	ca. 300
Betonschwelle B91Ws VI	Ws VI	Länge: 260 cm	293,0
Betonschwelle B90W60	W21	Länge: 260 cm	343,0
Betonschwelle PS 09 (Breitspur)	W21	Länge: 270 cm	330,5
Buchenschwelle teerölgetränkt SBB	Rp IV Ke	250 x 26 x 15	100,0
Buchenschwelle teerölgetränkt DB	Rph 6 W12	260 x 26 x 16	113,5
FFU-Kunstholzschwelle	Rph 6 W12	260 x 26 x 16	105,0

(*) Masse inkl. Schienenbefestigung

(**) Messung nur im Gleisrost

Tab. 1: Zusammenstellung der wesentlichen Kenndaten der untersuchten Schwellen

Quelle: TUM, J. Mack

Einzelwellen – Ergebnisse im trockenen Zustand

Es wurden insgesamt acht verschiedene Schwellentypen untersucht. Im Vergleich zur Buchenschwelle der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) hat die Buchenschwelle der Deutschen Bahn AG (DB) andere Abmessungen (Tab. 1). Neben Beton- und Holzschwellen wurde auch eine Kunststoffschwelle aus dem Werkstoff FFU-Kunstholz, einem glasfaserverstärkten Polyurethan-Kunststoff, untersucht [4]. In Tab. 1 ist eine Zusammenfassung der Typenbezeichnungen und der wesentlichen Kenndaten der Schwellen gegeben.

Abb. 2 und Abb. 3 zeigen die Betragsspektren der Übertragungsfunktion (ÜF) einer Beton- und einer Buchenschwelle. Wie zu erwarten ist, geht aus den Spektren hervor, dass auf der Seite, an der die Anregung mit dem Impulshammer erfolgte (hier: Seite „B“), eine größere Schwingungsamplitude zu verzeichnen ist. Zur Bestimmung der charakteristischen Eigenfrequenzen wurde der Mittelwert aus einer Anregung auf Seite „A“ und „B“ gebildet. Die zweite und vierte Schwingungsmoden kann durch das Fehlen eines Maximums an der mittleren Sensorposition „M“ identifiziert werden. Im Betragsspektrum der Übertragungsfunktion fällt ein kleinerer Peak im Frequenzbereich unter 50 Hz auf. Da bei dieser Frequenz insbesondere kein Sprung im Phasenspektrum der Übertragungsfunktion beobachtet wurde, handelt es sich um keine Eigenschwingungsfrequenz der Schwellen. Vielmehr ist dieser Peak der Schwingungsfrequenz der Schwelle als Einmassenschwinger auf der weichen Lagerung zuzuordnen. Die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen der ersten vier vertikalen Biegeeigen-schwingungen sind in Tab. 2 und Abb. 4 zusammengefasst.

Die Messergebnisse zeigen, dass bei allen Schwellentypen ein progressiver Anstieg der Eigenfrequenz mit steigender Schwingungsordnung vorliegt. Bei den vier untersuchten Betonschwellen sind die ersten vier Eigenfrequenzen ähnlich. Nicht beobachtet werden konnten jedoch die aufgrund der höheren Massen zu erwartenden niedrigeren Eigenfrequenzen der Schwellen B90W60 und PS 09 gegenüber den leichteren B70W54- und B91Ws VI-Schwellen. Andere Untersuchungen mithilfe der Finiten Elemente Methode, an denen das Prüfamts für Verkehrswegebau beteiligt war, haben ergeben, dass eine vorgespannte Schwelle eine um 10 Hz höhere Frequenz der ersten Biegeeigen-schwingung im Vergleich zu einer schlaff bewehrten Betonschwelle aufweist [3]. Zwischen den Beton- und Buchenschwellen existieren, vor allem bei höheren

