

Schwingungsdämpfende Wirkung von Gussasphaltbelag bei Holzbrücken

Sandy Schubert, René Steiger, Glauco Feltrin

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf (CH)

Daniel Gsell

Walt + Galmarini AG, Zürich (CH)

Zusammenfassung: Dieser Beitrag berichtet über dynamische Untersuchungen an einer Schrägseilbrücke mit Holzplattendeck und einer Hauptspannweite von 15.6 m. Das Ziel war den Einfluss des Gussasphaltbelages auf die modalen Dämpfungen und die Resonanzfrequenzen zu charakterisieren. Mit Hilfe von Finite-Elemente Simulationen wurde auch die während der Messungen wirkende Schubkraftinteraktion zwischen Asphaltbelag und Holzplatte, sowie das Verhalten des Asphaltbelags bei niedrigen (-5°) und hohen (+40°) Temperaturen untersucht. Die Versuche und Vergleiche mit den Simulationen zeigten, dass es bei Raumtemperatur zur Schubkraftübertragung zwischen Asphalt und Holzplatte kommt und der Asphalt somit bei den dynamischen Tests zur Steifigkeit der Brückenplatte beiträgt und die modale Dämpfung deutlich erhöht. Ausserdem wurde festgestellt, dass der Einfluss der Temperatur auf die Messung von Resonanzfrequenzen und Dämpfungen bei relativ leichten Brückenkonstruktionen mit Asphaltbelag, nicht vernachlässigt werden kann.

1 Einführung

Am letztjährigen Symposium wurden Schwingungsmessungen an einer bestehenden Holzbrücke vorgestellt [1]. An dieser Brücke wurde bereits festgestellt, dass durch den Asphaltbelag die Dämpfung der Brücke erhöht wird. Der Entwurf von weitgespannten Fussgängerbrücken aus Holz ist vor allem durch die Gebrauchstauglichkeitskriterien zu denen die Schwingungsamplituden gehören und nicht durch die Tragsicherheitskriterien bestimmt. Bei der Berechnung der Schwingungsamplituden in der Entwurfsphase wird auf z.B. auf die DIN 1074 [2] zurückgegriffen und für eine Resonanzfrequenz von $0 < f_{vert} \leq 5\text{Hz}$ wird die vertikale Beschleunigung der Brücke berechnet mit $a_{vert,1} = 200/(M \cdot \zeta) \cdot k_{vert}$ mit M der Gesamtmasse der Brücke, k_{vert} einem frequenzabhängigen Beiwert und ζ dem Dämpfungsgrad. Sofern keine anderen Werte nachgewiesen wurden, soll der

Dämpfungsgrad angenommen werden mit $\zeta = 1\%$ bzw. $\zeta = 1.5\%$ für Haupttragwerke ohne bzw. mit mechanischen Verbindungen. Der Einfluss des Asphaltbelags bleibt auf Grund fehlender Erfahrung unberücksichtigt.

In diesem von den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung geförderten Projekt wurde der Einfluss des Asphaltbelags auf die Dämpfungseigenschaften und die Steifigkeit der Brücke an einer Schrägseilbrücke im Labor überprüft [3]. Da die Messmethode einen Einfluss auf die gemessene Dämpfung haben kann, wurden Messungen mit drei unterschiedliche Anregungen durchgeführt:

- Weisses Rauschen
- Frequenzschrittverfahren
- Ausschwingversuch

Das viskoelastische Verhalten des Asphaltbelages ist stark temperatur- und frequenzabhängig, deshalb wurde der Schubmodul des verwendeten Asphalt bei Temperaturen zwischen -5° und $+40^\circ\text{C}$ sowie 1-8 Hz gemessen. Die mögliche Auswirkung dieser Temperaturabhängigkeit auf die Dämpfungseigenschaften wurde mit Hilfe eines Finite-Elemente Modells simuliert.

2 Laborbrücke und Holzplattendeck

Die Schrägseilbrücke im Labor der Empa wurde bereits für andere Untersuchungen genutzt. Die Brücke hat eine Gesamtlänge von 19.2 m und eine Breite von 1.6 m. (Abb. 1). In diesem Projekt wurde das ursprüngliche Brückendeck aus GFK durch zwei unterschiedliche Holzplattendecks ersetzt: (1) Brückendeck aus zwei 9.6 m langen Massivholzplatten, (2) Brückendeck aus zwei vorgespannten 9.6 m langen Brettschichtholzplatten.



Abb. 1: Gesamtansicht der Laborbrücke (mit GFK Brückendeck)

Massivholzplatten (MHP, s. Abb. 2 links) bestehen aus mehreren kreuzweise miteinander verklebten Lagen von Nadelholz und haben in der letzten Zeit sowohl in der Schweiz als auch international an Bedeutung gewonnen [4]. Durch die kreuzweise Verklebung der Lagen entsteht ein Holzwerkstoff, der gegenüber dem Rohmaterial deutlich homogenere mechanische Eigenschaften besitzt. Bei entsprechender Qualitätssicherung lässt sich aus Schnittholz normaler Güte eine Holzplatte herstellen, die geringere Streuung als das Ausgangsmaterial aufweist.

Als Brettschichtholz (BSH, s. Abb. 2 rechts) bezeichnet man hochkant gestellte, sägeraue oder gehobelte Bretter. Für die Schubübertragung in Querrichtung werden die Bretter vorgespannt und zum Teil zusätzlich verklebt. Die Vorspannung bewirkt trotz geringer Steifigkeit des Holzes senkrecht zur Faser eine gute Plattentragwirkung. In diesem Projekt wurden zuvor verklebte Bretter als Brettschichtholzplatte verwendet. Die Quervorspannung hat dann die Aufgabe, die Risse infolge von Querbiegemomenten im Gebrauchszustand zu verhindern. Zur Einleitung der Vorspannkräfte in die Platte wurden Randglieder aus Hartholz (Eiche) verwendet. In der Schweiz wurden die quervorgespannten Platten unter der Bezeichnung "QS-Platten" ([5], [6]) bekannt und sind erfolgreich in diversen Brücken (z.B. Selgis-Brücke Muotathal) eingesetzt worden.

