

Untersuchung des Modalverhaltens strukturierter Bleche

Anna-Sophia Henke¹, Martin Noack², Ennes Sarradj³

¹ BTU Cottbus-Senftenberg, Fachgebiet Technische Akustik, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: anna-sophia.henke@b-tu.de

² BTU Cottbus-Senftenberg, Fachgebiet Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen, 03046 Cottbus, Email: noack.martin@b-tu.de

³ TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, 10587 Berlin, Deutschland, Email: ennes.sarradj@tu-berlin.de

Einleitung

Stahlbleche sind aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und einfachen Fertigung bis heute unentbehrlich im Maschinen- und Fahrzeugbau sowie in der Architektur. Zum Einsatz im Leichtbau kann die Steifigkeit von Platten durch das Einbringen von Strukturen erhöht werden. Damit wird ein geringerer Materialeinsatz bei gleichbleibenden statischen Beanspruchungen erreicht. Eine solche Strukturierung von isotropen Platten kann jedoch zu einer Änderung hin zu anisotropen Charakteristika führen, was in Folge auch die akustischen Eigenschaften der Platten beeinflusst. Im Rahmen einer Studie zum Körperschallverhalten wabenförmig hexagonal strukturierter Stahlbleche wurde deren Modalverhalten untersucht. Dafür wurden die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen der Bleche sowohl experimentell als auch via FEM-Simulation mit unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt. Als Maß zur akustischen Charakterisierung der Stahlbleche dienten die Modendichte und der Realteil der Admittanz. Der Beitrag zeigt die Verfahren und veranschaulicht Ergebnisse für ein glattes Blech und hexagonal strukturierte Blechvarianten.

Material und Methoden

Die untersuchten Bleche bestehen aus dem unlegierten Stahl DC04. Die Materialparameter der strukturierten Bleche sind in Tabelle 1 aufgeführt. Ausgehend von einem glatten Bleche wurde mit einem Innenhochdruckumformverfahren (Hydroforming-Verfahren) die wabenförmig angeordnete hexagonale Struktur mit der Schlüsselweite von 33 mm (SW 33), einer Wabentiefe von 2,8 mm und einer Stegbreite von 2 mm erzeugt [1, 2]. Bei diesem Verfahren bleibt auf Grund der Einspannung in der Presse ein glatter Rand erhalten. Abbildung 1 zeigt die Struktur und die einzelnen Abmessungen des Bleches nach der Umformung.

Tabelle 1: Materialparameter der strukturierten Bleche

Material	DC04
Elastizitätsmodul	$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
Dichte	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Poisson-Zahl	$\nu = 0,31$
Blechdicke	$h = 0,5 \text{ mm}$
Strukturgröße	33 mm (SW 33)

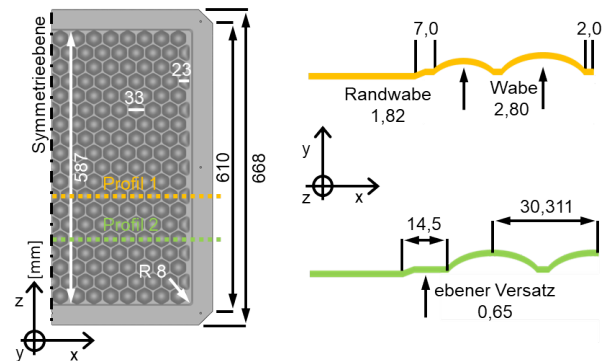


Abbildung 1: Vermessene strukturierte Platte SW 33

FEM-Simulation

Modell

Das FE-Modell wurde anhand einer geometrischen Vermessung des originalen Stahlbleches (siehe Abbildung 1) in HyperMesh aufgebaut und diskretisiert. Hinsichtlich der Simulation der Umformung war eine Partitionierung des FE-Modells wie in Abbildung 3(a) dargestellt erforderlich. Dadurch konnte eine Diskretisierung mit einem strukturierten Netz bestehend aus 1076079 Knoten und 1074355 linearen viereckigen Schalenelementen vom Typ S4R, welche auf der Reissner-Mindlin Theorie basieren [3], realisiert werden. Die dabei verwendete feine Vernetzung (Elementgröße 0,75 mm) wie in der Abbildung 2 zu sehen ist, beruht auf einer Netzstudie eines glatten Bleches. Diese hat gezeigt, dass bei linearen Elementen eine Anzahl von mindestens 10 bis 12 Elemente pro Wellenberg benötigt werden, damit auch im Frequenzbereich bis 16 kHz nur eine Abweichung von 0,5 % zwischen der numerischen und analytischen Lösung auftritt. Grundlage für die FE-Berechnungen waren die Materialdaten für den Werkstoff DC04. Die Daten für die Plastifizierung von DC04 entstammen vorangegangenen Untersuchungen [4].

