

## Identifikation des vibroakustischen Verhaltens von Leiterplatten

Moritz Hülsebrock<sup>1</sup>, Maximilian Herrnberger<sup>2</sup>, Heiko Atzrodt<sup>3</sup>, Christian Adams<sup>1</sup>, Roland Lichtinger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau,  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM,  
Magdalenenstr. 4, 64289 Darmstadt,

Email: moritz.hulsebrock@sam.tu-darmstadt.de

<sup>2</sup> BMW AG,

Taunusstr. 41, 80809 München

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt

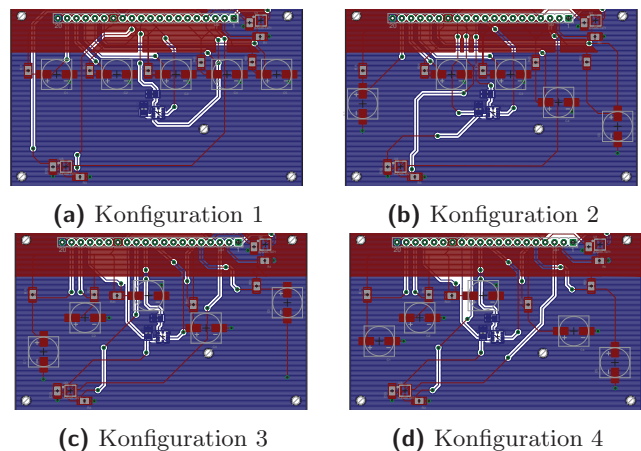
### Einleitung

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges führt neue Komponenten ein, aus denen sich Herausforderungen für eine zuverlässige Konstruktion ergeben. Eine dieser neuen Komponenten ist die Leistungselektronik (LE), die den Gleichstrom (DC) aus der Batterie in Wechselstrom (AC) für den Elektromotor umformt. Im Betrieb sind die Komponenten innerhalb der LE vielfältigen Beanspruchungen ausgesetzt. Hierzu zählen hohe Temperaturen, Temperaturzyklen, Staub und Vibrationen. Abhängig von der jeweiligen Komponente gefährden andere Beanspruchungen den sicheren Betrieb [1]. Die Hauptbelastung für Leiterplatten in der LE kommt von vibroakustischen Anregungen vom Elektromotor oder innerhalb der LE [2, 3]. Die Versagenshäufigkeit aufgrund von Vibrationen kann reduziert werden, indem die Schwingungseigenschaften, wie Eigenfrequenzen und Eigenmoden, bereits im Entwurfsprozess berücksichtigt werden [4]. Die Informationen über das Schwingungsverhalten können weiterhin zum Abgleich mit Finite-Elemente-Modellen genutzt werden. Abgegliche Modelle bieten die Möglichkeit, Entwicklungsprozesse zu beschleunigen und Entwicklungsrisiken zu beherrschen. Das Ziel dieser Arbeit ist, den Einfluss von Leiterbahnen und Kontaktstellen auf das Schwingungsverhalten von Leiterplatten zu untersuchen. Hierzu werden vier verschiedene Leiterplattenkonfigurationen mit derselben Geometrie, aber unterschiedlich gezogenen Leiterbahnen betrachtet. Die Identifikation des vibroakustischen Verhaltens erfolgt mit einer experimentellen Modalanalyse. Die Leiterplatten werden mit einem Lautsprecher im Frequenzbereich von 50 Hz bis 8000 Hz angeregt und die modalen Parameter über eine operationale Modalanalyse ermittelt. Die Messergebnisse weisen daraufhin, dass die Leiterbahnen einen nachweisbaren Einfluss auf das Schwingverhalten haben. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen, um die Zuverlässigkeit von Leiterplatten und den Elektronikkomponenten zu erhöhen.

