

# **Abschlussbericht zum Forschungsprojekt**

Dämpfungsmessung an Stahlprofilen mit unterschiedlichen Füllstoffen

Durchgeführt im Auftrag der durcrete GmbH

Laufzeit des Vorhabens: 18.04.2016 – 31.05.2016

# Dämpfungsmessung an Stahlprofilen mit unterschiedlichen Füllstoffen

Bearbeitet von:

Dr.-Ing. Thomas Hipke

Telefon +49 (0)3 71 53 97-14 56

Dipl.-Ing. Frank Schneider

Telefon +49 (0)3 71 53 97-12 61



---

Dr.-Ing. T. Hipke  
Abteilungsleiter - Funktionsintegrierter Leichtbau

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz

Projektnummer:

121878

Kunde:

durcrete GmbH

Chemnitz, den 31. Mai 2016

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Zielstellung des Forschungsvorhabens</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Darstellung wissenschaftlich-technischer Ergebnisse</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Anhang (Ergebnisdiagramme)</b>	<b>16</b>

## 1 Zielstellung des Forschungsvorhabens

Moderne Maschinen und Anlagen sollen schnell und präzise arbeiten. Dafür ist neben ausreichend hoher Steifigkeit auch eine gute Dämpfung von Bedeutung. Die Steifigkeit wird häufig durch den Einsatz von Stahl erreicht. Dieser bringt jedoch neben der Steifigkeit auch eine große Masse mit in die Konstruktion, weshalb er sparsam verwendet werden muss. Im Ergebnis entstehen so dünnwandige Stahlschweißkonstruktionen. Eine gute Konstruktion vorausgesetzt kann so ein Bauteil, eine Baugruppe, große Lasten übertragen ohne sich stark zu verformen (hohe statische Steifigkeit). Allerdings neigen diese Konstruktionen bei dynamischer Beanspruchung zu Schwingungen.

Dem Problem der Schwingungen begegnet man konventionell durch Verrippung. Diese bedingen aber zusätzlichen Aufwand und zusätzliche Masse. Eine andere Möglichkeit wäre, bei geschlossenen Hohlräumen, diese mit dämpfenden Materialien zu füllen. Bei ausreichender Anbindung der Wandungen werden so Schwingungen in der Baugruppe behindert. Zusätzlich kann vorzugsweise die Druckfestigkeit der Baugruppe erhöht werden. Aus Gewichtsgründen sollte die Füllung dabei möglichst leicht sein.

Am Markt ist hierfür eine Reihe von Materialvarianten erhältlich. Einige davon (mineralischer Beton, Polymerbeton, eine Mischung aus Harz und Glasblähkugeln) sollen in einer vergleichenden Untersuchung im Hinblick auf ihre dämpfenden Eigenschaften untersucht werden. Neben diesen gießfähigen Systemen soll auch noch der Vergleich zu einer Variante unter Verwendung von Metallschaum geführt werden.

## 2 Ausgangssituation

Die Anforderungen an den aktuellen und zukünftigen Maschinenbau sind vielfältig und häufig divergierend. Die Maschinen sollen schnell und präzise arbeiten, zu nahezu 100% verfügbar sein, sicher in der Anwendung, sie sollen leicht sein, wenig Energie verbrauchen, nachhaltig produziert werden (recyclingfähig sein) und nicht zuletzt auch günstig in der Herstellung. Wobei die Herstellung selbst noch möglichst flexible zu halten ist, um auf Kundenwünsche schnell und umfassend reagieren zu können.

Traditionell sind die meistverwendeten Werkstoffe Guss, Stahl und Aluminium, wobei neue Werkstoffe auf dem Vormarsch sind (faserverstärkte Kunststoffe, aber auch zum Beispiel Beton). Gusskonstruktionen werden in vielen Fällen aufgrund sinkender Stückzahlen (Flexibilität) durch Schweißkonstruktionen ersetzt. Ausgangsmaterial für die Schweißkonstruktion sind Blechzuschnitte und Profilhalbzeuge. Um die Maschinen schnell und zugleich effizient zu machen, müssen metallische Werkstoffe an bewegten Baugruppen sparsam eingesetzt werden. Dies führt oft zu dünnwandigen Konstruktionen. Statisch gesehen sind diese stabil, dynamisch neigen sie häufig zu Schwingungen.

Handelt es sich hierbei um Wandschwingungen, können bei großflächigen Bauteilen Sandwiche helfen das Bauteil zu versteifen. Bei kleineren kompakten Bauteilen, welche zum Beispiel aus Profilen aufgebaut sind, fällt dies schwerer. In diesem Fall könnte die Lösung darin bestehen den Hohlraum mit einem versteifenden / dämpfenden Material zu füllen. Um die Wirkung solcher Stoffe besser zu verstehen und vergleichen zu können, wurde eine Studie an ausgefüllten Profilen durchgeführt.