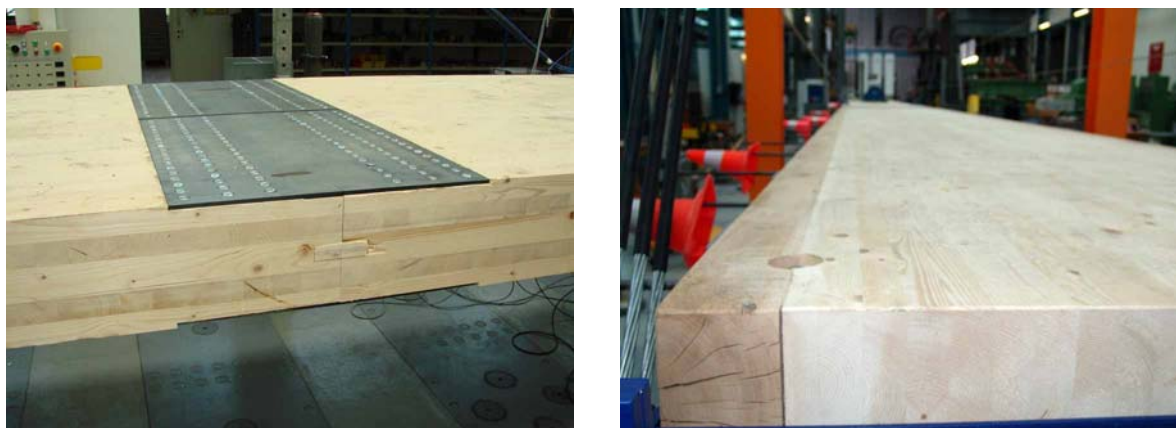


Abb. 2: Links: Stoss der Massivholzplatten mit Stahlblechverbindung. Rechts: Brettschichtholzplatte mit Eichenbalken aussen zur Einleitung der Quervorspannung.

Für die Bemessung von Holzbrücken werden die mechanischen Eigenschaften in der Regel aus den Kennwerten des Ausgangsmaterials berechnet. Zur Überprüfung der gemessenen Resonanzfrequenzen der Holzbrücken mit einem Finite-Elemente Modell ist es sinnvoll die orthotropen Eigenschaften der Holzplatten zuvor zu bestimmen und nicht nur zu berechnen. Zur Bestimmung der homogenisierten Eigenschaften bietet sich die experimentelle und theoretische Modalanalyse an. Mit dieser Methode konnten fünf der neun elastischen Konstanten der Platten (MHP 1 und MHP 2: $9.6 \times 1.6 \times 0.22 \text{ m}^3$, BSH 1 und BSH 2: $9.6 \times 1.6 \times 0.2 \text{ m}^3$) im Bereich von 10 – 300 Hz bestimmt werden. Die Anwendung der Modalanalyse auf Holzplatten ist in Gsell ([7] in Englisch) oder Gülzow ([8] in Deutsch) bereits

ausführlich beschrieben worden. Die Ergebnisse für die verwendeten Platten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Material Eigenschaften der Holzplatten: Dichte und elastische Konstanten

	ρ kg/m ³	E_{11} N/mm ²	E_{22} N/mm ²	E_{33} N/mm ²	G_{23} N/mm ²	G_{13} N/mm ²	G_{12} N/mm ²	ν_{23} -	ν_{13} -	ν_{12} -
MHP1	442	9550	2473	500 ^{*1}	710	318	309	0.2 ^{*1}	0.12 ^{*1}	0.01 ^{*1}
MHP2	454	9912	2903	500 ^{*1}	729	336	218	0.2 ^{*1}	0.12 ^{*1}	0.01 ^{*1}
BSH1	503	12246	244	500 ^{*1}	84	304	570	0.3 ^{*1}	0.02 ^{*1}	0.02 ^{*1}
BSH2	505	12134	269	500 ^{*1}	77	343	590	0.3 ^{*1}	0.02 ^{*1}	0.02 ^{*1}

^{*1} Diese Konstanten konnten nicht mit Hilfe der Modalen Analyse ermittelt werden, deshalb werden Literaturwerte verwendet.

Beim Einbau der zwei Massivholz- bzw. Brettschichtholzplatten wurden diese mit zwei Stahlplatten verbunden, um das Brückendeck zu realisieren (Abb. 2 links). Die Hauptspannweite der Brücke von 15.6 m wurde im Abstand von 8.2 m vom Pylon durch ein Schrägkabel unterstützt (Abb. 3).

3 Resonanzfrequenzen und Dämpfung

3.1 Versuchsaufbau

Die Resonanzfrequenzen und die Dämpfung wurden an der Schrägkabelbrücke für die folgenden Brückendeckvarianten durchgeführt:

- Massivholzplatte (MHP ohne)
- Massivholzplatte mit Gussasphalt (MHP mit)
- Vorgespannte Brettschichtholzplatte (BSH ohne)
- Vorgespannte Brettschichtholzplatte mit Gussasphalt (BSH mit)

Abb. 3 zeigt die Brücke mit den Positionen der Beschleunigungssensoren. Für die Messung der Brückendeckbeschleunigungen (3 - 8) und der Pylonbeschleunigungen (1 - 2) wurden Sensoren des Typs PCB 393A03 verwendet. Die Beschleunigungssensoren besitzen Magnetfüsse und können so auf einfache Weise auf dem Stahlpylon befestigt werden. Auf der Unterseite des Brückendecks wurde an der Position der Sensoren eine runde Stahlplatte mit Durchmesser ca. 6 cm geschraubt, worauf der Sensor mit Hilfe des Magnetes angebracht wurde. Auf den beiden Schrägseilen (Front- und Rückkabel) wurden je zwei Beschleunigungssensoren (11-14) des Typs PCB 3701G3FA3G montiert, sodass beide Richtungen senkrecht zum Kabel erfasst werden konnten. Es wurden bewusst Sensoren geringen Gewichtes gewählt, damit deren Einfluss auf die Kabelschwingung vernachlässigbar war.