### Experimentelle Untersuchung des vibroakustischen Verhaltens von Leiterplatten

Für die Bestimmung des Einflusses von Leiterbahnen auf das Schwingungsverhalten von Leiterplatten werden

insgesamt vier Konfigurationen von Leiterplatten untersucht. In Abbildung 1 sind die Leiterplatten abgebildet. Die geometrischen Abmessungen (80 mm x 50 mm) und der Grundaufbau der Leiterplatten sind für jede Konfiguration identisch. Die Konfigurationen unterscheiden sich lediglich in der Anordnung der Kontaktstellen für jeweils fünf Kondensatoren. Das Grundmaterial der Leiterplatten ist FR-4. In der Abbildung rot dargestellt sind die Leiterbahnen und Kontaktstellen für die Kondensatoren. Die Platzierung der Kondensatoren erfolgt, sodass eine möglichst große Variation zwischen den einzelnen Konfigurationen entsteht. Das Bestimmen des vibroakus-



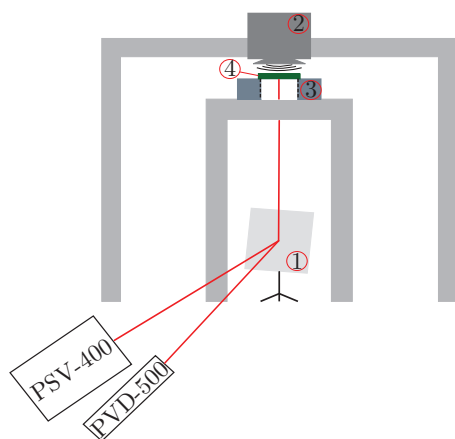
**Abbildung 1:** Darstellung der vier Leiterplattenkonfigurationen mit unterschiedlicher Platzierung der Kontaktstellen

tischen Verhaltens von Leiterplatten ist aufgrund ihres geringen Gewichts eine Herausforderung. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. In [5] ist die Leiterplatte mit Federn frei-frei gelagert und wird mit einem Piezoaktuator und einem Shaker angeregt. Ein weiterer Ansatz ist die fest-fest Lagerung, wie in [6] beschrieben, bei der die Leiterplatte mit Schrauben auf einer Stahlplatte an einem Shaker befestigt ist. Nachteilig bei diesen Ansätzen ist, dass sich im ersten Fall der Masseneinfluss des Shakers und des Piezoaktuators auf das Systemverhalten auswirken und in späteren Simulationen berücksichtigt werden müssen. Im zweiten Fall ist der Einfluss der Anbindungen nur schwierig von dem

Verhalten der Leiterplatte selbst zu isolieren. Die in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchung minimiert den Einfluss der Anregungsquelle auf das Schwingungsverhalten, indem ein Lautsprecher zur Anregung verwendet wird. Die Messung erfolgt kontaktlos über zwei Laser-Doppler-Vibrometer (LDV), um keinen Einfluss auf das Schwingungsverhalten zu nehmen.

### Versuchsaufbau

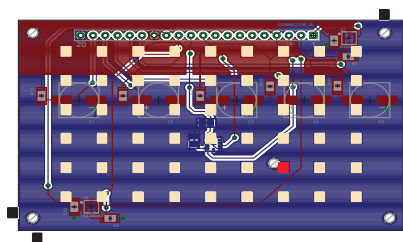
Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Ein Einpunkt-Vibrometer (Polytec PVD 100) und ein Scanning-Vibrometer (Polytec PSV-400) messen die Schwingungsantwort der Leiterplatten. Für die Anregung wird ein Lautsprecher (Visaton AL 200 - 8 Ohm) verwendet. Das Anregungssignal ist ein Chirp-Signal von 50 Hz bis 8000 Hz. Die Prüflinge werden unterhalb des Lautsprechers auf Schaumstoff platziert. Die Messung erfolgt über einen Messspiegel. In Abbildung 2 nicht enthalten sind das analoge Filter (Kemo Benchmaster 21M) und der Verstärker (LMS Q-AMP) für den Lautsprecher.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Prüfstandes mit 1) Messspiegel, 2) Lautsprecher Visaton AL 200, 3) Schaumstoff, 4) Leiterplatten Prüfling