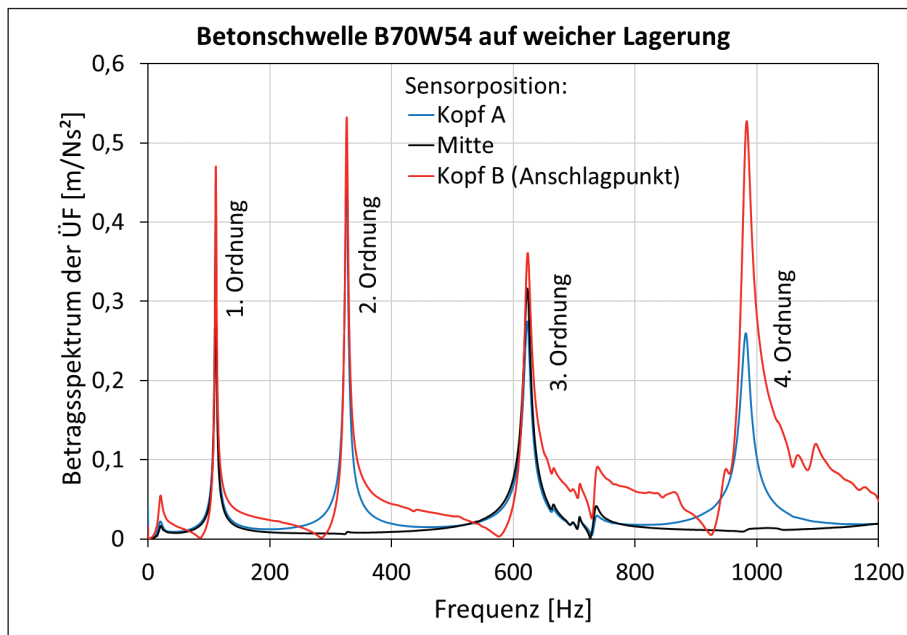


Abb. 2: Betragsspektrum der Übertragungsfunktion (ÜF) einer B70W54-Schwelle. Die Schwelle wurde mit dem Impulshammer am Schwellenkopf B angeschlagen.

Quelle: TUM, J. Mack

Schwingungsordnungen, deutliche Unterschiede in den Eigenfrequenzen. Zum Vergleich von Beton- und Buchenschwelle sowie von Buchen- und FFU-Kunstholz-

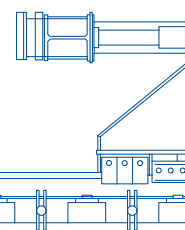
schwelle wurde ein Quotient aus den jeweiligen Eigenfrequenzen gebildet (Abb. 5). Die Eigenfrequenzen der Buchenschwellen wachsen mit zunehmender



UND AM ENDE IST ES RAWIE.

Anstelle einfacher Gleisabschlüsse entwickelte Franz Rawie einen bremsenden Prellbock und ließ diesen 1908 patentieren. Heute sorgen individuell konstruierte und handgefertigte RAWIE Lösungen weltweit für mehr Sicherheit im Schienenverkehr.