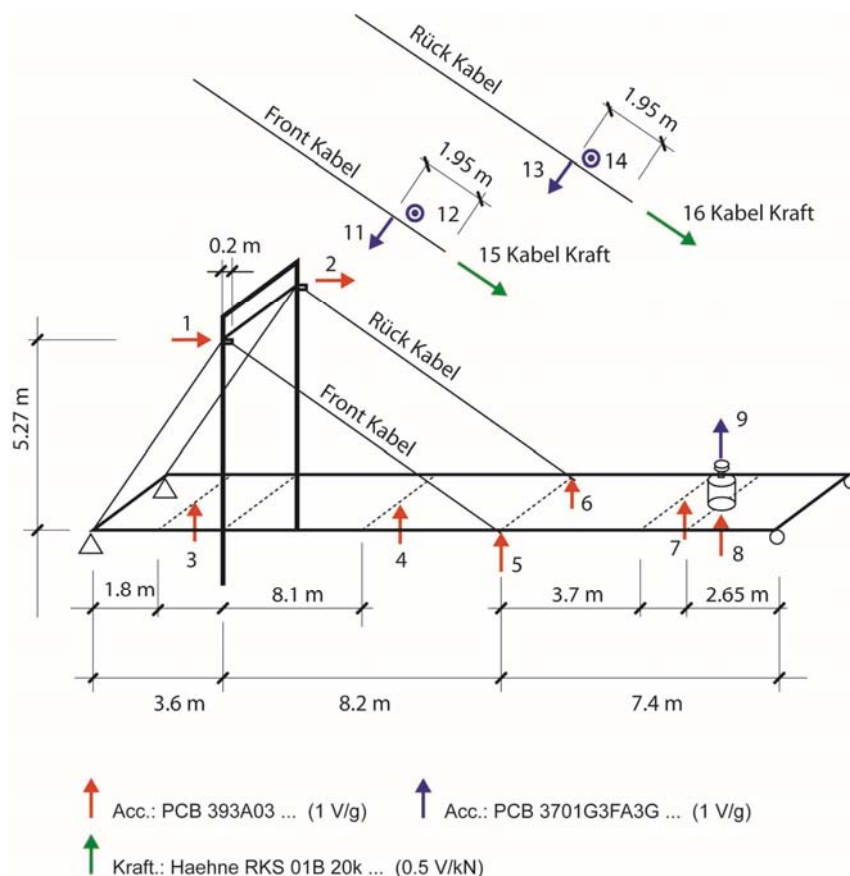


Abb. 3: Abmessungen der Brücke, Positionen der Sensoren und des Shakers

Abb. 4 zeigt die mit Sensoren und Kraftmessdosen bestückte Brücke in der Bauhalle der Empa. Die verwendeten Kraftmessdosen (Haehne RKS 01B 20k) stammen von der ursprünglichen Kunststoffbrücke und sind nur anwendbar bis zu einem Kraftbereich von 20 kN. Die Kraftmessdosen können deshalb nur für die Konfiguration ohne Gussasphalt verwendet werden, um die Vorspannung der beiden Kabel zu überprüfen. Die Kraftsensoren werden mit dem Messsystem MGCPPlus von HBM gespiesen. Zur Bestimmung der Kabelkräfte bei den Brücken mit Gussasphalt wurden die gemessenen Eigenfrequenzen des Kabels verwendet.

Die Brücke wurde mit einem elektrodynamischen Schwingungserreger (TIRA 50301/LS) angeregt (Abb. 5). Die bewegliche Masse des Systems beträgt 30 kg. Der Schwingungserreger, beziehungsweise der Leistungsverstärker, wird mit einem extern generierten Spannungssignal in die gewünschte Vibration versetzt. Dazu wurde entweder ein Funktionsgenerator (Agilent 33120A) oder das Datenerfassungssystem OROS OR38 verwendet. Um die Kraft mit der die Brücke angeregt wird zu bestimmen, wurde die relative Beschleunigung zwischen der beweglichen Schwingermasse und dem Brückendeck gemessen. Dazu war es notwendig, einen Beschleunigungssensor unter dem Schwingungserreger und einen zweiten Sensor auf der Schwingermasse anzubringen.



Abb. 4: Links: Mit Sensoren und Schwingungserreger bestückte asphaltierte Brücke in der Bauhalle der Empa. Mitte oben: Sensor PCB 393A03 zur Messung der Brückendeck Beschleunigungen. Rechts oben: Messung der horizontalen und vertikalen Kabelschwingungen mit PCB 3701G3FA3G Beschleunigungssensoren. Mitte unten: Verankerung des Schrägseiles mit Kraftmessdose. Rechts unten: Verwendete Sensoren bei der Kabelverankerung.

Zur Digitalisierung und Aufzeichnung der Daten wurde das Datenerfassungssystem OROS OR38 verwendet. Dieses Datenerfassungssystem ist wegen der verfügbaren 32 Kanäle mit integrierter ICP-Speisung für die Beschleunigungssensoren und Antialiasing-Filtern sehr gut geeignet für dynamische Messungen. Das System wandelt die analogen Sensorsignale mit 24 Bit Speichertiefe in digitale Daten um. Es wurde eine Abtastfrequenz von 256 Hz verwendet.

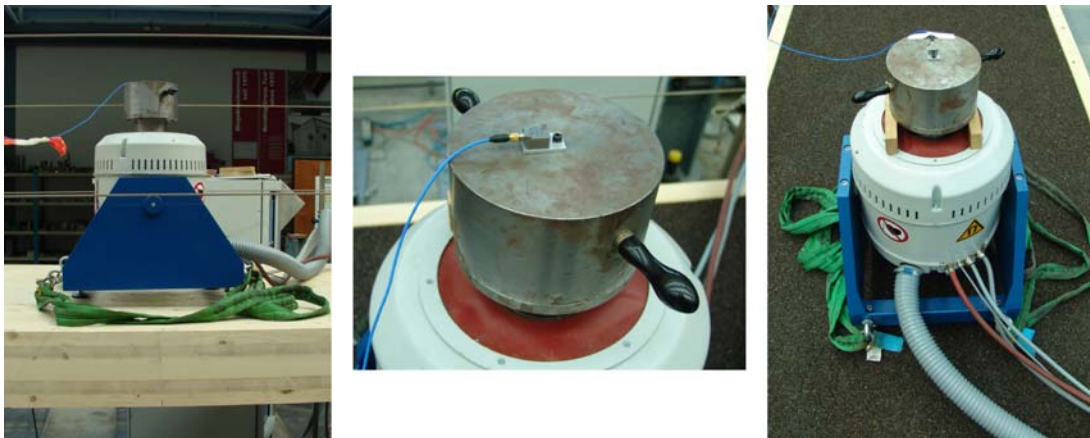


Abb. 5: Elektrodynamischer Schwingungserreger. In der Mitte ist der PCB Beschleunigungssensor abgebildet, welcher auf der beweglichen Schwinger Masse montiert wurde.

Um die Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Dämpfungseigenschaften zu bestimmen, wird das Verhalten bei unterschiedlicher Anregung untersucht. Messungen mit den folgenden Anregungen wurden durchgeführt:

- **Weisses Rauschen:**
In einem vorgegebenen Frequenzbereich wird mit OROS OR38 ein Rauschsignal produziert, mit welchem der Schwingungserreger gespiesen wird.
- **Frequenzschrittverfahren:**
Ein bestimmtes Frequenzintervalls wird in diskreten Frequenzschritten abgefahren.
- **Ausschwingversuch:**
Die Brücke wird in einer Resonanzfrequenz angeregt bis die Schwingung stationär ist. Dann wird die Anregung ausgeschaltet.

