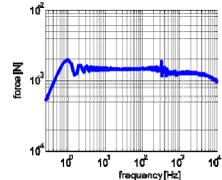
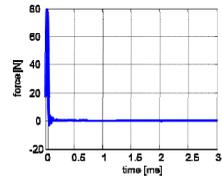


# Nutzen lokaler Eigenschaftsveränderung an Blechen zur akustischen Optimierung

Schmelter, R.

*Blechstrukturen sind häufig für starke Schallabstrahlung verantwortlich, ohne jedoch die eigentliche Quelle darzustellen. Dieses Problem ist hauptsächlich durch die von der Quelle zur Blechstruktur übertragene Energie abhängig. Dämmung der Energie an lokal eigenschaftsveränderten Störstellen in Blechen wird derzeit als neuer Ansatz zur Lösung des Problems untersucht. Dazu werden aktuelle Ergebnisse vorgestellt.*



*A new approach for reducing sound emission at big plate structures through local property changing of the base material is presented and investigated with experiments.*

## 1 Einführung

Im Automobilbau sowie im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau werden häufig große Blechstrukturen zur Verkleidung verwendet. Diese Strukturen sind oft eine starke Quelle für Luftschall, ohne jedoch die Quelle der anregenden Vibrationen darzustellen.

Die Abstrahlung von Luftschall ist hauptsächlich von den Moden der Struktur und deren Amplitude bestimmt, während für die Schallübertragung im Festkörper Materialimpedanzen und Reflexion der Energie an Störstellen wichtige Parameter darstellen. Zur Reduzierung der abgestrahlten Schallleistung kann man daher drei grundlegende Vorgehensweisen unterscheiden:

- Dämpfung der Moden,
- Verhinderung der Energieausbreitung in der schallabstrahlenden Struktur,
- Entkopplung der abstrahlenden Struktur von der Quelle.

Strukturdämpfung mit dämpfenden Belägen und Entkopplung der Struktur werden häufig eingesetzt um die Schallabstrahlung zu reduzieren. Jedoch sind diese Verfahren relativ teuer oder tragen zur Erhöhung der Gesamtmasse bei. Dadurch ergeben sich vor allem bei bewegten Maschinen, z. B. Kfz, energetische Nachteile. Ein neuer Ansatz versucht diese Nachteile durch gezielte Veränderung der Materialei-

enschaften in der abstrahlenden Struktur zu verringern. Dazu werden durch örtliches Erhitzen mit einem Laser härtere oder weichere Bereiche z. B. in Form einer Linie, in einem Blech erzeugt. An dieser Störstelle wird ein Teil der sich ausbreitenden akustischen Energie reflektiert. Mit geeigneten Mustern auf Blechstrukturen ist es somit möglich, bandbegrenzt Körperschall in Regionen abzuleiten die weniger an der Schallabstrahlung beteiligt sind. Am Institut für Maschinenwesen (IMW) werden solche lokalen Eigenschaftsveränderungen auf ihre akustische Wirksamkeit experimentell untersucht. Gleichzeitig läuft die Entwicklung für ein FE-Modell, mit der diese Eigenschaften abgebildet werden sollen um später geeignete Muster zur gezielten Schallleitung zu finden.

## 2 Untersuchungsobjekte und Messaufbau

Moderne Stähle für die Automobilindustrie weisen Eigenschaften auf, welche lokale Veränderungen der Materialeigenschaften durch Wärmeeinwirkung begünstigen. Für die vorgestellten Untersuchungen wurden die Stahlsorten HTC600XD® (1.0941) und LH800® (1.7734) ausgewählt. HTC600XD® ist ein Dualphasenstahl und LH800® ein Vertreter der Lufthärtenden Stähle. Bleche aus beiden Stahlsorten wurden für die Untersuchungen lokal mit einem Laser behandelt (Abbildung 1 und Abbildung 2).

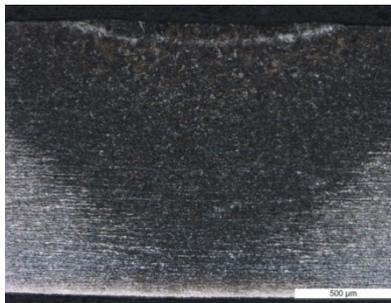


Abbildung 1: Schliffbild der wärmebehandelten Zone.