### 3 Darstellung wissenschaftlich-technischer Ergebnisse

#### **AP1: Festlegung der Außenabmessungen**

Bei der vorliegenden Studie ging es um die Feststellung grundlegender Dämpfungseigenschaften. Aus diesem Grund wurden die Messungen nicht an einem speziellen Maschinenbauteil, sondern an einer allgemeinen Halbzeuggeometrie durchgeführt. Die Wahl fiel auf ein Standardhohlprofil nach DIN EN 10210 mit 160mm x 80mm Kantenlänge und 4mm Wandstärke (Bild 1). Die Länge für den Versuchskörper wurde mit einem Meter festgelegt. Dadurch wurde es möglich Vergleiche zu früheren Untersuchungen durchzuführen. Der Werkstoff ist einfacher Baustahl S235 (St37).

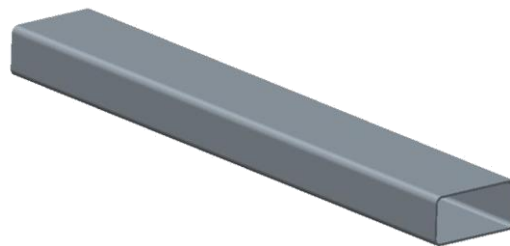


Bild 1: Versuchsgeometrie zur Dämpfungsmessung – Hohlprofil DIN EN 10210 – S235 – 160mm x 80mm x 4mm, L=1000mm

Da die reinen Adhäsionskräfte zwischen blankem Stahl und mineralischen Beton nicht sehr groß sind wurden für eine gute Anbindung zwischen beiden Werkstoffen zusätzliche Anker für Formschluss eingebracht. Als Anker dienen in diesem Fall Sechskantschrauben DIN EN ISO 4017 M8x25 – 8.8. Zur Befestigung wurden Löcher in das Profil gebohrt, um die Schrauben von außen im Profillinieren anschweißen zu können. Der durchschnittliche Abstand der Anker beträgt 100mm, so dass sich 38 Anker im Profil befinden (entspricht 38 Anker pro Meter Profillänge [Bild 2]). Durch die eingeschweißten Anker vergrößert sich die Masse um ca. 0,5kg (+3,7%). Der Einfluss dieser Maßnahme auf die Schwingungseigenschaften wurde zuerst untersucht.