Es wurden aus allen Messungen soweit möglich, die erste und zweite Eigenfrequenz und das dazugehörige Dämpfungsmass bestimmt. Die beiden ersten Eigenfrequenzen waren im Resonanzspektrum dominant (s. auch Abb. 6) und deshalb wurde die Auswertung auf diese beiden Frequenzen beschränkt.

3.2 Signalverarbeitung

3.2.1 Weisses Rauschen

Mit dem Datenerfassungssystem OROS OR38 wurde ein weisses Rauschen im Frequenzband 2.5 Hz bis 20 Hz erzeugt. Die Daten wurden während 300 Sekunden aufgezeichnet. Der Prozess der Signalverarbeitung ist in Abb. 6 dargestellt.

Mit Hilfe der Fast Fourier Transformation (FFT) und Mittelung nach P.D. Welch [9], wurde für jedes Beschleunigungssignal die Übertragungsfunktion bestimmt. Die Übertragungsfunktion charakterisiert die Reaktion der untersuchten Struktur im Frequenzbereich auf eine Impulsanregung. Die Übertragungsfunktion wird ermittelt in dem man die FFT der Reaktion der Struktur, hier die gemessenen Beschleunigungen, dividiert durch die FFT der Anregung, hier die Relativbeschleunigung der Schwingermasse. Diese Übertragungsfunktionen, eine von jedem Beschleunigungssensor, werden mit der inversen FFT zurück in den Zeitbereich transformiert, wodurch man die Impulsantwort des Systems erhält. Das ist die dynamische Reaktion der Brücke auf einen normierten, ideal kurzen Schlag am Orte des Schwingungserregers. Bei dieser Impulsantwort handelt es sich um eine Funktion, die durch die Überlagerung von mehreren Sinusschwingungen beschrieben werden kann. Daher wird diese wiederum mit dem Verfahren nach Y.Y. Lin [10], einem Matrixpencil-Verfahren, analysiert. Eigenfrequenzen und

Dämpfungsgrad resultieren aus dieser Analyse. Zur Überprüfung der zuvor bestimmten Parameter, Eigenfrequenzen und zugehörige Dämpfung, rekonstruiert man mit diesen das Ausgangssignal und vergleicht es mit dem Original.

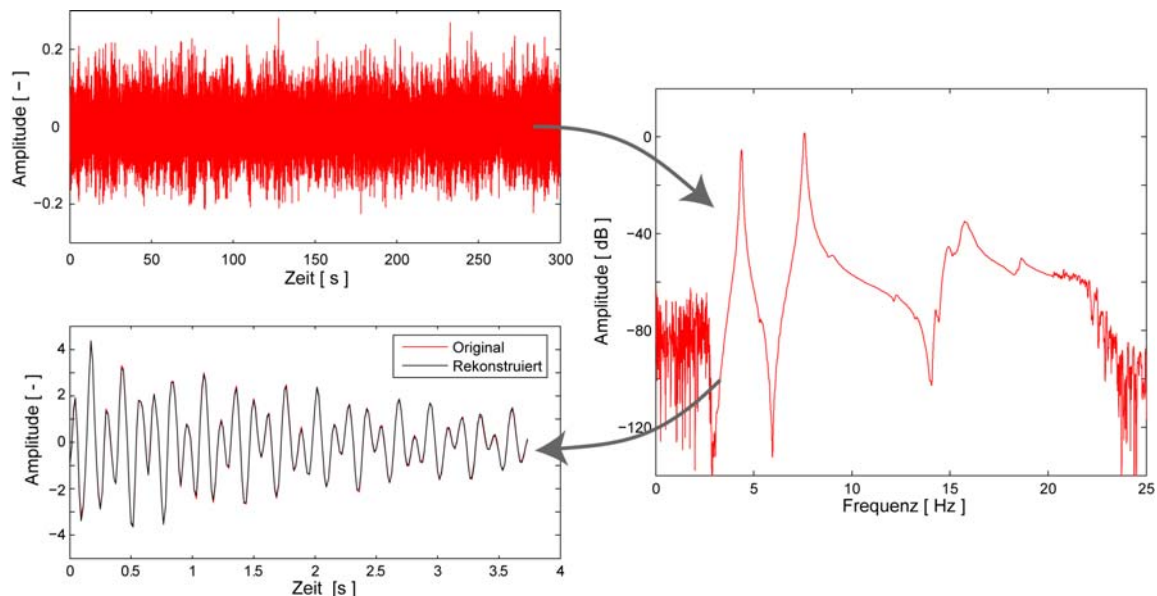


Abb. 6: Prozess der Signalverarbeitung: Aus dem gemessenen ‚Rauschen‘ (links oben) wird die Übertragungsfunktion (rechts) bestimmt. Durch die Rücktransformation erhält man die Impulsantwort des Systems. Unten links: gemessene und rekonstruierte Impulsantwort des Sensors 7 im Falle MHP ohne Gussasphalt.

Die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Dämpfungsgrade wurden jeweils für 5 unabhängige Messdatensätze für die Sensoren 4 bis 8 bestimmt. In Tabelle 2 sind die Mittelwerte dargestellt. Die Standardabweichungen betragen bei den Frequenzen 0.06 – 0.56 % und bei den Dämpfungsgraden 3.36 – 5.75 %. Im Falle der MHP Brücke konnte mit Gussasphaltbelag die zweite Eigenschwingungsform nicht ermittelt werden.

3.2.2 Frequenzschrittverfahren

Um einzelne Schwingungsmoden, insbesondere die erste Biegeschwingung, genauer zu untersuchen, wurde diese in der Umgebung der Resonanzfrequenz gezielt durch harmonische Anregungssignale mit einer bestimmten Frequenz angeregt. Die Anregungsenergie wurde somit auf eine Frequenz konzentriert und deshalb wurden deutlich höhere Schwingungsamplituden erreicht.