Simulation

Die Materialparameter des Ausgangsmaterials weisen nach der Strukturierung des Bleches keine homogene Verteilung mehr auf. Durch die Umformung sind Spannungen in dem strukturierten Blech vorhanden. Um den Einfluss dieser umformungsbedingten Spannungen mit zu betrachten, erfolgte auch eine Simulation zur Erzeugung der wabenförmigen hexagonalen Strukturen mit dem FE-Programm ABAQUS. Dabei ist nicht das Hydroforming-Verfahren simuliert worden, sondern ein vereinfachter

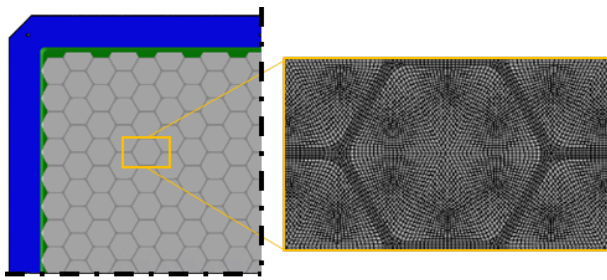
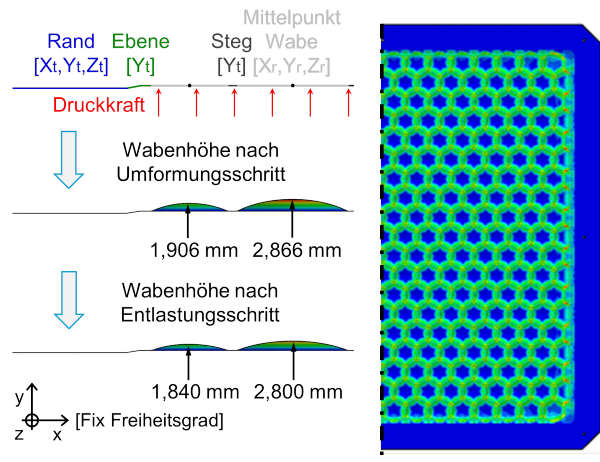


Abbildung 2: Teilausschnitt der komplett vernetzten Platte.

Umformprozess. Dieser beruht zum einen auf der Lagerung des FE-Modells, welches einer Einspannung des Stahlbleches im Formwerkzeug einer hydraulischen Presse entspricht und zum anderen auf einer konstanten Druckkraft. Der ebene Versatz des Stahlbleches (siehe Abbildung 1), der durch die Einspannung in die hydraulische Presse entsteht, wird nicht simuliert, sondern ist bereits im FE-Modell enthalten. Wie in Abbildung 3(a) zu sehen ist, wurden alle translatorischen Freiheitsgrade des Randes festgehalten. Die Knoten der Ebene sowie des Stegs hingegen nur in Y-Richtung. Somit ist die Materialbewegung infolge der Umformung in der X-Z-Ebene nicht blockiert. Zusätzlich wurden noch alle Rotationsfreiheitsgrade der Wabenmittelpunkte gesperrt. Dadurch wird eine korrekte Umformung des Bleches gewährleistet. Um eine Wabenhöhe von 2,8 mm (siehe Abbildung 1) zu erreichen, wurde eine Druckkraft von 4,505 MPa auf die Fläche der Ebene, Stege und Waben aufgegeben. Die vereinfachte Umformsimulation besteht aus zwei geometrisch nichtlinearen Berechnungsschritten. Zuerst erfolgt eine Druckbelastung des FE-Modells, wodurch sich die wabenförmigen hexagonalen Strukturen ausbilden. Wie aus Abbildung 3(a) zu entnehmen ist, sind die resultierenden Waben höher als die 2,8 mm des vermessenen Bleches. Dies hängt mit der noch anliegenden Druckkraft und der dadurch überlagerten plastisch - elastischen Verformung der Struktur zusammen. Um die elastische Rückfederung (geometrische Änderung der Struktur) nach dem Umformungsprozess zu kompensieren [5], wird als zweiter Schritt eine Entlastungsrechnung durchgeführt. Hierfür erfolgt die zweite Rechnung ohne eine Druckkraft bei gleichbleibender Lagerung des FE-Modells. Die daraus resultierende Struktur entspricht somit nur der Plastifizierung infolge der Umformung. Ziel dieser Simulation des Umformprozesses ist, die dabei entstehende Spannungsverteilung im Stahlblech wie in Abbildung 3(b) dargestellt zu berechnen. Diese resultierende Spannung hat einen Einfluss auf dessen Strukturverhalten und somit auf die Eigenfrequenzen und Eigenformen. Darauf aufbauend wurde eine Frequenzanalyse im Bereich von 1 Hz bis 16 kHz für das verformte Stahlblech mit und ohne umformungsbedingte Vorspannung berechnet.