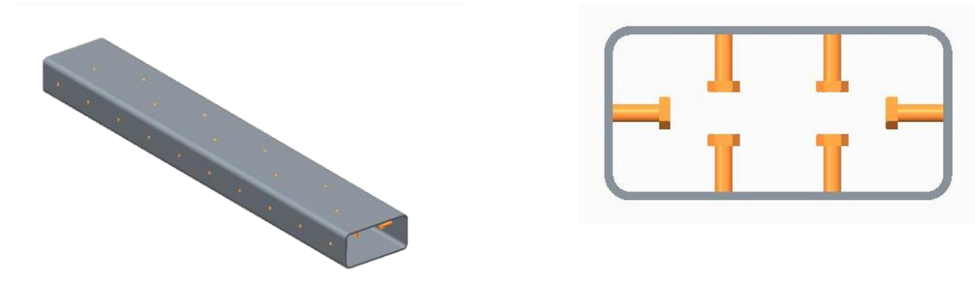


Bild 2: Zusätzliche Anker im Profil für Formschluss zwischen Füllung und Profil

## AP2: Bestimmung der Schwingungseigenschaften

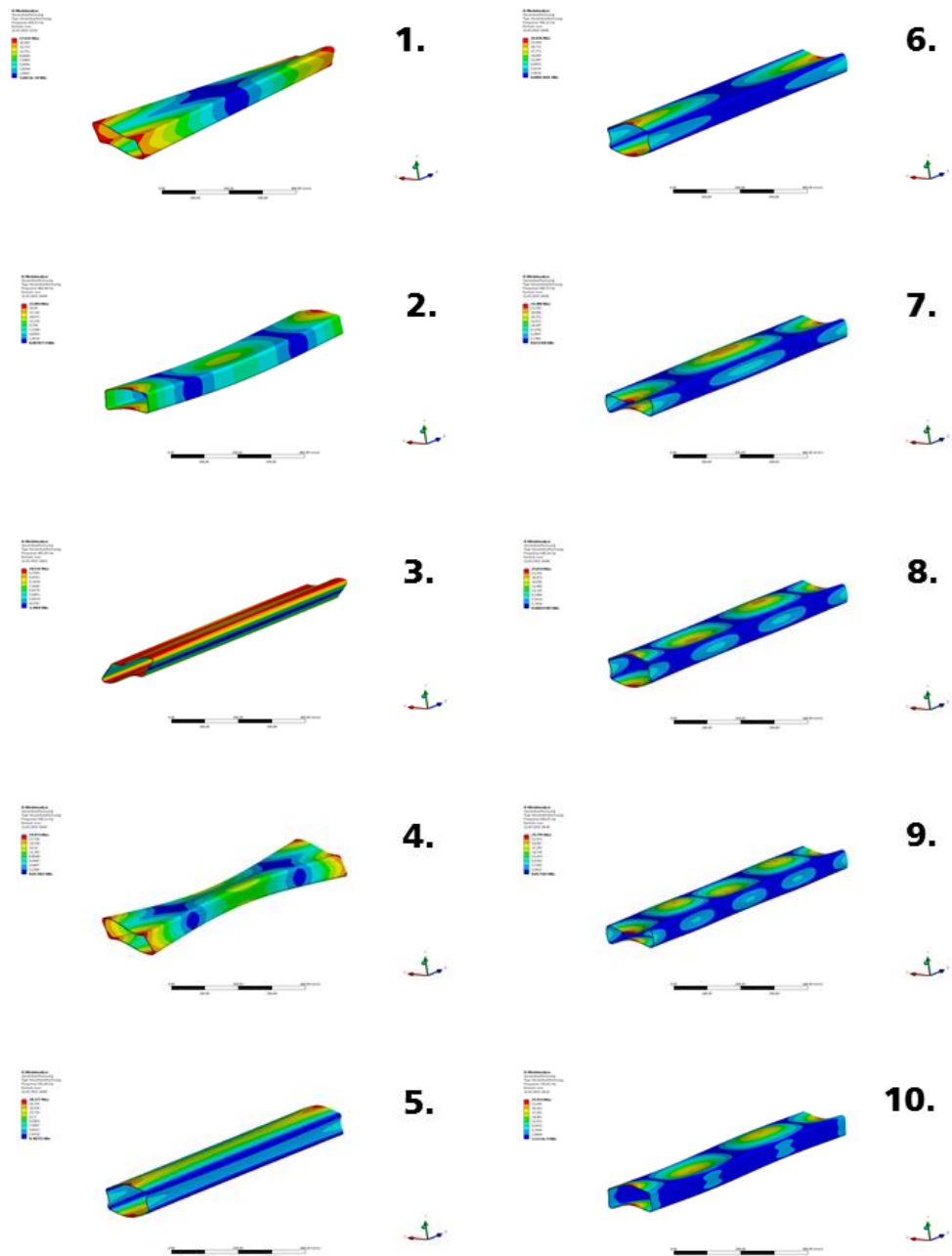
Vor Beginn der Messungen wurden die Schwingungseigenschaften des Profils (Eigenfrequenzen) mit Hilfe der FEM-Simulation bestimmt. Hierzu wurden die ersten 10 Eigenfrequenzen mit ihren Schwingformen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Errechnete Eigenfrequenzen des Hohlprofils  
160mm x 80mm x 4mm, L=1000mm

Frequenz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Profil leer [Hz]	420	486	498	580	583	588	610	646	699	744
Profil mit Anker [Hz]	409	479	484	565	571	578	598	634	685	730

Der Massezuwachs durch das Einbringen der Anker senkt wie erwartet die Eigenfrequenzen ab. Da die Zusatzmasse nicht homogen verteilt ist, hat sie unterschiedlichen Einfluss auf die einzelnen Frequenzen. Die Absenkung der Frequenz beträgt zwischen 1,5% und 2,5%. Auf die Ausbildung der Schwingformen jedoch haben die Anker keine Auswirkung. Die Eigenschwingformen zu den in Tabelle 1 errechneten Eigenfrequenzen sind in Tabelle 2 ihrer Reihenfolge nach dargestellt.

Tabelle 2: Eigenschwingformen des Hohlprofils 160mm x 80mm x 4mm; L=1000mm





### AP3: Füllung der Profile

Für die Füllung der Profile kamen verschiedene Materialien zum Einsatz. Die erste Gruppe der Materialien war gießfähig (mineralischer Beton, Polymerbeton, Mischung aus Epoxidharz und Blähglaskugeln), ihr gegenübergestellt wurde eine Füllung aus Aluminiumschaum (nachträglich eingeklebt).