Abb. 7 links zeigt die Amplitudengänge für die BSH-Platten-Brücke mit und ohne Gussasphalt bei unterschiedlichen Anregungsamplituden (0.4 V und 1.2 V). Der Einfluss des Gussasphaltes auf Resonanzfrequenz und Dämpfung ist bei beiden Anregungsamplituden deutlich sichtbar: (1) Die Resonanzfrequenz sinkt infolge der

Zusatzmasse. Dies bedeutet, dass die zusätzliche Biegesteifigkeit, welche durch den Gussasphalt bedingt ist, diesen Masseneffekt nicht kompensiert. (2) Die Dämpfung nimmt zu. Dies zeigt sich dadurch, dass die Amplitudenkurven mit Gussasphalt breiter sind. Beim Vergleich der Amplitudengänge der beiden Anregungsamplituden kann sowohl mit und ohne Gussasphalt ein weiterer Effekt beobachtet werden: Die Resonanzfrequenzen sinken bei zunehmender Amplitude etwas und die Peaks der 1.2 V-Amplitudengänge neigen sich nach links. Dies ist die Folge eines nicht-linearen Effektes: die Steifigkeit der Struktur nimmt mit zunehmender Schwingungsamplitude ab. Diese nichtlinearen Amplitudengänge können nicht mehr mit der linearen Einmassenschwinger-Analogie interpretiert werden. Somit beschränkt sich die Bestimmung der Eigenfrequenzen und Dämpfungen in Tabelle 2 auf die Fälle mit kleiner Amplitude.

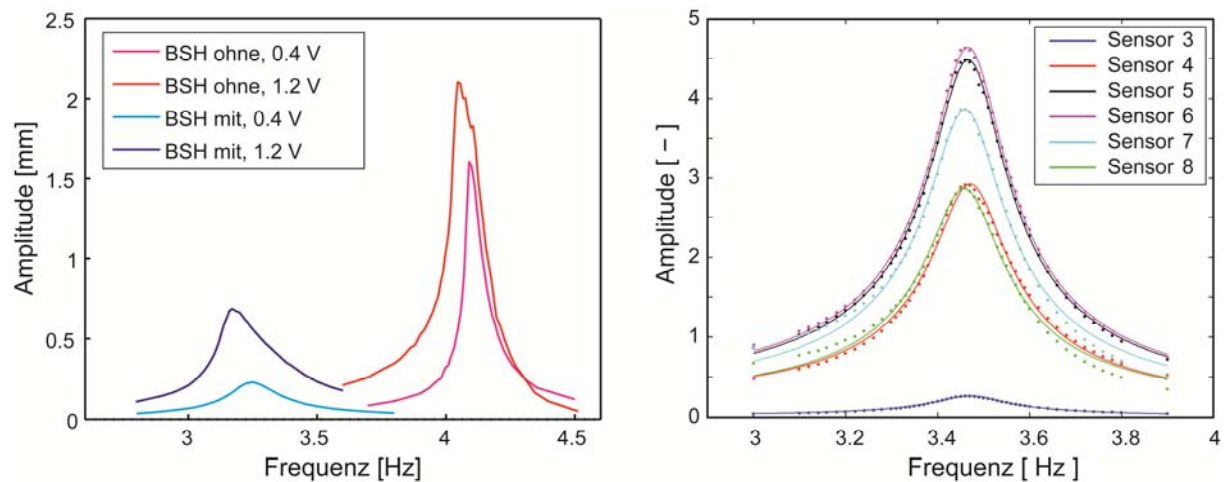


Abb. 7: Links: Gemessene Amplituden der BSH-Brücke mit und ohne Gussasphalt bei unterschiedlichen Anregungsamplituden. Rechts: Gemessener Amplitudengang, normiert mit der Relativbeschleunigung der Schwingermasse, im Falle MHP mit Gussasphalt. Die Punkte bezeichnen die gemessenen Amplituden bei den entsprechenden Anregungsfrequenzen, während die ausgezogenen Linien die gefitteten Daten zeigen.

Um aus den gemessenen Amplitudengängen (Aufzeichnung der Amplituden über die Frequenz), wie in Abb. 7 rechts darstellt, die Resonanzfrequenz und den Dämpfungsgrad der Brücke zu erhalten, wurden die Messwerte mit einem Modell gefittet. Als Modell wurde ein gedämpfter Einmassenschwinger verwendet. Ein gedämpfter Einmassenschwinger ist hinreichend genau, solange die zu untersuchende Struktur sich linear verhält und sich in unmittelbarer Nähe zur betrachteten Resonanzfrequenz keine weitere befindet. Dann kann nach [11] der Amplitudenverlauf $a(f)$ beschrieben werden als:

$$a(f) = \frac{a_0}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 - \left(2 \cdot \zeta \cdot \frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

Wobei f die Anregungsfrequenz, f_0 die Resonanzfrequenz, ζ der Dämpfungsgrad, a die Amplitude und a_0 die hypothetische statische Auslenkung ist. Die Funktion wurde mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate auf die Messdaten gefittet. Dieser in MatlabTM programmierte Algorithmus, minimiert durch systematisches Anpassen der Resonanzfrequenz, des Dämpfungsgrades und der statischen Auslenkung die Fehlerquadrate zwischen der Funktion $a(f)$ und den erfassten Messdaten. Die gefitteten Kurven für den Fall MHP Brücke mit Gussasphaltbelag sind in Abb. 7 rechts dargestellt.

Zur Überprüfung der gefundenen Daten, wurde aus den gemessenen Signalen bei den verschiedenen Frequenzen die Phasenkurve ermittelt. In Abb. 8 sind diese für die Sensoren 3 bis 8, im Falle der Massivholzplatte mit Gussasphalt, dargestellt. Die Punkte entsprechen den Messpunkten, während die ausgezogenen Linien theoretisch ermittelt wurden. Dazu wurden die mit dem Amplitudengang gefitteten Frequenzen und Dämpfungen in die Gleichung für den Phasengang $\varphi(f)$ eingesetzt.

$$\varphi(f) = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \zeta \cdot f / f_0}{1 - (f / f_0)^2} \right) + \varphi_0$$

Die Übereinstimmung des gemessenen und des berechneten Phasenganges kann als sehr gut bezeichnet werden. Dies ist ein deutlicher Hinweis für die gute Schätzung der Dämpfung und der Eigenfrequenz. Anschliessend wurden auch die gemessenen Phasengänge gefittet. Die ermittelten Frequenzen und Dämpfungen sind in Tabelle 2 angegeben.