RAWIE.DE



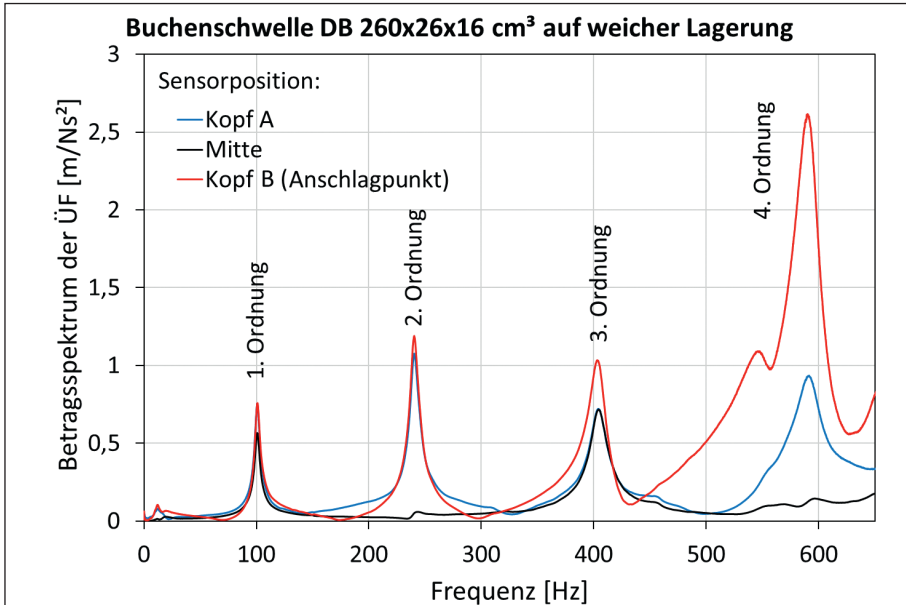


Abb. 3: Betragsspektrum der Übertragungsfunktion (ÜF) einer Buchenschwelle der DB (Abmessungen 260x26x16 cm³). Die Schwelle wurde mit dem Impulshammer am Schwellenkopf B angeschlagen.

Quelle: TUM, J. Mack

Ordnung der Schwingung weniger stark an als die der Betonschwellen. Auch im Vergleich zwischen der Buchen- und der FFU-Schwelle zeigt sich dieser Trend. Es ist naheliegend, dass Unterschiede in den frequenzabhängigen Materialparametern von Spannbeton, Buchenholz und FFU-Kunstholz dafür ursächlich sind. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die FFU-Kunstholzwelle hinsichtlich des Eigenschwingungsverhaltens eher wie eine Buchenschwelle verhält als wie eine Spannbetonschwelle.

Einzelsschwellen – Ergebnisse im feuchten Zustand

Es wurde der Einfluss von Feuchtigkeit auf das Eigenschwingungsverhalten einer Beton- und Buchenschwelle untersucht. Wie zu erwarten war, konnte im Fall einer B91-Betonschwelle keine messbare Wasseraufnahme festgestellt werden, folglich waren auch bei den Eigenfrequenzen keine Änderungen durch den Einfluss von Feuchtigkeit zu beobachten. Bei der teerölgetränkten SBB-Buchenschwelle konnte durch die 48-stündige Wasserlagerung eine Massenzunahme von 2,5 kg festgestellt werden. Die im trockenen, im feuchten und im rückgetrockneten Zustand gemessenen Eigenfrequenzen sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Bei den experimentellen Untersuchungen deutete sich eine minimale Abnahme der Eigenfrequenz durch den Einfluss der Feuchtigkeit an. Nach einer Rücktrocknung der Schwelle stiegen die Eigenfrequenzen im Rahmen der Messgenauigkeit wieder auf die ursprünglichen Werte an. Unter dem Einfluss von Feuchtigkeit sind bei der Buchenschwelle zwei Effekte zu berücksichtigen: Eine Zunahme der Dichte sowie eine Änderung des Elastizitätsmodules des Holzes: Mit steigender Feuchtigkeit nimmt der Elastizitätsmodul von Buchenholz ab [5]. Aus beiden Effekten resultiert eine Abnahme der Eigenfrequenz.

Schwelle im Gleisrost – Versuchsdurchführung

Eine freie, weich gelagerte Schwelle bietet zwar im Laborversuch reproduzierbare Randbedingungen, sie entspricht jedoch nicht der Einbausituation im Gleis. Aus diesem Grund wurden im Versuchsgleis des Prüfamtes für Verkehrswegebau der TU München (TUM) Untersuchungen an einer Schwelle im Gleisrost durchgeführt. An einem unbelasteten 12 m-Gleisrost mit Schotterbettung (Schwellenabstand 600 mm; Schienen 60E1; Schienenbefestigung W14 Zw700) wurde das Schwingungsverhalten einer B70W60 Schwelle gemessen (Abb. 6). Das Schotterbett wurde per Hand gestopft und weist eine Höhe von 30 cm auf (gemessen bis Schwellenunterkante). Die experi-