Tabelle 3: Füllmaterialien für die Profile und die entstehenden Profilmassen

Nr.	Zusatz	Füllung	Masse (ohne Füllung)	Masse (kompl.)
1		Leer	13,4 kg	
2	Anker	Leer mit Anker	13,8 kg	
3	Anker	Leichtbeton	13,8 kg	30,7 kg
4	Anker	Feinbeton	13,8 kg	37,5 kg
5	Anker	Vergussbeton „Durfill“	13,8 kg	38,4 kg
6	Anker	Polymerbeton	13,8 kg	37,8 kg
7		Epoxidharz + Blähglaskugeln (BGK)	13,4 kg	20,9 kg
8		Aluminiumschaum eingeklebt	13,4 kg	18,0 kg

Bei den gießfähigen Systemen wurde dem Vergussbeton „Durfill“, ein baugewerblich genutzter Feinbeton (maximale Korngröße 4mm) und ein ebenfalls im Baugewerbe eingesetzter Leichtbeton (maximale Korngröße 4mm, mit Zusatz leichter Gesteinsfraktionen und Blähglas) gegenübergestellt. Hinzu kam noch ein Polymerbeton, eine Mischung aus Epoxidharz und mineralischen Zuschlagstoffen, mit einer maximalen Korngröße von 3mm. Alle diese Lösungen bedeuteten einen großen Massezuwachs, deshalb wurde in einer weiteren Variante eine leichtere Mischung aus Epoxidharz und Blähglaskugeln untersucht. Noch leichter im Vergleich zu den Epoxidharz-gebundenen Blähglaskugeln ist die Variante mit einem eingeklebten Aluminiumschaumkern. Der Aluminiumschaum hierfür wurde schmelzmetallurgisch erzeugt und weist eine Dichte von ca.  $0,35\text{g/cm}^3$  auf.

### AP4: Messung der Dämpfung

Die Vermessung der Profile fand im aufgehängten Zustand statt. Die Profile hingen an 4 biegeschlaffen Fäden. An den im Bild 3 gekennzeichneten Punkten des Profils, wurden Beschleunigungssensoren installiert. Es wurden hierfür besonders kleine Sensoren (<5g), um das Schwingverhalten des Profils nicht zu verändern. Die Schwingungsanregung erfolgte über einen Impulshammer an der rechten oberen Ecke in raumdiagonaler Richtung.

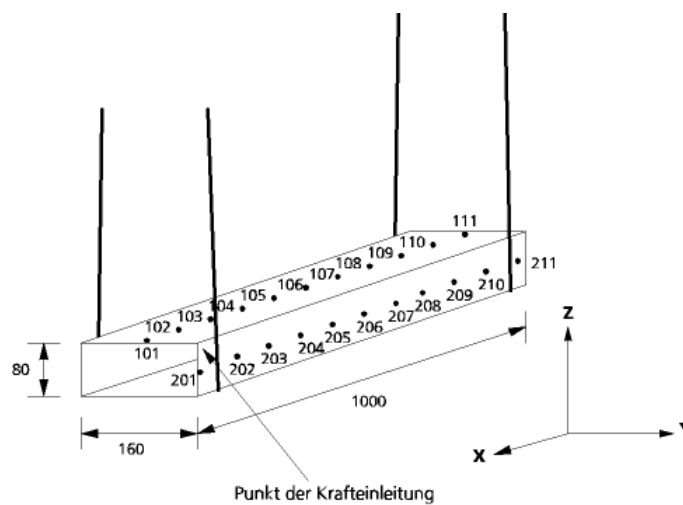


Bild 3: Messpunkte am Profil für die Dämpfungsmessung

Gemessen wurden jeweils die ersten beiden Biegeschwingungen in y- bzw. z-Richtung.

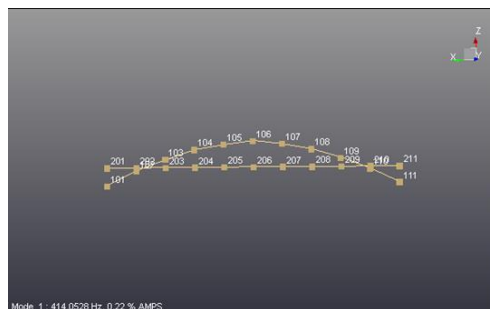


Bild 4: Balken 3 – erste Biegeschwingung in z-Richtung

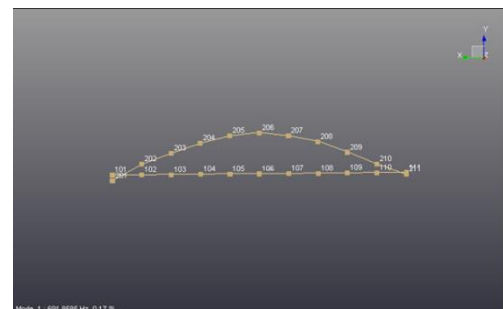


Bild 5: Balken 3 – erste Biegeschwingung in y-Richtung

Die Zusammenstellung der gemessenen Eigenfrequenzen zeigt die Tabelle 4.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Frequenzen 1. Ordnung

