

# Reduktion von Störeinflüssen auf einen Prüfstand für optische Systeme

Dr.-Ing. **Carsten Schedlinski**, ICS Engineering GmbH, Dreieich;  
Dr. **Carsten Marzok**, Dr. **Ulfert Wiesendahl**, Carl Zeiss SMT GmbH,  
Oberkochen

## 1. Einleitung

Die Carl Zeiss SMT GmbH ist bekannt für Präzisionsoptikkomponenten im Bereich der Halbleiterfertigung. Um die erforderliche hohe Produktreue der Komponenten zu gewährleisten, werden verschiedene Qualitätssicherungsschritte im Rahmen der Fertigung durchlaufen.

Bei einem dieser Qualitätssicherungsschritte werden mit Hilfe eines speziellen Prüfstands, Leistungsparameter bestimmter Produkte überprüft. Unter ungünstigen Umgebungsbedingungen kann dabei mitunter eine nicht erwartete Performance des Produkts bei den Leistungstests festgestellt werden. In diesen Fällen ergibt eine Wiederholung der Leistungstests zu einem späteren Zeitpunkt zu günstigeren Umgebungsbedingungen die erwartungsgemäße Performance und damit den Nachweis der Konformität des untersuchten Systems. Die bei den ersten Leistungstests beobachtete Nichtkonformität kann externen Störungen und nicht tatsächlichen Leistungsabweichungen des Produkts zugeschrieben werden. Da eine Wiederholung von Leistungstests sowohl zeit- als auch kostenaufwändig ist und darüber hinaus den Gesamtdurchsatz des Prüfstands verringert, wurden Vibrations- und Akustikmessungen als Grundlage zur Ermittlung der Störquellen für die Abweichungen der Testläufe durchgeführt. Insbesondere Betriebsdaten wurden dabei mit Hilfe von Spektral- und Transferpfadanalysen (TPA) untersucht, um schließlich geeignete Verbesserungsmaßnahmen entwickeln und umsetzen zu können.

In dieser Veröffentlichung werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Testkampagne selber vorgestellt sowie erste umgesetzte Maßnahmen gezeigt. Hieran wird aufgezeigt, wie eine intelligente Kombination moderner experimenteller Techniken dazu beitragen kann, die Leistung heutiger technischer Systeme zu optimieren.

## 2. Durchgeführte Messungen

Für einen speziellen Prüfstand wurden Vibrations- und Schallmessungen unter Reinraumbedingungen durchgeführt. Der Prüfstand selbst besteht aus einer elastisch gelagerten

Granitplatte, die einen Prüfling sowie Messgeräte trägt. Während der durchgeführten Messungen befand sich der Prüfstand im Betrieb und Leistungsparameter (z.B. Regelfehler) wurden zeitsynchron mitgemessen. Neben definierten Frequenzgangs- bzw. Übertragungswegmessungen (siehe z.B. [1]) mittels Kraft- (Modalhammer) und Luftschallanregungen (zwei Schallquellen, eine für tiefe Frequenzen - LFM - und eine für höhere Frequenzen - HFM, siehe auch [3]) wurden auch Betriebsschwingungsversuche durchgeführt. Bild 1 zeigt typische Kraft- und Schallquellenanregungen, während Abbildung 2 einen repräsentativen Betriebslastfall mit einem Hubwagen zeigt.

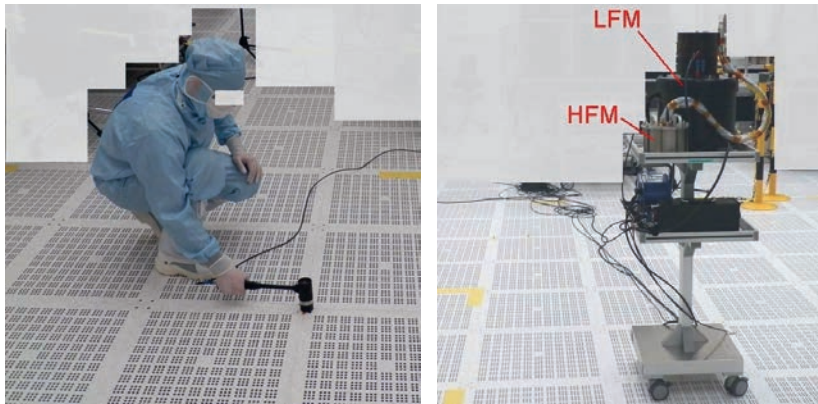


Bild 1: Anregung mit Modalhammer (links) und Schallquellen (rechts)



Bild 2: Betriebsanregung (Hubwagen mit beladener Palette)

### 3. Datenanalyse

Aufgrund der hohen Komplexität der Beziehungen zwischen Kraft- und Schallanregung sowie der daraus resultierenden strukturellen Antworten und Leistungsparameter wurde die Auswertung der Messdaten in drei Phasen unterteilt:

1. Allgemeine Bewertung von Zeitdaten und Spektralinformationen
2. Pegel- und Spektralanalyse
3. TPA

#### 3.1 Allgemeine Bewertung von Zeitdaten und Spektralinformationen

Die allgemeine Auswertung von Zeitdaten und Spektralinformationen dient der grundlegenden Analyse der Signalinhalte der Betriebsmessungen auf Basis ausgewählter Messsignale. Bild 3 zeigt beispielsweise die Antworten im Zeitbereich von zwei repräsentativen Beschleunigungssensoren (einer auf dem Boden nahe eines Gestellfußes und einer auf der Granitplatte selbst, die elastisch vom Boden entkoppelt ist), einem Mikrofon und einem typischen Leistungsparameter (Regelfehler), infolge Betriebsanregung mittels Hubwagen. Es ist festzustellen, dass am Boden und auf dem Granit sowie am Mikrofon signifikante Antworten zu erkennen sind, die direkt mit den Störungen durch den vorbeifahrenden Hubwagen korreliert sind. Für den Regelfehler ist ein ähnliches Verhalten festzustellen, das jedoch aufgrund des Rauschniveaus des Reglers weniger ausgeprägt erkennbar ist.

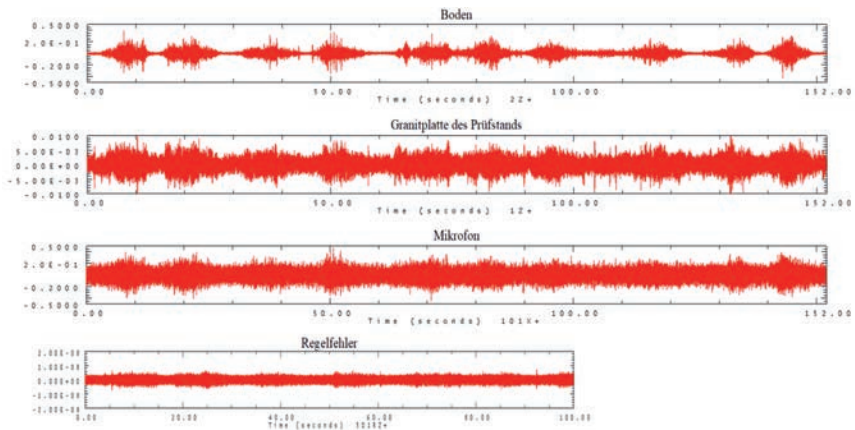


Bild 3: Zeitbereichsantworten bei Hubwagenfahrt (mit beladener Palette)

In Bild 4 ist ein Vergleich der Spektralinhalte auf Grundlage von gemittelten Power Spectral Densities (PSDs) zwischen einer Leerlaufmessung und zweier Hubwagenmessungen dargestellt. Man erkennt, dass im unteren Frequenzbereich durch die Hubwagenfahrten eine deutliche Amplitudenzunahme des Spektrums stattfindet (siehe Markierung in rot).

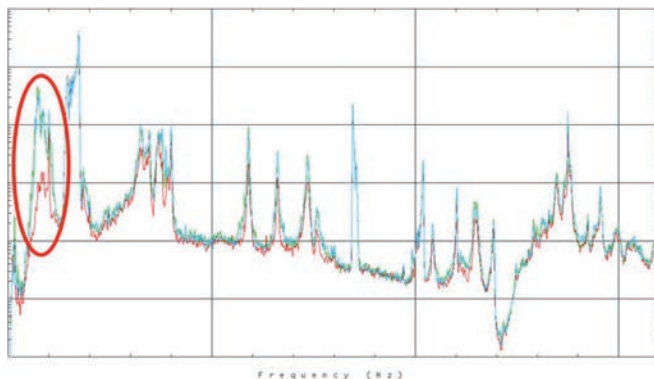


Bild 4: PSDs der Regelfehler bei Leerlaufmessung (rot) ggü. Hubwagenfahrten (grün/blau)

### 3.2 Pegel- und Spektralanalyse

Um weitere Einblicke zu erhalten, wurden spezielle Pegel- und Kurzzeitspektralanalysen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die Messungen mit bekannter Anregung (Kraft- bzw. Schallanregung) mit Leerlaufmessungen verglichen, um die grundsätzlichen Auswirkungen beider Anregungsvarianten zu beurteilen.

Bei Krafterregung sind die Hammerimpulse am Boden in der Nähe des Prüfstandes deutlich (siehe Bild 5) und noch - geschwächt - auf der Granitplatte sichtbar. Auf dem auf dem Prüfstand montierten Prüfling können Effekte eher für Sensor 1 als für Sensor 2 festgestellt werden. Bei einem repräsentativen Mikrofon sind praktisch keine Effekte zu beobachten. Der Regelfehler (Bild 6) zeigt jedoch wieder relativ deutlich die Hammerimpulse. Die Auswirkungen der Schallanregung sind am Boden nur schwach erkennbar (Bild 7). Die Hauptanteile liegen im unteren Frequenzbereich, wie bereits oben aus den allgemeinen Spektralinformationen hervorgeht (siehe auch PSDs in Bild 4). Die Granitplatte zeigt praktisch keine Effekte. Für den auf dem Prüfstand montierten Prüfling lassen sich im Gegensatz zur Krafterregung eher für Sensor 2 als für Sensor 1 Effekte feststellen. Für das Mikrofon (Bild 8) und den Regelfehler (Bild 9) zeigen sich jedoch relativ deutliche Störungen.