Schwellentyp	Frequenz [Hz] der Schwingungsmode			
	1	2	3	4
Betonschwelle B70W54	111,4	326,3	623,3	982,9
Betonschwelle B91Ws VI	116,7	343,0	662,7	1040,9
Betonschwelle B90W60	115,8	335,5	654,0	980,2
Betonschwelle PS 09 (Breitspur)	117,9	350,1	673,6	1063,2
Buchenschwelle teerölgetränkt SBB	89,1	220,6	382,6	570,7
Buchenschwelle teerölgetränkt DB	100,8	240,2	404,1	591,0
FFU-Kunstholzwelle	90,1	190,3	303,4	430,8

Tab. 2: Frequenzen der vertikalen Biegeeigenschwingungen von unterschiedlichen Einzelsschwellen

Quelle: TUM, J. Mack

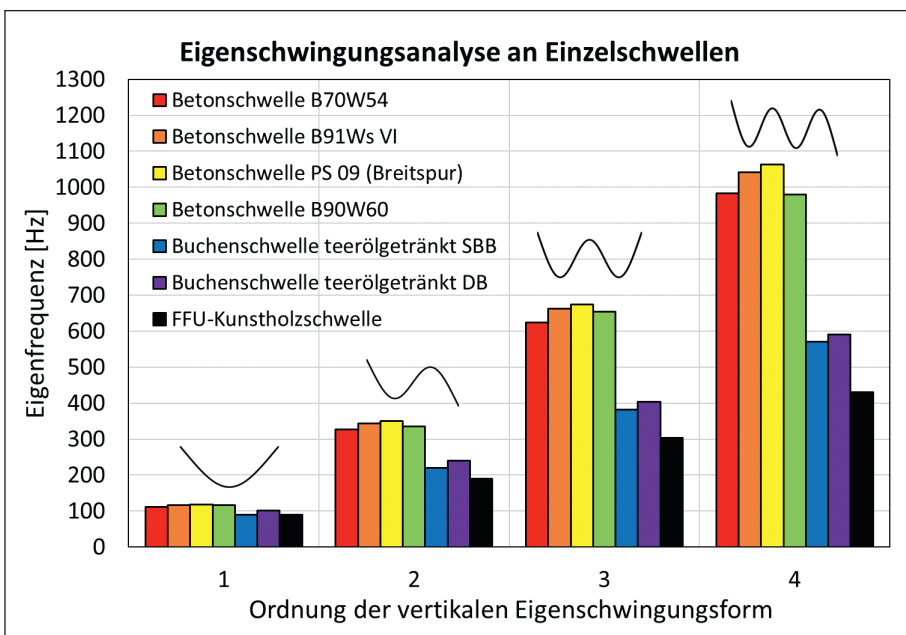


Abb. 4: Frequenzen der ersten vier vertikalen Eigenschwingungsformen von unterschiedlichen Schwellentypen. Zusätzlich ist je Schwingungsform die Verformung der Schwelle skizziert.

Quelle: TUM, J. Mack

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Technische Universität München / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

mentelle Vorgehensweise entsprach der oben beschriebenen Methode.

Schwelle im Gleisrost – Ergebnisse

Die charakterisierten Schwellen des Typs B70W54 (Untersuchung als Einzelschwelle) und B70W60 (Untersuchung im Gleisrost) unterscheiden sich nur in einer anderen Schienenauflegerbreite, ansonsten sind die Geometrie und Masse identisch. Im Vergleich zur weich gelagerten Einzelschwelle zeigt sich bei der B70-Schwelle im Gleisrost eine Verbreiterung der Peaks im Betragsspektrum der Übertragungsfunktion bei gleichzeitiger erheblicher Abnahme der Amplitude (Abb. 7). Ursächlich hierfür ist die Schwingungsdämpfung durch den Schotter und die Schienenbefestigung. Die Schwingungsmoden konnten mit dem oben beschriebenen Verfahren den Peaks zugeordnet werden. Für die B70-Schwelle im Gleisrost wurde mindestens bis zur vierten Schwingungsform eine höhere Eigenfrequenz als für die B70-Einzelschwelle gemessen (Tab. 4). Der Abstand der Eigenfrequenzen nimmt in beiden Fällen mit steigender Ordnung der Schwingungsform zu.