Profil	Masse [kg]	Mode Z1		Mode Y1		
		Eigenfrequenz [Hz]	Dämpfung <sub>z</sub> [%]	Eigenfrequenz [Hz]	Dämpfung <sub>y</sub> [%]	
Balken_1	leer	13,40	486,50	0,070	902,00	0,010
Balken_2	leer+Anker	13,80	480,70	0,050	886,00	0,010
Balken_3	Leichtbeton	30,70	414,10	0,220	691,90	0,170
Balken_4	Feinbeton	37,50	420,70	0,180	728,00	0,190
Balken_5	Durfill	38,40	401,10	0,380	670,60	0,410
Balken_6	Polymerbeton	37,80	420,50	0,130	724,00	0,180
Balken_7	Epoxy+BGK	20,90	482,30	0,050	794,50	0,030
Balken_8	Alu-Schaum	18,00	484,90	0,140	813,80	0,070

Die Bestimmung der Dämpfung erfolgte mit der in Bild 6 dargestellten Übertragungsfunktion.

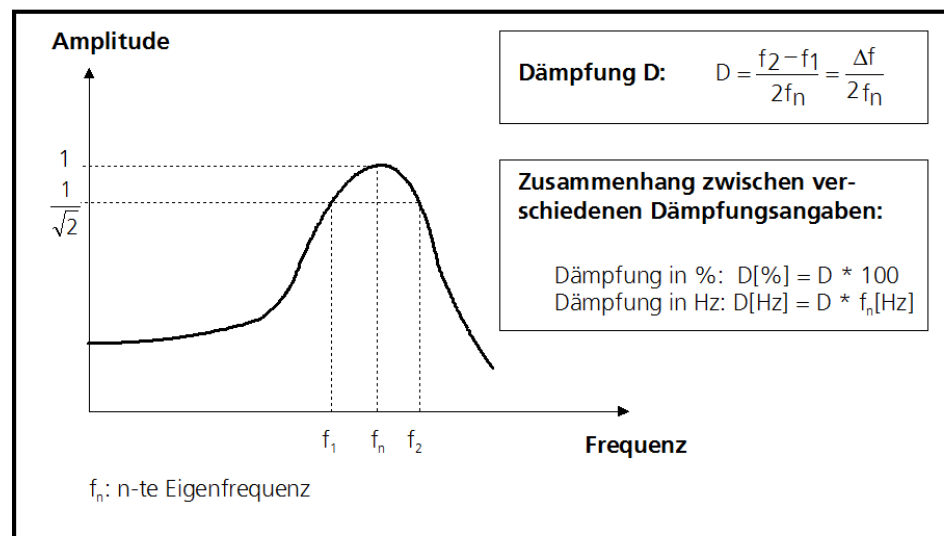


Bild 6: Bestimmung der Dämpfungswerte nach DIN 1311-2

### AP5: Auswertung der Messungen

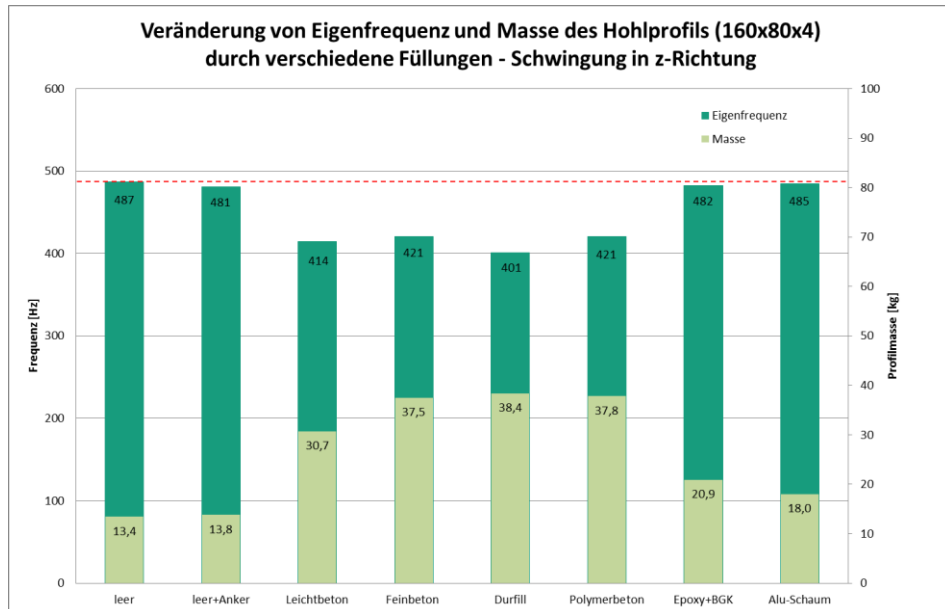


Bild 7: Zusammenstellung der Profilmassen und Eigenfrequenzen bei Schwingung in z-Richtung