Experimentelle Modalanalyse

Experimentell wurden die Schwingformen des strukturierten Bleches mit Rand durch eine piezoelektrische Anregung und dem Laser-Scanning-Vibrometer PSV400 er-



(a) Simulierte Umformungsschritte zur Erstellung des FEM-Modells mit der umformungsbedingten Vorspannung. (b) FEM-Modell mit umformungsbedingter Spannungsverteilung.

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Modellbildung des FEM-Modells mit Vorspannung und der resultierenden Spannungsverteilung: ■ 0 MPa, ■ 70 MPa, ■ 160 MPa.

mittelt [6]. Durch die senkrecht hängende Lagerung an elastischen Seilen wurden annähernd frei-freie Randbedingungen für die Messung ermöglicht. Der rechteckige Scanbereich mit 900 gleichverteilten Scanpunkten umfasste drei senkrecht und fünf waagrecht liegende Waben. Der Messaufbau mit dem Scanbereich ist in Abbildung 4 dargestellt.

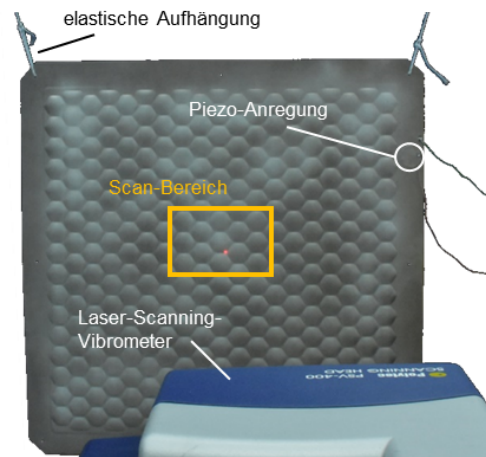


Abbildung 4: Messaufbau zur experimentellen Modalanalyse.

Ergebnisse

Die gemessenen und numerisch ermittelten Schwingformen zeigen gute Übereinstimmungen. Neben Plattenschwingungen treten oberhalb von 2000 Hz die in Abbildung 5 dargestellten Schwingungen der einzelnen Waben und der Stegkreuzungen auf. Die gemessenen und numerisch ermittelten Frequenzen der Schwingungsformen liegen sowohl bei den Schwingungen der Stegkreuzungen mit 4760 Hz (Messung) und 4767 Hz (FEM) als auch bei

der Schwingung der Waben mit 5391 Hz (Messung) und 5417 Hz (FEM) sehr nah beieinander.

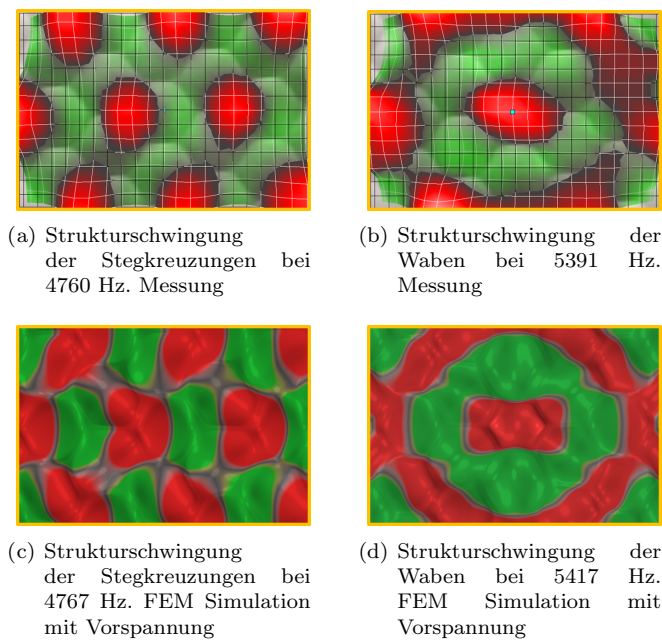


Abbildung 5: Gemessene und via FEM ermittelte Schwingungsformen des mit SW 33 strukturierten Blechs mit glattem Rand. Auslenkung in y-Richtung: ■ <0, ■ = 0, ■ >0