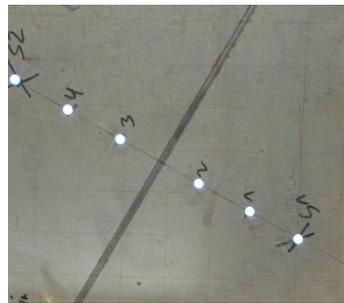


Abbildung 2: Lokal wärmebehandelte Zone auf einem Blech aus LH800®.

Die wärmebehandelte Zone weist dabei ähnliche Eigenschaften wie eine Schweißnaht auf. Die Ausprägung der wärmebehandelten Zone kann durch Variation der Laserparameter verändert werden. Für die Untersuchungen wurden daher Proben mit verschiedenen Einstellungen für die Wärmebehandlung nach Tabelle 1 gefertigt.

Tabelle 1: Überblick der verwendeten Lasereinstellungen.

<b>Material</b>	<b>Leistung</b>	<b>Vorschub</b>	<b>Fokuslage</b>
<b>HTC600XD®</b>	0	0	0
	1 kW	1 m/min	15
	1 kW	2 m/min	10
	2 kW	2 m/min	10
<b>LH800®</b>	0	0	0
	1 kW	1 m/min	15
	1 kW	2 m/min	10
	2 kW	2 m/min	10

Die untersuchten Bleche hatten eine Größe von 300x300x1,5mm. Gelagert wurden diese an den Blechrändern mit Steinwolle in einem Holzrahmen (s. Abbildung 3) und 25mm Überdeckung. Die Steinwolle dient dabei der Verringerung reflektierter Wellen an den Schnitträndern. Angeregt werden die Bleche durch eine auf Position 1 fallende Plastikkugel mit einem Durchmesser von 8mm. Der resultierende Stoß regt einen weiten Frequenzbereich von weniger als 10Hz bis ca. 10kHz gleichmäßig und reproduzierbar an. Die Stoßenergie kann durch die Fallhöhe der Kugel eingestellt werden und wurde während der Versuche nicht verändert.

An den Positionen 1 bis 6 wurden die Impulsantworten der Bleche mit einem Einpunkt-Laservibrometer nacheinander berührungslos aufgezeichnet. Damit bei der Auswertung die Phaseninformation korrekt wiedergegeben werden, wurde ein zusätzlicher Beschleunigungssensor ortsfest in der unteren Rahmenecke positioniert. Über diesen konnte die Messung ereignisgesteuert gestartet werden. Außerdem ermöglicht der Referenzsensor über Korrelationsmessung eine nachträgliche Korrektur der Phasenlage.

Die Anordnung der Messstellen 1 bis 6 erfolgte orthogonal zur Störstelle, damit der Einfallswinkel der ankommenden Welle gleich dem Reflexionswinkel der reflektierten Welle ist und keine Brechung auftritt. Damit ist es ausreichend die Wellenausbreitung in einer Richtung zu betrachten.

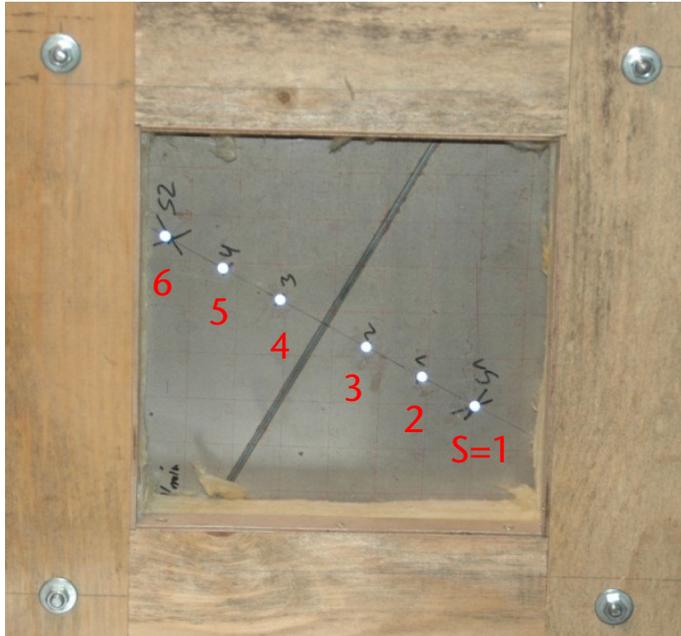


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau. Die Bleche sind an den Randgebieten mit Steinwolle in einem Holzrahmen elastisch gelagert.