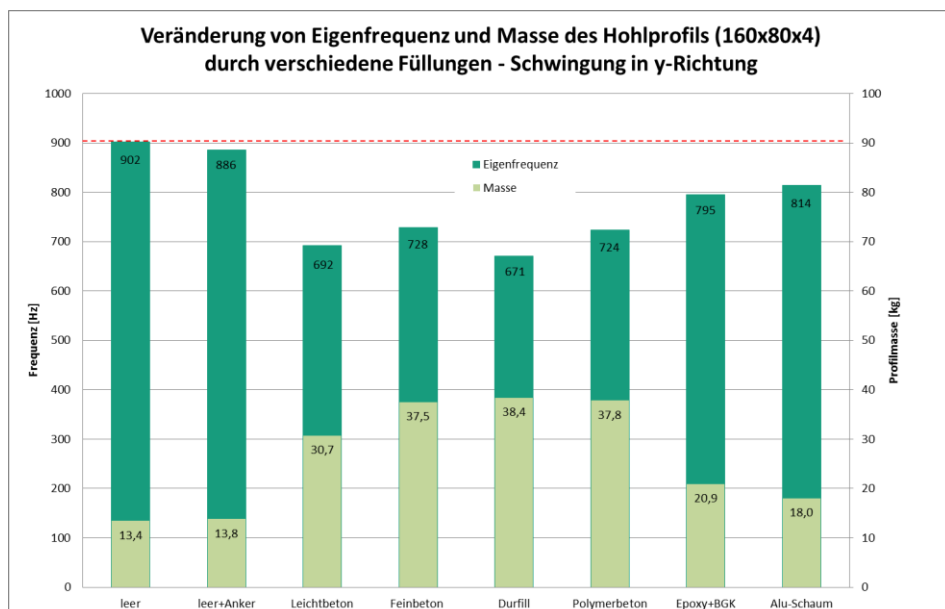


Bild 8: Zusammenstellung der Profilmassen und Eigenfrequenzen bei Schwingung in y-Richtung

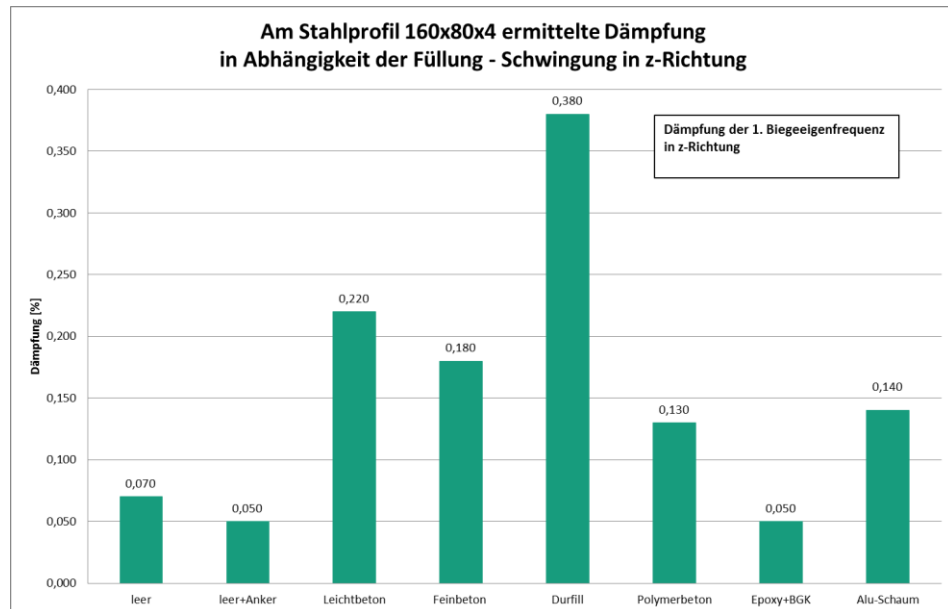


Bild 9: Zusammenstellung der ermittelten Dämpfungswerte für die verschiedenen Füllstoffe, bei Schwingung in z-Richtung