Modalverhalten

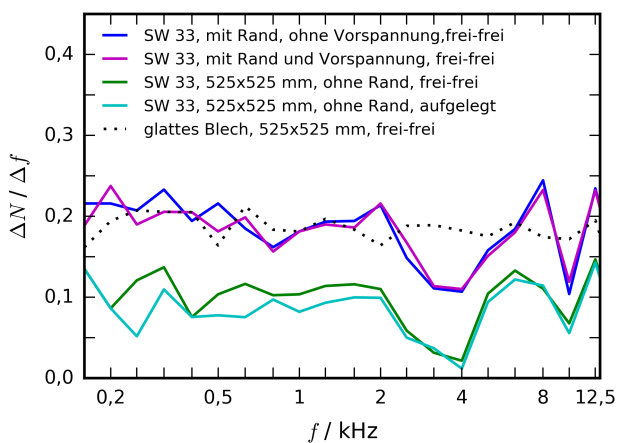


Abbildung 6: Darstellung der via FE-Simulation ermittelten Modendichten in Terzbändern für ein glattes Blech und strukturierte Bleche mit und ohne Rand bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.

Aus den numerisch ermittelten Eigenfrequenzen wurden die Modendichten $\frac{\Delta N}{\Delta f}$ für je ein strukturiertes Blech mit Rand, mit und ohne Berücksichtigung der umformungsbedingten Vorspannung sowie eines 0,5 mm dicken, glatten Bleches der Größe 525 mm x 525 mm mit frei-freier Lagerung ermittelt. Abbildung 6 zeigt den Verlauf dieser Modendichten in Terzbändern. Darüber hinaus wird der Verlauf der Modendichten eines strukturierten Bleches ohne Rand, gleicher Größe mit frei-frei und einfach aufgelegter Lagerung dargestellt. Dabei wird deutlich, dass

der Einfluss des glatten Randes der strukturierten Bleche wesentlich bedeutsamer für den Verlauf der Modendichte ist als die Lagerung. So befindet sich die Modendichte der strukturierten Bleche mit glattem Rand (mit und ohne Vorspannung) mit einem Wert von ca. 0,2 bis zu einer Frequenz von 2 kHz in der Größenordnung der Modendichte des glatten Bleches. Die Modendichte der strukturierten Bleche ohne Rand ist in diesem Frequenzbereich mit einem Wert von ca. 0,1 halb so groß. Im Frequenzbereich um 4 kHz befindet sich ein Minimum der Modendichte für die strukturierten Bleche mit und ohne Rand. Bei den Blechen ohne glatten Rand geht die Modendichte bei 4 kHz gegen Null. Bei den Blechen mit Rand treten nur an dem glatten Rand Schwingungen auf. Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine solche "Randschwingungsform" bei einer Frequenz von 4106 Hz. Aus der Abbildung 6 wird ersichtlich, dass die Vorspannung nur einen geringen Einfluss auf die Modendichte hat, welcher mit steigender Frequenz weiter abnimmt.

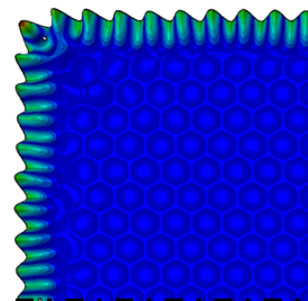


Abbildung 7: Randschwingung bei 4106 Hz, ermittelt via FE-Simulation des Bleches mit Vorspannung. Darstellung als 1/4 Schnitt des Bleches durch die Symmetrieachsen.

Basierend auf den ermittelten Modendichten wurde der Realteil der Admittanz $Re\{A\}$ nach

$$Re\{A\} = \frac{\pi}{2Sm''} \frac{\Delta N}{\Delta \omega} \quad (1)$$

ermittelt [7], wobei $m'' = \rho h$ die flächenbezogene Masse beschreibt, $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz und S die Fläche des Bleches.

Besonders deutlich wird der Einfluss des glatten Randes bei einer Mittenfrequenz von 4000 Hz. Die strukturbedingte Senke im Verlauf der Admittanzwerte wird durch diese Schwingungen des glatten Randes vermindert. Auf den Verlauf von $Re\{A\}$ hat die Vorspannung des Bleches ebenfalls nur einen geringen Einfluss. Dagegen wird der Einfluss unterschiedlicher Lagerungen besonders im niedrigen Frequenzbereich deutlich.