### 3 Reflexion und Transmission von Körperschall

An Störstellen in einer Struktur, z.B. Rippen, Querschnittsübergänge, elastische Verbindungen, werden akustische Wellen teilweise reflektiert, transmittiert und dissipiert. In Anlehnung an die Optik werden zur Beschreibung dieser Effekte Reflexions- ( $\rho$ ), Transmission- ( $\tau$ ) und Dissipationskoeffizienten ( $\delta$ ) als Verhältnis zwischen einfallender Energie  $P_+$  und reflektierter Energie  $P_-$  definiert (Gleichung 3.1 bis 3.3, nach [2]).

$$\rho = \frac{P_-}{P_+} \quad 3.1$$

$$\tau = \frac{P_t}{P_+} \quad 3.2$$

$$\delta = 1 - \rho - \tau \quad 3.3$$

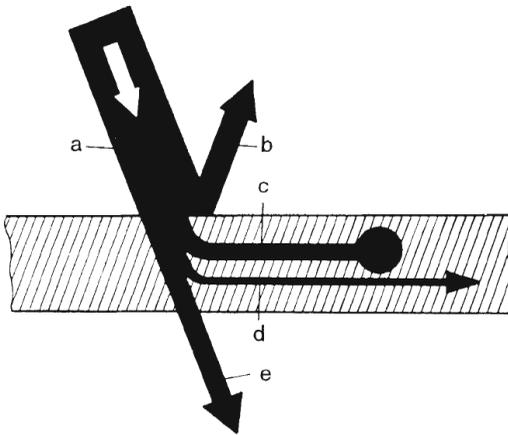


Abbildung 4: Aufteilung einfallender Welle (a) an einer Störstelle. Die akustische Welle wird an der Störstelle teilweise reflektiert (b), dissipiert (c) oder in eine andere Wellenart umgewandelt (d). Ein Teil wird auch durch die Störstelle transmittiert (e). /1/

Der Reflexionskoeffizient kann dabei Werte von -1 bis 1 annehmen. Bei einem Reflexionskoeffizienten von 1 wird die Energie vollständig an der Störstelle reflektiert. Beträgt  $\rho = -1$ , wird ebenfalls die vollständige Energie reflektiert, jedoch mit einer Phasendrehung um  $90^\circ$ . Bei einem  $\rho$  von 0 findet keine Reflexion statt, die Energie wird vollständig dissipiert oder in andere Wellenarten umgewandelt. Welcher Anteil der Energie letztendlich reflektiert wird, ist eine Funktion der mechanischen Impedanzen des Grundmaterials  $Z_0$  und der Störstelle  $Z_j$  (Gleichung 3.4, /2/) sowie der Frequenz der Schwingung.

$$\rho = \frac{P_-}{P_+} = \frac{Z_j - Z_0}{Z_j + Z_0} \quad 3.4$$

Bisher gibt es kein Verfahren, die reflektierte oder transmittierte akustische Energie an einer Störstelle direkt zu messen. Ebenfalls ist es bei sehr kleinen Störstellen fast unmöglich, die mechanische Impedanz zu messen. Um trotzdem eine Aussage zu den reflektierten Energieanteilen zu treffen, verwendet Nilsson in /3/ einen experimentellen Aufbau nach Abbildung 5. Die Anregung erfolgt mit einem Shaker. Zur Messung der Antwort schlägt Nilsson ein berührungsloses Messverfahren an jeweils zwei Messpunkten vor und hinter der Störstelle vor. Mit den vier Antworten ist es möglich, die Energie in einlaufende und reflektierte bzw. transmittierte Anteile aufzuteilen.