Von allen vier Konfigurationen werden jeweils fünf Prüflinge untersucht. Zur statistischen Absicherung der Versuche wird jeder Prüfling fünfmal vermessen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit sind Nadeln in den Schaumstoff gesteckt, um die gleichmäßige Positionierung der Leiterplatten zu ermöglichen. Bei der Positionierung wird darauf geachtet, dass die Nadeln die Leiterplatte möglichst nicht berühren, um das Schwingungsverhalten nicht zu beeinflussen. In Abbildung 3 sind die Messpunkte, der Referenzpunkt sowie die zur Positionierung verwendeten Nadeln abgebildet. Insgesamt werden 54 Messpunkte gemessen. Der Referenzpunkt ist in der Abbildung in rot dargestellt. Es erfolgt eine Mittelung über fünf Messungen an jedem Messpunkt. Die Frequenzschrittweite beträgt 0,1563 Hz.

Aufgrund der Anregung mit dem Lautsprecher ist es nicht möglich, eine Übertragungsfunktion zwischen der Anregung und der Systemantwort zu bestimmen. Aus diesem Grund wird für die operationale Modalanalyse das Kreuzleistungsspektrum der von den Laser-Vibrometern gemessenen Geschwindigkeitssignalen verwendet. Das gemessene Zeitsignal wird zunächst mit ei-



**Abbildung 3:** Darstellung der Verteilung der 54 Messpunkte, des Referenzpunkts (hellrot) und der Nadeln (schwarz) zur Positionierung der Leiterplatten auf dem Schaumstoff

nem Rechteckfenster gefaltet. Anschließend erfolgt eine Fourier-Transformation, um das Signal in den Frequenzbereich zu transformieren. Die Bestimmung des Kreuzleistungsspektrums erfolgt über

$$S_{XY}(f) = X^*(f)Y(f). \quad (1)$$

In Gleichung 1 entspricht  $X^*$  dem Fourier transformierten Beschleunigungssignal des Einpunkt-Laser-Vibrometers und  $Y$  dem Fourier transformierten Geschwindigkeitssignal des Scanning-Laser-Vibrometers.

### Experimentelle Ergebnisse

Es wird angenommen, dass zwischen den Prüflingen innerhalb einer Konfiguration nur geringe Varianz besteht. Daher sind in Abbildung 4 die gemittelten Frequenzgänge der vier Konfigurationen abgebildet. Die gemittelten Frequenzgänge berechnen sich aus den gemessenen Kreuzleistungsspektren der insgesamt 25 Messungen pro Konfiguration. In der Abbildung ist zu erkennen, dass im Bereich bis 2000 Hz nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen bestehen. Für die erste Biegeschwingung bei ca. 1000 Hz ist lediglich eine Differenz in der Amplitude zu beobachten. Der Frequenzbereich bis 2000 Hz weist darüber hinaus eine höhere Dichte an Überhöhungen auf als der Frequenzbereich von 2000 Hz bis 8000 Hz. Die Unterschiede zwischen den Konfigurationen werden für höhere Frequenzen deutlicher. Die Differenz zwischen den Konfigurationen 2 und 4 sind hierbei am größten. Die Abbildung weist darauf hin, dass die Konfiguration 2 weicher als Konfiguration 4 ist, was anhand der niedrigeren Frequenz der Überhöhungen im Frequenzspektrum zu erkennen ist. Weiterhin zu beobachten ist, dass die Konfiguration 1 und 3 über ein breites Frequenzspektrum von ca. 4500 Hz bis 6800 Hz ein ähnliches Verhalten aufweisen.