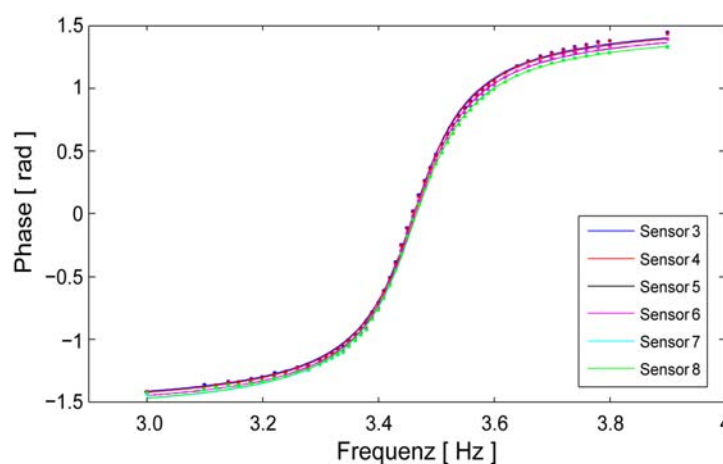


Abb. 8: Gemessene (Punkte) und berechnete (Linien) Phasengänge der ersten Eigenschwingung im Falle der MHP-Brücke.

3.2.3 Ausklingversuche

An den Brückenvarianten MHP mit und BSH mit und ohne Gussasphaltbelag, wurden sogenannte Ausklingversuche durchgeführt. Dabei wurde die Brücke in ihrer ersten beziehungsweise zweiten Resonanzfrequenz angeregt. Die Anregung wurde

solange aufrecht erhalten, bis die Schwingung stationär war. Anschliessend wurde die Anregung ausgeschaltet und die jetzt freie, gedämpfte Schwingung der Platte beobachtet. Ein typisches Messsignal ist in Abb. 9 dargestellt. Zur Auswertung dieser Signale wurde nur der Teil betrachtet, bei welchem keine Anregung mehr vorhanden war. Es wurde wiederum mit dem Algorithmus von Y.Y. Lin [10] ausgewertet.

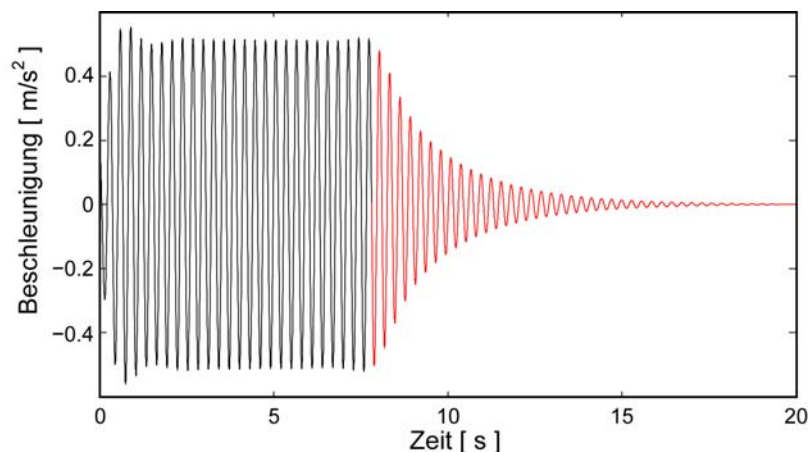


Abb. 9: Gemessene Abklingkurve am Sensor 6. Der rote Teil des Signals wurde für die Auswertung verwendet.

3.3 Resultate der Messungen

In Tabelle 2 sind die Frequenzen und Dämpfungen der Brückenvarianten zusammengefasst. Die Frequenz der Brücke sinkt mit dem Aufbringen des Asphalts. Die Dämpfung nimmt mit dem Asphalt deutlich zu. Die Frequenzen, die durch die Auswertung der verschiedenen Methoden ermittelt wurden, unterscheiden sich kaum. Im Gegensatz dazu ist der beim Weissen Rauschen ermittelte Dämpfungsgrad deutlich höher als bei den anderen beiden Methoden. Im Allgemeinen ist die Dämpfung grösser je höher die Amplitude ist. Die aus dem Weissen Rauschen ermittelte Dämpfung ist allerdings grösser auch wenn die maximale Anregungsamplitude kleiner oder gleich der Amplituden der beiden Anregungen ist. Die Unterschiede können deshalb nicht auf die Amplitudenabhängigkeit der Dämpfung zurückgeführt werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit einer Rauschanregung zwar die Frequenz aber nicht die Dämpfung zuverlässig bestimmt werden kann.

Tabelle 2: Gemessene Frequenzen und Dämpfungen der ersten zwei Schwingungsmoden der Brücke

		Method	MHP ohne	MHP mit	BSH ohne	BSH mit	Einheit
Frequenz	1. Mode	Weisses Rauschen	4.363	3.404	4.124	3.229	Hz
		Monof. Anr. / Amplitude	4.336	3.47	4.104	3.252	Hz
		Monof. Anr. / Phase	4.325	3.46	4.091	3.248	Hz
		Ausklingen 0.4 V	-	3.466	4.119	3.222	Hz
Dämpfungs-grad	1. Mode	Weisses Rauschen	0.66	3.2	0.79	3.04	%
		Monof. Anr. / Amplitude	0.58	2.28	0.53	2.549	%
		Monof. Anr. / Phase	0.42	2.17	0.41	2.473	%
		Ausklingen 0.4 V	-	2.18	0.5	2.553	%
Frequenz	2. Mode	Weisses Rauschen	7.568	-	6.905	6.173	Hz
		Monof. Anr. / Amplitude	7.502	-	6.859	6.259	Hz
		Monof. Anr. / Phase	7.492	-	6.852	6.238	Hz
		Ausklingen 0.4 V	-	-	6.898	6.147	Hz
Dämpfungs-grad	2. Mode	Weisses Rauschen	0.72	-	0.82	5.97	%
		Monof. Anr. / Amplitude	0.94	-	0.81	5.444	%
		Monof. Anr. / Phase	0.74	-	0.72	5.777	%
		Ausklingen 0.4 V	-	-	0.7	5.707	%

4 Einfluss des Asphaltbelags

Aus den Messergebnissen ist ersichtlich, dass der Asphaltbelag bei Raumtemperatur einen deutlichen Einfluss auf die Dämpfung der Brücke hat (vier- bis fünfmal höher als ohne Asphalt). Allerdings ist weiterhin unklar, ob das viskoelastische Verhalten des Asphalts und / oder die Reibung zwischen Asphalt und Holz bzw. den Trennungsschichten die Ursache für diese Erhöhung der Dämpfung sind.

Für die Bemessung des Schwingungsverhaltens von Fussgängerbrücken aus Holz mit Asphaltbelag ist es zudem wichtig ob der Asphalt auch im Winter und im Sommer diesen positiven Einfluss auf die Dämpfung besitzt.