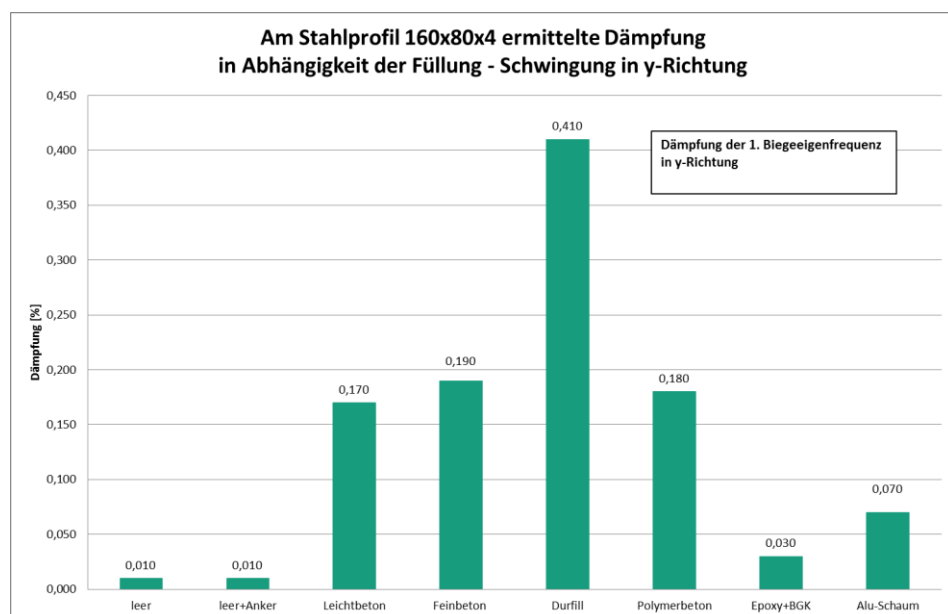


Bild 10: Zusammenstellung der ermittelten Dämpfungswerte für die verschiedenen Füllstoffe, bei Schwingung in y-Richtung

In der Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt sich, dass die mineralischen Füllstoffe (Leichtbeton, Feinbeton, „Durfill“) und die Füllung mit mineralischen Zuschlagstoffen (Polymerbeton) zunächst einmal den größten Massezuwachs bringen. Der Zuwachs beträgt hierbei 131% beim Leichtbeton, 182% beim Feinbeton, 189% bei „Durfill“ und 184% beim Polymerbeton. Die beiden verbleibenden Varianten können auf einen geringeren Massezuwachs verweisen. Die Füllung mit Epoxidharz und Blähglaskugeln (BGK) steigert die Masse um 57%, der eingeklebte Aluminiumschaum um 35%. Dem entsprechend sinken die Eigenfrequenzen ab. Der Abfall ist jedoch deutlich geringer (13,6% bis 17,6% bei Schwingung in z-Richtung und 20% bis 25,7% in y-Richtung, für die mineralisch gefüllten Profile). Dies deutet auf eine erhöhte Stabilität hin (damit auch auf eine entsprechende Kraftübertragung an den Verbindungsstellen). Die beiden nichtmineralischen Füllungen weisen für Schwingungen in z-Richtung kaum eine Frequenzverschiebung auf, bei Schwingungen in y-Richtung eine Frequenzverringern von 10-12%. Im Vergleich zu den vorangegangenen beschriebenen Varianten dürfte hierfür zum einen der geringere Massezuwachs und zum anderen der geringere E-Modul der Füllstoffe verantwortlich sein. Dieser liegt im Mittel eine Zehnerpotenz tiefer als bei den Betonvarianten.

Für die ermittelten Dämpfungswerte ergibt sich qualitativ ein recht klares Bild, quantitativ verschieben sich die Verhältnisse zwischen den Schwingrichtungen etwas. Das geringste Dämpfungsvermögen weist die Epoxidharz-Blähglaskugelfüllung auf. In diesem Fall variiert die Zunahme zwischen null und dem Faktor 3. An zweiter Stelle folgt der eingeklebte Aluminiumschaum, hier schwankt die Dämpfungserhöhung um Faktor 2 bis 7. Noch besser schneiden die Beton- und Polymerbetonvarianten ab. Die Zunahme der Dämpfung beträgt Faktor 2 bis 19. Die beste Dämpfung im Vergleich ergibt sich bei der Füllung des Profils mit „Durfill“. Die Dämpfung verbessert sich in diesem Fall um den Faktor 5,5 bis zum Faktor 41. Damit liegt sie auch noch um den Faktor 2 höher als bei den baugewerblich genutzten Betonsorten und beim Polymerbeton.