Für weitere Analysen werden die modalen Parameter aus den einzelnen Messungen ermittelt. Die Auswertung der Kreuzleistungsspektren erfolgt über den operational Polymax Algorithmus [7]. Im Anschluss erfolgt ein Abgleich zwischen den Messungen einer Konfiguration. Dies erfolgt mithilfe eines modifizierten Modal Assurance Criterion (MAC). Das modifizierte MAC berücksichtigt neben den Eigenvektoren ebenfalls die Eigenfrequenzen, um eine automatisierte Zuordnung zu erleichtern. Der modifizierte MAC lässt sich über

$$(1 - \gamma)MAC_{rs} - \gamma \frac{|\omega_s - \omega_r|}{\omega_s} \quad (2)$$

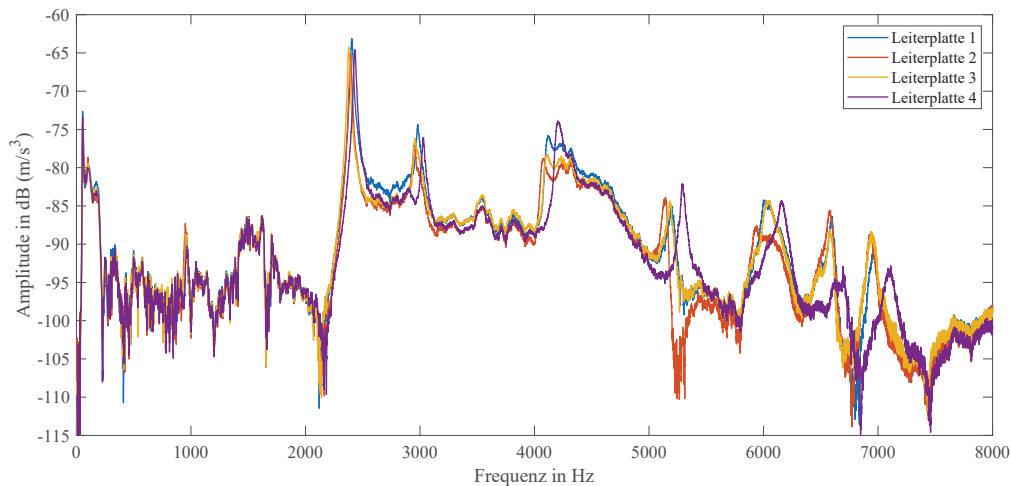


Abbildung 4: Summenfrequenzgänge der vier Leiterplatten-Konfigurationen gemittelt aus jeweils 25 Einzelmessungen

beschreiben [9], wobei  $\omega_s$  und  $\omega_r$  den Eigenkreisfrequenzen der jeweiligen Eigenmoden entsprechen. Der Faktor  $\gamma$  gewichtet den Einfluss der Eigenkreisfrequenzen zum MAC und wird hier zu  $\gamma = 0.2$  gesetzt, um den Einfluss der Eigenfrequenzen gering zu halten. Insgesamt können für die Konfigurationen 1 bis 3 neun und für die Konfiguration 4 acht Eigenmoden identifiziert werden. Der Abgleich zwischen den Konfigurationen untereinander erfolgt über das klassische MAC [8]. Eine Zuordnung erfolgt bei einem Wert von  $MAC > 0.9$ . Für geringer Werte wird keine Übereinstimmung zwischen den Moden angenommen.

Zur Analyse der Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen wird die mittlere Eigenfrequenz einer Eigenmode über alle Konfigurationen berechnet und dann die Abweichung der Konfigurationen zu diesem Mittelwert bestimmt. Darüber hinaus wird die Varianz der Messungen innerhalb einer Konfiguration ermittelt. Die mittleren Eigenfrequenzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Mittlere identifizierte Eigenfrequenzen  $\bar{f}$  der vier Leiterplatten Konfigurationen

Mode	1	2	3	4	5
$\bar{f}$ in Hz	956,3	2399,3	2988,3	3519,4	4121,5
Mode	6	7	8	9	
$\bar{f}$ in Hz	5206,9	6009,6	6554,8	6922,6	