Diese Fragestellungen werden nun zunächst mit Hilfe von Finite-Elemente Simulationen mit dem Programm Abaqus untersucht.

4.1 Finite-Elemente Modell

Der Asphaltbelag wurde von den Holzplatten durch eine Lage Glasvlies und eine Polymerbitumendichtungsbahn getrennt. Deshalb gab es keine mechanische Kraftübertragung zwischen Asphaltbelag und Holzplatten ausser der (Haft-)reibung. Vorgängig zu den dynamischen Tests an der Schrägseilbrücke wurden noch statische Tests an den einzelnen Holzplatten durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Asphalt auf der Holzplatte rutscht und somit bei den statischen Tests nicht zur Steifigkeit der Brückenplatte mit Asphaltbelag beiträgt.

Da nicht bekannt ist wie die mechanische Interaktion zwischen Asphalt und Holzplatten bei den dynamischen Test war, geht man von drei möglichen Annahmen

aus: (1) keine Schubkraftübertragung, (2) volle Schubkraftübertragung, (3) teilweise Schubkraftübertragung und Reibung. Mit den Finite-Elemente Simulationen werden im Folgenden die Annahmen (1) und (2) überprüft. Für die Modellierung der Brücke und die Berechnung der Resonanzfrequenzen und der Dämpfung ist die Verwendung der richtigen Materialeigenschaften von entscheidender Bedeutung. Die elastischen Konstanten der Holzplatten wurden, wie zuvor erwähnt, mit der Modalanalyse bestimmt (Tabelle 1). Die Dämpfung der Brücke wurde mit Hilfe der Rayleighfaktoren α und β implementiert. Der Dämpfungsgrad kann wie folgt durch die Rayleighfaktoren ausgedrückt werden:

$$D = \frac{\alpha}{4 \cdot \pi \cdot f_0} + \beta \cdot \pi \cdot f_0,$$

damit erhält man die Rayleighfaktoren:

$$\alpha = D \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0, \quad \beta = \frac{D}{2 \cdot \pi \cdot f_0}.$$

Das viskoelastische Verhalten des Asphalts kann durch einen komplexen frequenz- sowie temperaturabhängigen E- und Schubmodul beschrieben werden. Für die beiden im Projekt verwendeten Gussasphalte wurde mit dem koaxialen Schubtest [12] der komplexe Schubmodul

$$G^*(f, T) = G_s(f, T) + i \cdot G_l(f, T),$$

gemessen, wobei G_s auch Speichermodul und G_l Verlustmodul genannt wird. Beide Module G_s und G_l wurden in einem Frequenzbereich von 1 bis 8 Hz und einem Temperaturbereich von -10° bis $+40^\circ\text{C}$ bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen, die in den Simulationen verwendet wurden, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Da der E-Modul nicht bestimmt wurde, mussten für die Simulationen Annahmen über die Querdehnzahl getroffen werden: Es wurden die Querdehnzahlen $\nu = 0.2, 0.3$ bzw. 0.45 für $-5^\circ, +20^\circ$ bzw. $+40^\circ\text{C}$ gewählt (s. [13]). Damit wurde der E- und der Kompressionsmodul

$$E^* = 2 \cdot G^*(f, T) \cdot (1 + \nu(T)), \quad K^* = \frac{2 \cdot G^*(f, T) \cdot (1 + \nu(T))}{3 \cdot (1 + 2 \cdot \nu(T))};$$

für das Finite-Elemente Modell berechnet.

Die Holzplatten und der Asphalt wurden im Finite-Elemente Modell mit linearen 3D-Elementen modelliert. Um eine Schubversteifung des Modells zu verhindern, wurde die Methode der reduzierten Integration verwendet. Der Pylon der Brücke wurde als Balken modelliert und die Kabel zwischen Deck und Pylon als Federn mit der Steifigkeit $c = E \cdot A / l_c$, wobei A der Kabelquerschnitt und l_c die Länge des Kabels ist.

Tabelle 3: Messwerte für Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur, Annahmen für die Querdehnzahl

	Hz	Asphalt für MHP			Asphalt für BSH		
		-5°C	+20°C	+40°C	-5°C	+20°C	+40°C
G_s	1	20340	2325	156	18700	2293	141
	2	21760	2786	174	20110	2806	191
	3	22930	3236	203	20820	3180	241
	4	23950	3474	229	21510	3481	277
	6	24410	4037	286	22240	4000	346
	8	25300	4486	321	22860	4382	401
G_l	1	2606	1455	187	1918	1466	196
	2	1964	1696	229	2003	1650	272
	3	2138	1852	270	1828	1752	332
	4	2095	1947	306	1771	1820	373
	6	2234	2104	375	1740	1906	446
	8	2517	2232	422	1612	1955	500
v		0.2	0.3	0.45	0.2	0.3	0.45

Aus den berechneten Amplitudengänge (welche schematisch so aussehen wie in Abb. 7) wurden wie beim Frequenzschrittverfahren durch das Fitten der Amplitudenkurven, die Resonanzfrequenz und der Dämpfungsgrad ermittelt.

4.2 Resultate und Diskussion

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Experimente denen der Simulationen gegenübergestellt (nur MHP). Die berechneten Resonanzfrequenzen für die Brücke ohne Asphalt stimmen gut mit den gemessenen überein (Fehler: 3%). Die Rayleighfaktoren führen zu einer Unterschätzung des Dämpfungsgrads der Brücke von -12%. Geht man von Annahme (1), des reibungsfreien Rutschens der Asphaltdecke auf der Holzplatte ohne Schubkraftübertragung aus, ist die berechnete Resonanzfrequenz 11% niedriger als die gemessene Frequenz und der Dämpfungsgrad wird sehr deutlich unterschätzt. Unter Annahme (2), der vollen Schubkraftübertragung, gab es sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Frequenzen (Fehler: 1%), der Dämpfungsgrad wird allerdings deutlich überschätzt.

Diese Vergleiche zeigen, dass bei Raumtemperatur der Asphalt bei dynamischer Belastung zur Steifigkeit der Brückenplatte beiträgt und die Dämpfung erhöht, weil es zumindest teilweise eine Schubkraftübertragung zwischen Asphalt und Holzplatte gibt. Da der Asphalt sehr temperaturabhängig ist, muss dieser positive Effekt für niedrige und hohe Temperaturen überprüft werden.