Fazit

Es wurden insgesamt sieben Schwellentypen bestehend aus Beton, Holz und Kunststoff bezüglich ihres Eigenschwingungsverhaltens charakterisiert. Die Frequenzen der ersten vier vertikalen Biegemoden von Buchen- und FFU-Kunstholzswellen liegen stets unter denen von Betonswellen. Mit steigender Ordnung der Schwingungsform ist ein progressiver Anstieg der Eigenfrequenz bei allen Schwellenarten zu beobachten. Die Eigenfrequenzen der FFU-

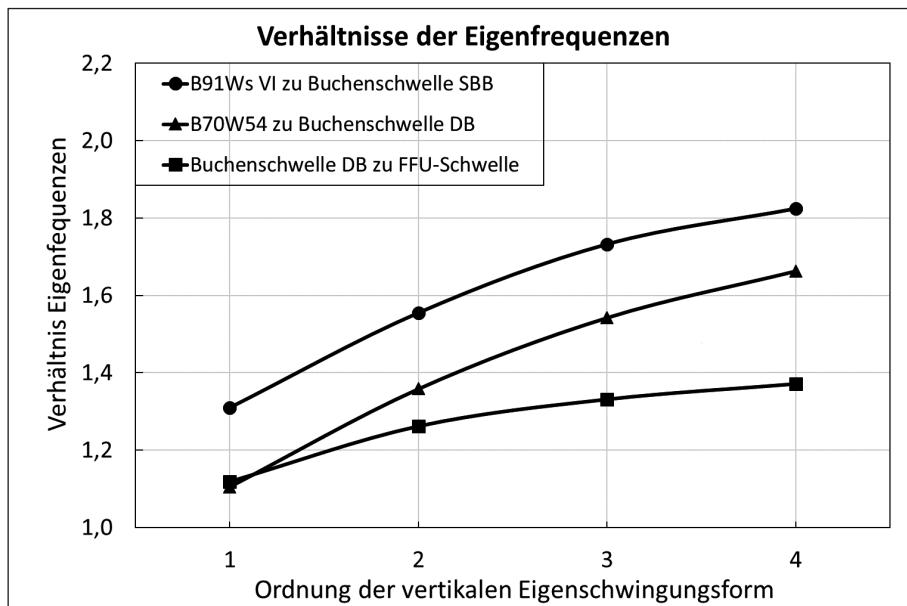


Abb. 5: Verhältnis der Eigenfrequenzen von unterschiedlichen Schwellentypen *Quelle: TUM, J. Mack*

Konditionierung	Frequenz [Hz] der Schwingungsform			
	1	2	3	4
Trocken	89,1	220,6	382,6	570,7
Feucht: 48 h Wasserlagerung	87,7	221,0	378,0	560,4
Rückgetrocknet: für 2 Wochen	89,0	221,5	383,1	569,5
Änderung durch Wasserlagerung [%]	-1,6	0,2	-1,2	-1,8

Tab. 3: Einfluss von Feuchtigkeit auf die Eigenfrequenzen einer teerölgetränkter SBB-Buchenschwelle *Quelle: TUM, J. Mack*

Kunstholzschwelle ähneln eher der Buchenschwelle als der Betonschwelle. Innerhalb der vier Betonschwellentypen konnten keine wesentlichen Frequenzunterschiede gemessen werden. Das Schwingungsverhalten

der unbelasteten Einzelschwelle kann beispielsweise hinsichtlich des dynamischen Querverschiebewiderstandes oder bei der Entlastung durch die Abhebewelle einer Achsüberrollung relevant sein.