Die Ursachen für diese Ergebnisse dürften im stofflichen Aufbau der einzelnen Varianten zu finden sein. Wie schon erwähnt besitzen die Füllstoffe der beiden letzten Varianten eine deutlich geringere Steifigkeit (=geringerer E-Modul), d. h. sie können dem schwingenden Profil weniger Widerstand entgegensetzen. Die Energiedissipation läuft bei der Epoxidharz-Blähglaskugel-Variante innerstofflich im Epoxidharz ab, durch Relativbewegung der Molekülketten. Im Aluminiumschaum wird die Energie durch Mikrorisse in den Zellwänden und deren Relativbewegung abgebaut. Verglichen mit den mineralischen Füllungen ist die wirksame Fläche hier aber deutlich geringer. Bei den Beton- und Polymerbetonvarianten ist davon auszugehen, dass Mikrobewegungen an den Grenzflächen Bindematrix (=Zement, bzw. Kunstharz) und Füllstoff (=Sand, bzw. Kies) die Schwingenergie wirksam abbaut. Aufgrund der Vielzahl der Grenzflächen kann die Energie hierbei sehr wirksam abgebaut werden. Der zusätzliche Vorteil der „Durfill“-Füllung könnte in dem besonders abgestimmten

Korngrößenverhältnis der Füllmenge liegen, dadurch liegen die einzelnen Körner sehr nahe beieinander und die für die Energiedissipation wirksame Fläche vergrößert sich zusätzlich.

Als letzter Punkt der Untersuchung erfolgte noch die Zusammenführung der Ergebnisse aus Dämpfung und Masse. Wie bereits erwähnt spielt Leichtbau eine immer größere Rolle, so dass im Idealfall auch die dämpfenden Materialien eine geringe Masse aufweisen.

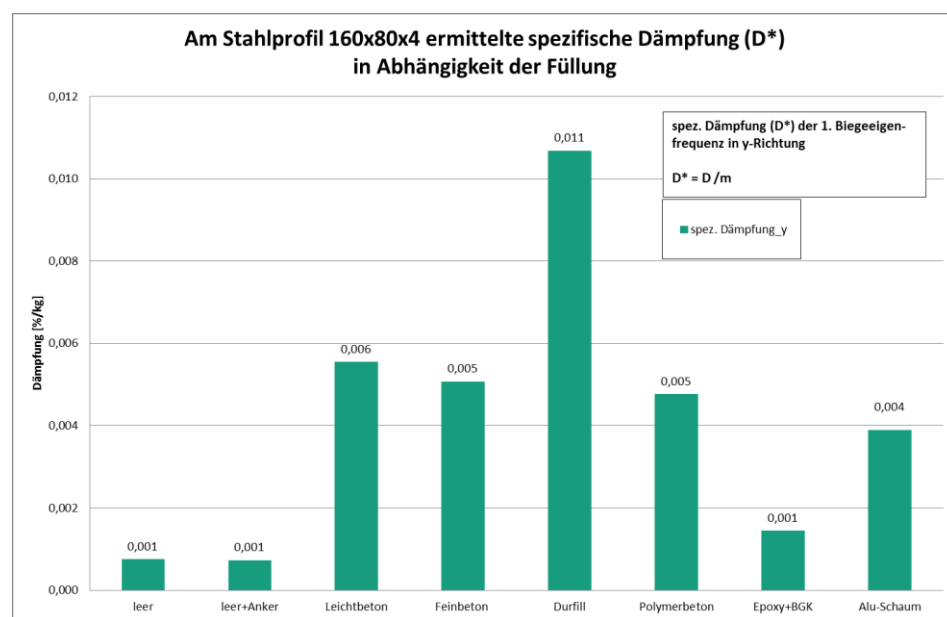


Bild 11: Ermittelte spezifische Dämpfungswerte für die einzelnen untersuchten Varianten

Im Bild 11 sind die ermittelten spezifischen Dämpfungswerte aufgezeigt. Die spezifische Dämpfung ist ein massebezogener Wert, er ergibt sich als Quotient aus Dämpfungswert und Masse. Qualitativ ergibt sich hierbei nur eine geringfügige Verschiebung zwischen den Varianten. Aufgrund seiner geringen Masse kann der Aluminiumschaum zu den anderen Varianten mit mineralischen Füllstoffen aufschließen. Trotz der größten Gesamtmasse bleibt die Variante mit „Durfill“ Spitzenreiter, da sie mit Abstand den größten Dämpfungswert erzielte.

## 4 Anhang (Ergebnisdiagramme)