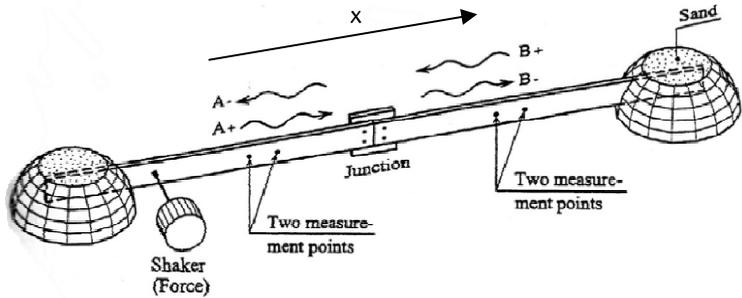


Abbildung 5: Messaufbau zur Bestimmung reflektierter und transmittierter Wellenanteile nach [3]. Ein Blechstreifen, beidseitig in Sand gebettet, wird von einem Shaker angeregt. An vier Messstellen, jeweils zwei vor und hinter der Störstelle, wird die Antwort des Blechstreifens aufgezeichnet.

Die resultierende Amplitude  $w_1$  an Messstelle 1 kann mit einer zur Störstelle laufenden Wellenfront  $A_+$  und einer entgegengesetzt laufenden Welle  $A_-$  nach Gleichung 3.5 beschrieben werden.

$$w_1(x, t) = (A_+ \cdot e^{-i\kappa_1 x} + A_- \cdot e^{i\kappa_1 x}) e^{i\omega t} \quad 3.5$$

$\kappa$  bezeichnet darin die Biegewellenzahl des Blechstreifens und  $\omega$  die Kreisfrequenz der Schwingung. Für einen Messpunkt hinter der Störstelle folgt aus dem gleichen Ansatz:

$$w_2(x, t) = (B_+ \cdot e^{i\kappa_2 x} + B_- \cdot e^{-i\kappa_1 x}) e^{i\omega t} \quad 3.6$$

$B_-$  ist somit die Amplitude einer durch die Störstelle transmittierten Welle und  $B_+$  kennzeichnet eine am Rand reflektierte und damit zurücklaufende Welle. Mit ein wenig Umformung, Einführung von Übertragungsfunktionen  $H_{f1} = \frac{w(x_1)}{F}$ ,  $H_{f2} = \frac{w(x_2)}{F}$ ,  $H_{f3} = \frac{w(x_3)}{F}$ ,

$H_{f4} = \frac{w(x_4)}{F}$  und Annahme gleicher Materialien vor und hinter der Störstelle berechnen sich die Amplituden der verschiedenen Wellenfronten vor und hinter der Störstelle zu:

$$A_+ = F \cdot \frac{e^{i\kappa x_1}}{2i \cdot \sin(\kappa(x_2 - x_1))} \cdot G_1, \quad G_1 = H_{f2} - H_{f1} \cdot e^{-i\kappa(x_2 - x_1)} \quad 3.7$$

$$A_- = F \cdot \frac{e^{i\kappa x_1}}{2i \cdot \sin(\kappa(x_2 - x_1))} \cdot G_2, \quad G_2 = H_{f1} \cdot e^{i\kappa(x_2 - x_1)} - H_{f2} \quad 3.8$$

$$B_+ = F \cdot \frac{e^{i\kappa x_3}}{2i \cdot \sin(\kappa(x_4 - x_3))} \cdot G_3, \quad G_3 = H_{f4} - H_{f3} \cdot e^{-i\kappa(x_4 - x_3)} \quad 3.9$$

$$B_- = F \cdot \frac{e^{i\kappa x_3}}{2i \cdot \sin(\kappa(x_4 - x_3))} \cdot G_4, \quad G_4 = H_{f4} \cdot e^{-i\kappa(x_4 - x_3)} - H_{f3} \quad 3.10$$

Wenn man außerdem die Messstellen symmetrisch zur Störstelle anordnet und  $|x_1| = x_3 = d$  sowie  $|x_2 - x_1| = x_4 - x_3 = s$  setzt, vereinfachen sich die Gleichungen 3.7 bis 3.10 weiter. Gegenseitiges Einsetzen und auflösen des Gleichungssystems führt letztendlich zu:

$$\begin{Bmatrix} R \\ T \end{Bmatrix} = e^{2i\kappa d} \cdot \begin{bmatrix} G_1 & G_3 \\ G_3 & G_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} G_2 \\ G_4 \end{Bmatrix} \quad 3.11$$