In Abbildung 6 ist für jede der identifizierten Eigenmoden der Abstand zur mittleren Eigenfrequenz sowie die Varianz innerhalb der Konfiguration dargestellt. Das in Abbildung 4 beobachtete Verhalten lässt sich ebenfalls in den identifizierten Eigenmoden erkennen. Im Vergleich zu den anderen Konfigurationen weist Konfiguration 2 im Durchschnitt deutlich niedrigere Eigenfrequenzen auf, wohingegen Konfiguration 4 ab Mode 5 im Mittel deutlich höhere Eigenfrequenzen als die übrigen Konfiguratio-

nen aufweist. Anhand des Abstandes zum Mittelwert und der Varianz innerhalb der jeweiligen Konfiguration kann beurteilt werden, ob sich die Konfigurationen hinsichtlich ihrer Schwingungseigenschaften unterscheiden lassen. Aufgrund der Varianz der identifizierten Eigenmoden ist eine klare Unterscheidung schwierig. Lediglich in Mode 7 sind die identifizierten Eigenmoden klar voneinander getrennt, sodass eine Zuordnung möglich ist. Die Eigenform der Mode 7 ist in Abbildung 5 dargestellt. Beim Vergleich mit Abbildung 1 ist zu erkennen, dass Konfiguration 4 im Bereich des Maximums zwei Kontaktstellen für Kondensatoren hat und somit steifer ist als die übrigen Konfigurationen. Auch die weitere Reihenfolge (Konfiguration 3, Konfiguration 1, Konfiguration 2), auf Basis der Höhe der gemessenen Eigenfrequenzen, lässt sich über die Lage der Kontaktstellen im Bereich des Maximums erklären. Konfiguration 3 hat ebenfalls zwei Kontaktstellen in diesem Bereich, wobei eine davon um 90 Grad gedreht ist im Vergleich zu Konfiguration 4. Die im Vergleich zu den übrigen Konfigurationen geringe Eigenfrequenz der Mode 7 von Konfiguration 2 ist auf das Fehlen einer Kontaktstelle im Bereich des Maximums zurückzuführen.

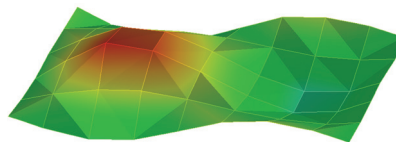
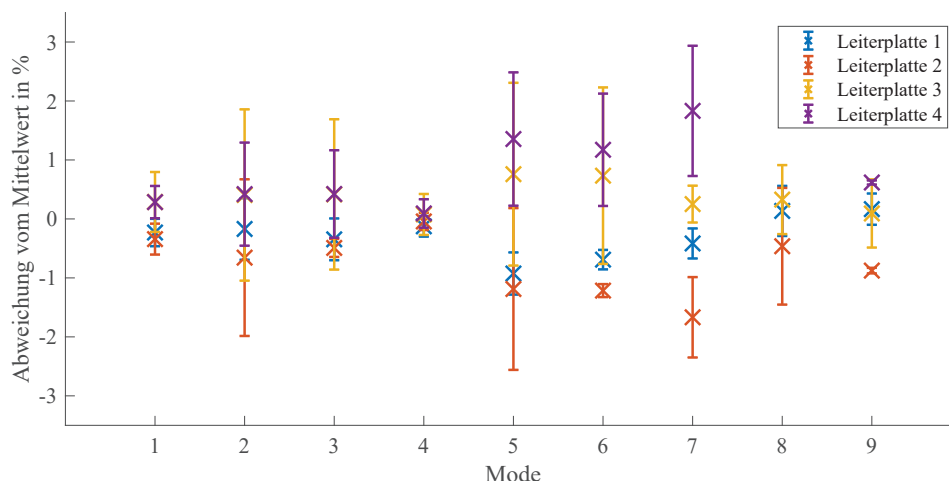


Abbildung 5: Darstellung der Eigenform der Mode 7 bei 6009,6 Hz

### Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss von Leiterbahnen und Kontaktstellen auf das Schwingungsverhalten von Leiterplatten. Insgesamt werden vier Konfigurationen der Leiterplatte untersucht. Die Leiterplatten haben alle dieselben geometrischen Abmessungen, lediglich die Platzierung der Komponenten auf der Leiterplatte unterscheidet sich. Von jeder Leiterplatte wer-