ZUVERLÄSSIG · WIRTSCHAFTLICH · WERTIG

RICHTIG GUTES LICHT

LED-Leuchten für Werkshallen

- > HOCHEFFIZIENTE LED-LICHTTECHNIK
- > BLENDFREIES UND GLEICHMÄßIGES LICHT
- > ROBUSTE GEHÄUSE AUS ALUMINIUM



BöSha GmbH & Co. KG
 Industriegebiet Heidberg 21 · D - 59602 Rütten
 Fon +49 2952 97091-0 · Fax +49 2952 97091-150
www.boesha.de · vertrieb@boesha.de

Feuchtigkeit hat bei Betonschwellen keinen Einfluss auf deren Eigenschwingungsverhalten. Eine Wasseraufnahme der Buchenschwelle hat eine geringe Abnahme der Eigenfrequenz zur Folge. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt für die Dynamik des gesamten Gleises zu vernachlässigen ist. Im Falle einer B70-Schwelle im Gleisrost konnten trotz der Fixierung durch die Schienenbefestigung und die Schotter-

bettung die ersten vier Eigenschwingungsmoden beobachtet werden. Der Rad/Schiene-Kontakt erzeugt ein breitbandiges Anregungsspektrum [6]. Prinzipiell können daher die Eigenschwingungsformen auch im Betriebsgleis angeregt werden. Die Frequenzen der ersten vier Eigenschwingungen sind bei einer Betonschwelle im Gleisrost höher als bei einer weich gelagerten Einzelschwelle gleichen Typs. ■

QUELLEN

[1] Plenge, M.; Lammering, R.: The Dynamics of Railway Track and Subgrade with Respect to Deteriorated Sleeper Support, in: Popp, K.; Schiehlen, W., System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade, Springer-Verlag 2003, S. 295–314
 [2] Zhang, J.; Mack, J.; Freudenstein, S.: Modularer Workflow zur Modellierung der Dynamik von Oberbausystemen und dessen Validierung, ZEVrail 4/2018, S. 132–137
 [3] Sohr, S.; Hecht, M.; Lechner, B.; Gwenael, H.; Zemp, A.; Wunderli, J.M.: Entwicklung eines Simulationstools zur Auslegung lärmarmer Gleiskonstruktionen, ZEVrail 10/2018, S. 400–409
 [4] Freudenstein, S.; Geisler, K.; Mack, J.; Koller, G.: FFU Kunstholzschnellen: Messung Querverschiebewiderstand im Schotteroberbau, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 5/2017, S. 46–50
 [5] Niemz, P.: Einfluss der Holzfeuchte auf E-Modul und Biegefestigkeit ausgewählter heimischer Holzarten, HOB Die Holzbearbeitung 11/2014, S. 65–67
 [6] Steger, M.: Optimierung des dynamischen Verhaltens von Schienenbefestigungen, EI – DER EISENBANINGENIEUR 06/2016, S. 25–29

Danksagung

Der Firma Sekisui wird für die Bereitstellung einer FFU-Kunstholzschnelle gedankt. Ebenso gilt unser Dank den Schweizerischen Bundesbahnen SBB CFF FFS und den Österreichischen Bundesbahnen ÖBB für die Finanzierung des Projektes, in dessen Rahmen diese Arbeiten durchgeführt werden konnten.

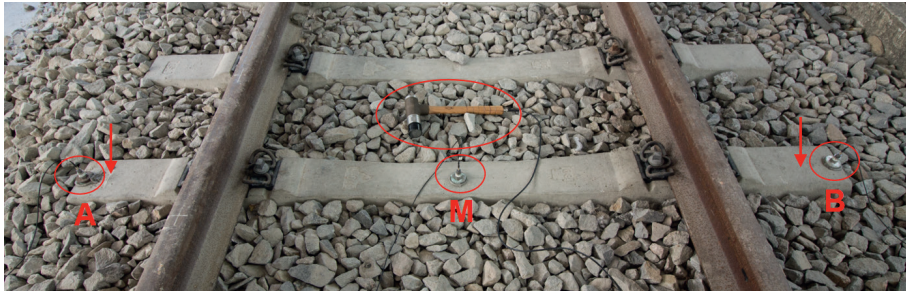


Abb. 6: Versuchsaufbau zur experimentellen Eigenschwingungsanalyse einer Schwelle im Versuchsgleis des Prüfamtes für Verkehrswegebau der TUM. Positionen der Schwingungsaufnehmer: A, M und B; Anschlagpunkte mit dem Impulshammer: neben A und B (Kennzeichnung mit Pfeil)