Tabelle 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Resonanzfrequenzen und Dämpfungen

Deckenplatte	Resonanzfrequenzen				Dämpfungsgrad			
	f_{exp} Hz	f_{cal}^{*1} Hz	f_{cal}^{*2} Hz	f_{cal}^{*3} Hz	D_{exp} %	D_{cal}^{*1} %	D_{cal}^{*2} %	D_{cal}^{*3} %
MHP ohne	4.34	4.47	-	-	0.58	0.32	-	-
MHP mit	3.47	-	3.1	3.51	2.28	-	0.2	4.45

*¹ nur MHP*² MHP / Asphaltbelag ohne Schubübertragung und ohne Reibung*³ MHP / Asphaltbelag mit Schubübertragung und ohne Reibung

Unter der Annahme (1) - keine Schubkraftübertragung – ist der Einfluss des Asphalts bei -5° bzw. $+40^\circ$ auf die Dämpfung und die Steifigkeit sehr gering. Im Gegensatz dazu hat der Asphalt bei Schubkraftübertragung sehr grossen Einfluss. Die erste Resonanzfrequenz war bei -5° um 18% höher als bei Raumtemperatur. Der Dämpfungsgrad war mit 0.9% deutlich niedriger als der bei Raumtemperatur. Dies ist durch die sehr hohe Steifigkeit des Asphaltes bei -5° und den entsprechend kleinen Dehnungen begründet. Bei hohen Temperaturen war die erste Resonanzfrequenz 10% niedriger als bei Raumtemperatur und der Dämpfungsgrad war mit 1.8%, ebenfalls deutlich kleiner als bei Raumtemperatur. Der Grund für diese deutlich niedrigere Dämpfung liegt vermutlich in dem bei $+40^\circ$ deutlich kleineren Verlustmodul.

Die Finite-Elemente Simulationen geben eine Idee welchen Einfluss der Asphalt bei hohen oder niedrigen Temperaturen hat. Wie gross dieser Einfluss aber tatsächlich ist soll noch dieses Jahr mit Messungen überprüft werden.

5 Schlussfolgerungen

- Bei Raumtemperatur kommt es bei den dynamischen Tests (im Gegensatz zu den statischen Tests) zur zumindest teilweisen Schubkraftübertragung zwischen Asphaltbelag und Holzplatte und somit trägt der Asphalt zur Steifigkeit des Brückendecks bei.
- Der Asphaltbelag hat bei Raumtemperatur einen positiven Effekt auf die Dämpfung (Erhöhung des Dämpfungsgrads).
- Unter der Annahme, dass es volle Schubkraftübertragung zwischen dem Asphalt und der Holzplatte gibt, hat der Asphaltbelag einen positiven Effekt
 - o bei niedrigen Temperaturen (-5°): deutliche Zunahme der Resonanzfrequenz gegenüber Frequenz der Brücke ohne Asphalt, weil der sehr steife Asphaltbelag die Steifigkeit der Brücke vergrössert (bei Resonanzfrequenzen > 8 Hz wird gemäss [14] kein Nachweis der Schwingungsamplituden für Fussgängerbrücken verlangt)

- bei hohen Temperaturen (+40°): deutliche Zunahme des Dämpfungsgrads gegenüber Brücke ohne Asphalt.
- Interaktion zwischen Holzplatte und Asphaltbelag sollte bei niedrigen und hohen Temperaturen durch dynamische Messungen verifiziert werden.
- Für die genauere Bestimmung von Dämpfungen sollte keine ambiente oder Rauschanregung verwendet werden.
- Der Einfluss der Temperatur auf die Messung von Resonanzfrequenzen und Dämpfungen ist für leichte Konstruktionen mit Asphaltbelag nicht vernachlässigbar.

Danksagung

Wir danken den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung und der Gebert Rütli Stiftung für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes. Ausserdem möchten wir Arne Gülzow für die Bestimmung der elastischen Eigenschaften der Holzplatten und Martin Hugener für die Bestimmung des komplexen Schubmoduls des Gussasphaltes unseren Dank aussprechen.

Literatur

- [1] Feltrin, G., Gülzow, A., Steiger, R. und Gsell, D. (2008) Dynamische Untersuchungen an einer Holzbrücke. 11. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, Ziegler Consultants, Dübendorf.
- [2] DIN 1074 (2006) Holzbrücken.
- [3] Gsell, D., Gülzow, A., Hugener, M., Pizio, S., Schubert, S. und Steiger, R. (2008) Schwingungsverhalten von seilverspannten Holzplattenbrücken für Fussgänger und Radfahrer. Empa Projekt 870'029.
- [4] Schickhofer G. (2002) Brettsperrholz: Anwendungen und Konstruktionsdetails im mehrgeschossigen Wohn- und Kommunalbau. In: Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage, Bruderverlag, Karlsruhe.
- [5] Pizio, S. (1989) Fahrbahnausbildung bei Holzbrücken. In: Brücken und Stege aus Holz 21. Fortbildungskurs der SAH, 8./9. November 1989, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Zürich.
- [6] Pizio, S. (1996) Spezielle Konstruktionsformen: Quervorgespannte Holzplatten (QS-Platten). In: Stahl im Holzbau. 10. Fortbildungskurs „Holzbau“. 19. September 1996. Empa und FH Rapperswil.

-
- [7] Gsell, D., Fetrin, G., Schubert, S., Steiger, R., Motavalli, M. (2007) Cross-Laminated timber plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties. In: Journal of Structural Engineering. 133: 132-138.
- [8] Gulzow, A., Gsell, D., Steiger, R. (2008) Zerstörungsfreie Bestimmung elastischer Eigenschaften quadratischer 3-schichtiger Brettsperrholzplatten mit symmetrischem Aufbau. In: Holz als Roh- und Werkstoff. 66: 19-37.
- [9] Welch, P. D. (1967) Use of Fast Fourier Transform for estimation of power spectra – a method based on time averaging over short modified periodograms. IEEE Trans. Audio Electroacoustics. AU-15 (2):70-73.
- [10] Lin, Y.Y., Hodgkinson, P. Ernst, M., Pines, A. (1997) A novel detection-estimation scheme for noisy NMR signals: Applications to delayed acquisition data. Journal of Magnetic Resonance. 128(1):30-41.
- [11] Sayir, M. B. (1997) Mechanik 3, Dynamik, ETHZ, Zürich.
- [12] Sokolov, K., Gubler, R., Partl, M.N. (2005) Extended numerical modeling and application of the coaxial shear test for asphalt pavements. Materials and Structures 38: 515-522.
- [13] Kim, Y.R., Seo, Y., King, M., Momen, M. (2004) Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1891: 163-173.
- [14] ISO 10137 (2007) Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkaways against vibrations.