Die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten werden mit Gleichung 3.11 definiert zu:

$$\tau = |T|^2 \quad ; \quad \rho = |R|^2 \quad 3.12$$

Nilsson verwendet als anregende Kraft  $F$  eine harmonische Funktion und keinen Impuls. Auch ist das Problem von Nilsson eindimensional, während der vorliegende Aufbau zweidimensional ist. Eine nichtharmonische Anregungsfunktion hat nach Schoch [4] keine Auswirkung auf die Berechnung der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten. Der zweidimensionalen Wellenausbreitung wird durch die Wellenzahl  $\kappa$  für BiegeWellen in dünnen Blechen Genüge getan:

$$\kappa = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{m'}{B'}} \quad 3.13$$

In Gleichung 3.13 ist  $B'$  die Biegesteifheit der Platte und  $m'$  die flächenbezogene Masse. Die Wellenzahl selbst ist in Blechen eine Funktion der Kreiswellenzahl  $\omega$ . Hochfrequente Schwingungen breiten sich demnach schneller in der Struktur aus als Niederfrequente. Dieser Effekt wird allgemein Dispersion genannt.

## 4 Experimentelle Ergebnisse

Die von Nilsson verwendete Methode zur Ermittlung von Reflexions- und Transmissionskoeffizienten führte für das vorliegende Problem nicht zu verwertbaren Ergebnissen. Die Verläufe sind durchgängig gestört durch Ausreiser gegen Unendlichkeit (s. Abbildung 6). Das

kann auftreten, wenn die Wellenfronten  $A_+$  und  $A_-$  nur geringe Unterschiede in der Amplitude aufweisen, was zu numerischer Instabilität der Matrixoperationen führt.

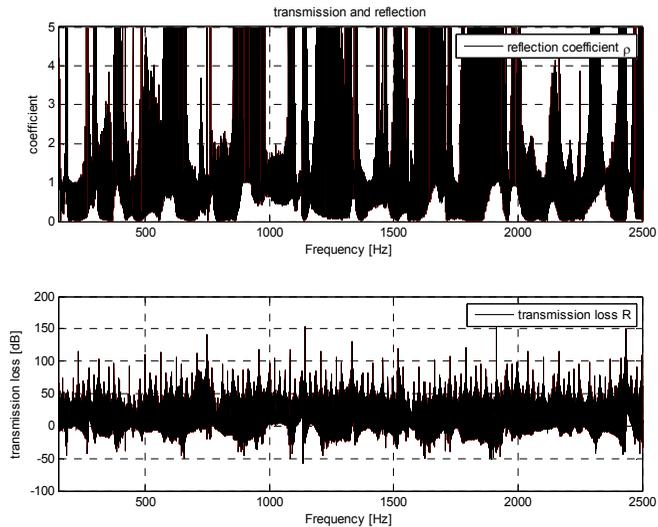


Abbildung 6: Reflexionskoeffizient und Transmissionsverluste für HTC600XD®, Leistung 1kW, Fokus 10 und 2m/min Vorschub.

Eine andere Möglichkeit, den Einfluss der Störstelle zu erfassen lässt sich aus Gleichung 3.4 ableiten. Die Impedanz der Störstelle lässt sich nicht messen, jedoch aber die Impedanz vor- und hinter der Störstelle. Mit diesen Impedanzen lässt sich eine relative Transferimpedanz  $Z_t$  als relativer Widerstand gegen Übertragung einer Schwingung über der Störstelle berechnen:

$$Z_t = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad 4.1$$

Darin beschreibt  $Z_1$  die Übertragungsimpedanz von der Quelle zu einem Messpunkt hinter der Störstelle, die Impedanz  $Z_0$  die Übertragungsimpedanz von der Quelle zu dem entsprechenden symmetrischen Messpunkt vor der Störstelle. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die experimentell ermittelten Verläufe der relativen Transferimpedanz  $Z_t$  für HTC600XD® und LH800® für die verschiedenen Parameter der Wärmebehandlung. Der größte Einfluss der Störstelle ist im Frequenzbereich um 1000Hz und 2000Hz für beide Materialien zu erkennen. Die wärmebehandelten Bleche weisen dabei durchgängig

die höheren Übertragungsimpedanzen auf. Der Widerstand gegen Schwingungen wird also durch die Störstelle erhöht.