Die Eigenfrequenzanalyse wurde sowohl mit ABAQUS (S4R Elementen entsprechend der Theorie nach Reissner-Mindlin) als auch mit MSC Actran (QUA04 Elementen entsprechend der Plattentheorie nach Kirchhoff [3]) für das strukturierte Blech mit Rand, ohne Vorspannung durchgeführt. Abbildung 9 zeigt die Modendichten in Terzbändern für das strukturierte Blech mit Rand, ohne Vorspannung (nach Reissner-Mindlin und Kirchhoff) und zusätzlich die Modendichte für das strukturierte Blech

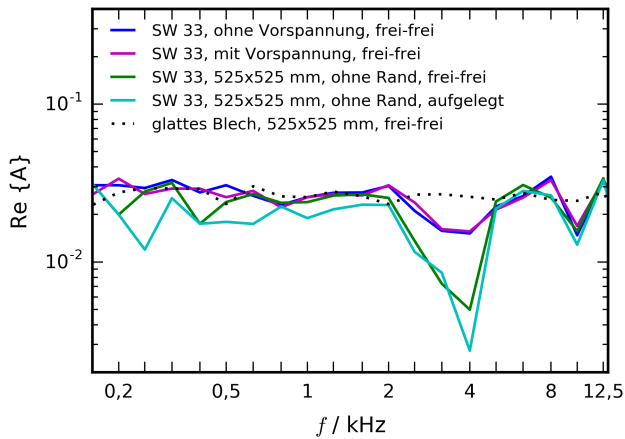


Abbildung 8: Aus den Modendichten ermittelter Realteil der Admittanz $Re\{A\}$ für ein glattes Blech und strukturierte Bleche mit und ohne Rand bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.

mit Rand mit Vorspannung und das glatte Blech (nach Reissner-Mindlin). Für die Verläufe der Modendichten der beiden strukturierten Bleche ohne Vorspannung sind trotz der verschiedenen Berechnungsansätze keine Unterschiede erkennbar.

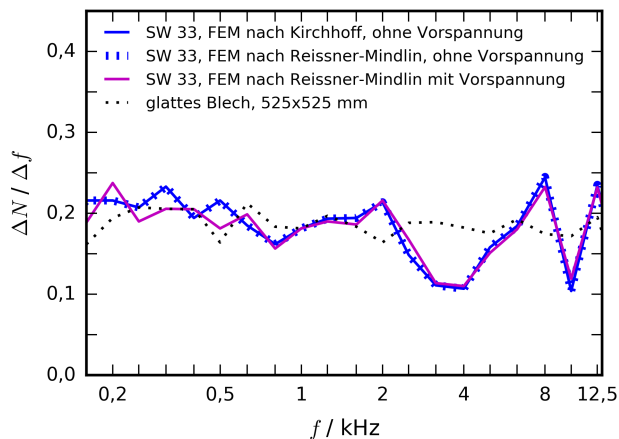


Abbildung 9: Darstellung der via FE-Simulation ermittelten Modendichten in Terzbändern für ein glattes Blech und strukturierte Bleche mit Rand nach den Theorien nach Reissner-Mindlin und Kirchhoff.

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wurde das Modalverhalten strukturierter Bleche mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode untersucht. Zusätzlich wurden die Schwingungsformen eines strukturierten Bleches mittels Laser-Vibrometrie experimentell ermittelt. Das Modalverhalten der strukturierten Bleche unterscheidet sich stark von dem eines glatten Bleches. In Bereich der Terzmittenfrequenz von 4 kHz zeigen die strukturierten Bleche ein charakteristisches Minimum der Modendichte, was auf die Strukturierung zurückzuführen ist. Der Einfluss des glatten Randes der untersuchten Bleche ist wesentlich größer als der Einfluss der umformungsbedingten Vorspannung.

Literatur

- [1] Henke, A.-S., Sarradj, E.: Körperschallverhalten strukturierter Bleche. Fortschritte der Akustik - DAGA, 2015
- [2] Henke, A., Sarradj, E., Langhof, C.: Driving-point mobility and sound insulation of structured sheet metal. Applied Acoustics, Volume 136, July 2018, p. 113-122, (preprint)
- [3] Klein, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 7., verbesserte Auflage, Vieweg Verlag Wiesbaden, 2007
- [4] Mahler-de Silva, T. Ableitung und Validierung eines FE-Ersatzmodells für strukturierte Bleche. Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg. 2015
- [5] Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer ISBN 978-3-662-07704-7, Berlin, 1996
- [6] Beirow, B.: Grundlegende Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Verdichteraufrädern in Integralbauweise. Shaker Verlag Aachen, 2009
- [7] Cremer, L., Heckl, M.: Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, 2., völlig neubearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin, 1996