Quelle: TUM, J. Mack

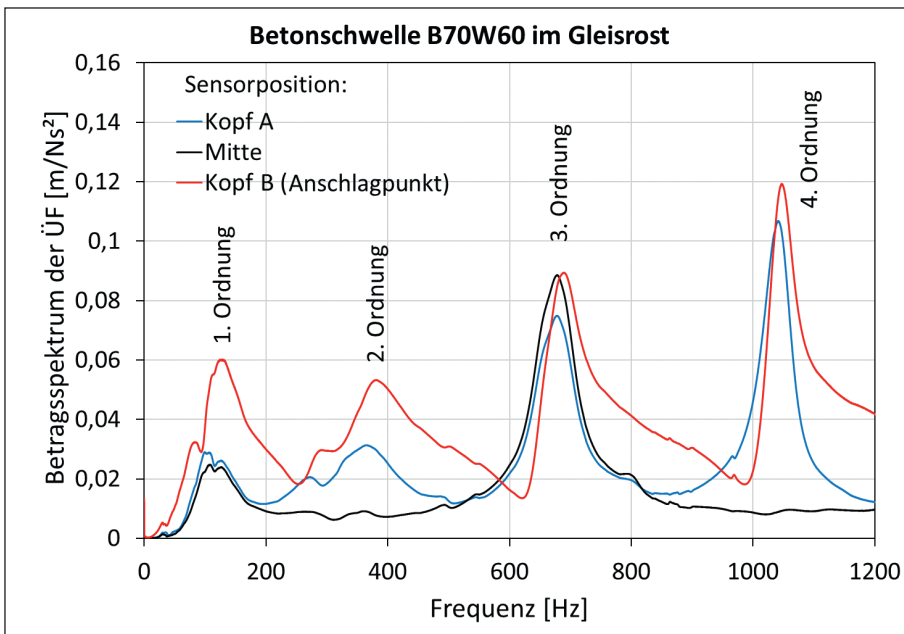


Abb. 7: Betragsspektrum der Übertragungsfunktion (ÜF) einer B70W60 Schwelle im Gleisrost mit Schienenbefestigung W14 Zw 700. Die Schwelle wurde mit dem Impulshammer am Schwellenkopf B angeschlagen.

Quelle: TUM, J. Mack

Schwellentyp	Einbauzustand	Frequenz [Hz] der Schwingungsmode			
		1	2	3	4
B70W54	Einzelschwelle auf weicher Lagerung	111,4	326,3	623,3	982,9
B70W60	Schwelle im Gleisrost (Schienenbefestigung W14 Zw700)	128,0	374,3	669,8	1046,0
Änderung [%]		14,9	14,7	7,5	6,4

Tab. 4: Gegenüberstellung der Eigenfrequenzen einer B70-Einzelschwelle und einer B70-Schwelle im Gleisrost mit Schotterbettung

Quelle: TUM, J. Mack



Dipl.-Phys. Johannes Mack
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
 Lehrstuhl und Prüfamnt
 für Verkehrswegebau
 Technische Universität München
 johannes.mack@tum.de



Dr.-Ing Walter Stahl
 Akademischer Direktor
 Lehrstuhl und Prüfamnt
 für Verkehrswegebau
 Technische Universität München
 walter.stahl@tum.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
 Ordinarius und Direktor des Prüfamtes
 Lehrstuhl und Prüfamnt
 für Verkehrswegebau
 Technische Universität München
 stephan.freudenstein@tum.de

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Technische Universität München /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DW Media Group, 2019