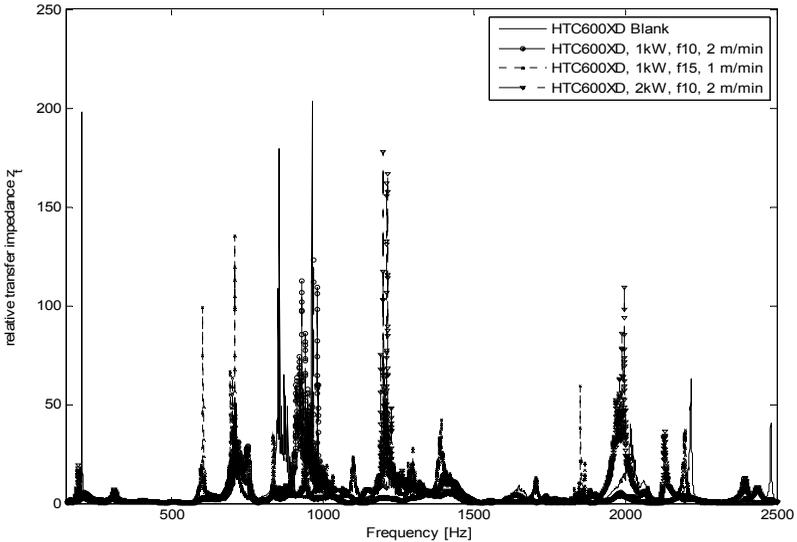


Abbildung 7: Relative Transferimpedanzen für HTC600XD®.

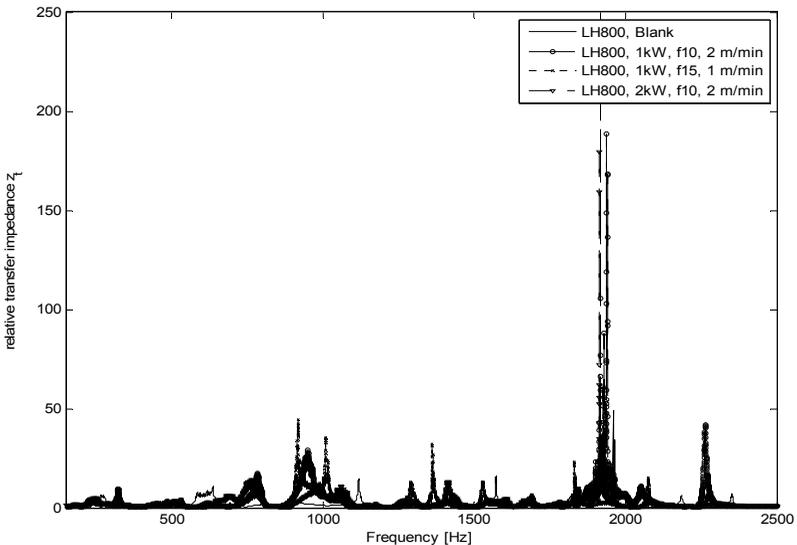


Abbildung 8: Relative Übertragungsimpedanzen für LH800®.

Die Verläufe zeigen außerdem, dass der Einfluss der Störstelle stark bandbegrenzt ist. Mit Variation der Parameter für die lokale Wärmebehandlung kann Einfluss auf das Frequenzband, aber auch auf die absolute Größe des Einflusses genommen werden. Jedoch sind die relativen Transferimpedanzen nicht zwingend größer bei den lokal veränderten Blechen. Daher müssen die Parameter solch einer lokalen Wärmebehandlung auf die Quelle abgestimmt werden, um einen positiven Effekt zu erzielen. Um diese Zusammenhänge in eine anwendbare Form zu überführen muss weitere Forschung durchgeführt werden.

## **5 Zusammenfassung**

Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Störstellen mit lokal veränderten Werkstoffeigenschaften in Blechen das akustische Übertragungsverhalten verändern können. Um die gezeigten Effekte technisch nutzbar zu machen, ist weitere Forschung notwendig, da die genauen Einflüsse der Laserparameter noch nicht ausreichend geklärt sind. Der bandbegrenzte Einfluss der Störstelle hat jedoch Potential, unter Berücksichtigung der Quellencharakteristik, typische Maschinenstrukturen preisgünstig und unsichtbar leiser zu gestalten ohne dabei die Masse zu erhöhen.

## **6 Literatur**

- /1/ Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz, Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2006.
- /2/ Lerch, R., Sessler, D.M., Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- /3/ Nilsson, A.C.: Vibro-Acoustics Part II, TRITA-FKT 2000:15, Stockholm 2000.
- /4/ Schoch, A.: Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung, Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, 23, 1950.