**Abbildung 6:** Verteilung der Messergebnisse bezogen auf die durchschnittlichen Eigenfrequenzen an den Moden 1 bis 9

den jeweils fünf Prüflinge untersucht. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wird jeder Prüfling fünfmal vermessen. Aufgrund des geringen Gewichts der Leiterplatten und dem zu untersuchenden Frequenzbereich von 50 Hz bis 8000 Hz erfolgt die Anregung über einen Lautsprecher. Insgesamt können neun Eigenmoden im Frequenzbereich von 956 Hz bis 6922 Hz identifiziert werden. Die Frequenzen der identifizierten Eigenmoden der einzelnen Konfigurationen unterscheiden sich nur geringfügig. Lediglich in einer Eigenmode lassen sich die Konfigurationen klar voneinander unterscheiden. Die Eigenform an dieser Mode weist ein Maximum in einem Bereich der Leiterplatte auf, in der sich die Konfigurationen deutlich voneinander unterscheiden. Hieraus lässt sich auf einen Einfluss der Leiterbahnen und Kontaktstellen auf das Schwingungsverhalten schließen. Durch ein gezieltes Platzieren von Komponenten kann so das Schwingungsverhalten der Leiterplatten verändert werden.

Für weitere Untersuchungen muss das identifizierte Schwingungsverhalten mit numerischen Simulationsmodellen abgeglichen werden. Hierfür werden die Leiterplatten-Konfigurationen in eine kommerzielle Simulationssoftware importiert. Im Anschluss erfolgt eine Anpassung der Modellparameter über einen Modellabgleichalgorithmus. In weitergehenden Untersuchungen sollen die Leiterplatten mit Komponenten untersucht werden. Hierbei steht die weitere Untersuchung des Einflusses der Platzierung von Komponenten auf das Schwingungsverhalten im Vordergrund. Das Ziel ist es, die jeweiligen Einflüsse zu isolieren, sodass Aussagen anhand von numerischen Berechnungen erstellt werden können. Darüber hinaus erfolgt eine weitere Analyse der Messdaten. Hierbei steht die Untersuchung der Varianz der Schwingungseigenschaften innerhalb einer Konfiguration im Vordergrund.

## Literatur

[1] Falck, J., Felgemacher, C., Rojko, A., Liserre, M., Zacharias, P.: Reliability of power electronic systems: An industry perspective. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Aufl. 12 (2018), S. 24–35

- [2] Karppinen, J.S., Li, J, Paulasto-Krockel, M.: The effects of concurrent power and vibration loads on the reliability of board-level interconnections in power electronic assemblies, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Aufl. 13 (1) (2013), S. 167–176
- [3] Herrnberger, M., Hülsebrock, M: Akustische Anregungsquellen in hochintegrierten Leistungselektroniken mobiler Antriebe, In *DAGA 2019*, Rostock, 18.–21. März (2019), S. 192–195
- [4] Agletti, G.S.: A lighter enclosure for electronics for space applications, In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Aufl. 216 (3) (2002), S. 131–142
- [5] Zukowski, E., Kimpel, T., Kraetschmer, D., Roessle, A.: Efficient modeling of printed circuit boards structures for dynamic simulations, In *16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, 19.–22.- April (2015)
- [6] Krasnoveikin, V.A., Yu Smolin, I., Druzhinin, N.V., Kolubaev, E.A., Derusova, D.A.: Modal testing circuit board assembly of an electronic apparatus by laser vibrometry, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Aufl. 156 (1) (2016), S. 1–7
- [7] Peeters, B., Van der Auweraer, H.: PolyMAX: A revolution in operational modal analysis, In *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark, 26.–27. April (2005), S. 41–52
- [8] Ewins, D.J.: *Modal Testing: Theory and Practice*. Aufl. 10, Baldock : Research Studies Press (2000)
- [9] Petersen, Ø.W. and Øiseth, O.: Sensitivity-based finite element model updating of a pontoon bridge, *Engineering Structures*, Aufl. 150 (2017), S. 573–584