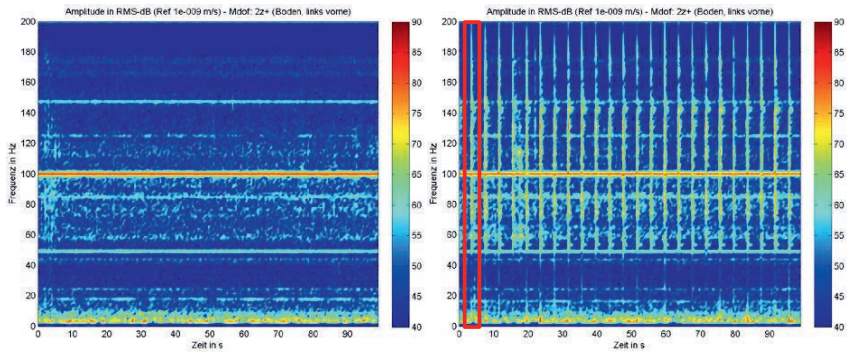


Bild 5: Sensor am Boden, links: Leerlaufmessung/rechts: *Hammer*anregung am Boden

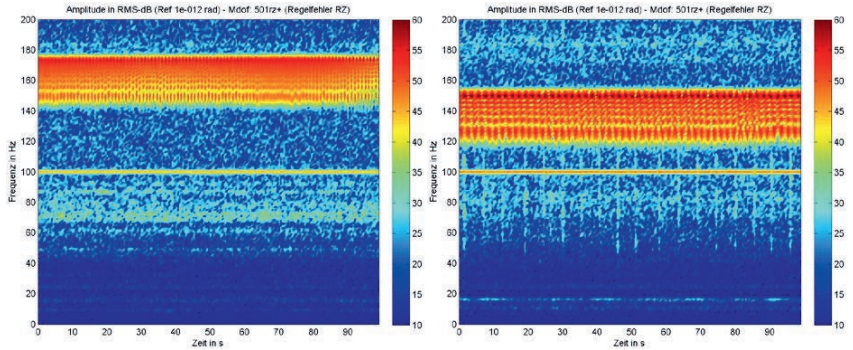


Bild 6: Regelfehler, links: Leerlaufmessung/rechts: *Hammer*anregung am Boden

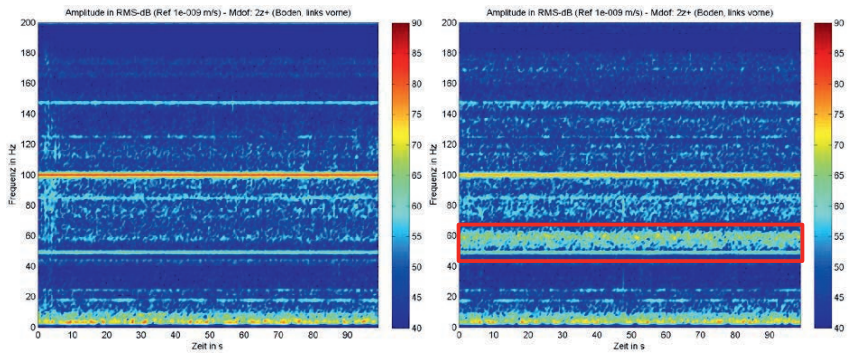


Bild 7: Sensor am Boden, links: Leerlaufmessung/rechts: *Schall*anregung



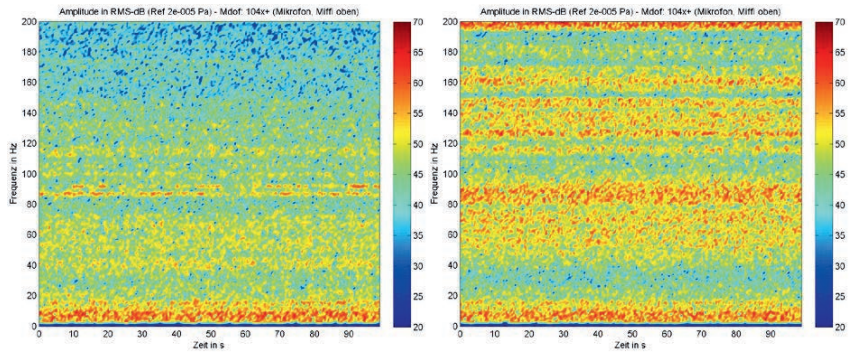


Bild 8: Mikrofon, links: Leerlaufmessung/rechts: *Schallanregung*

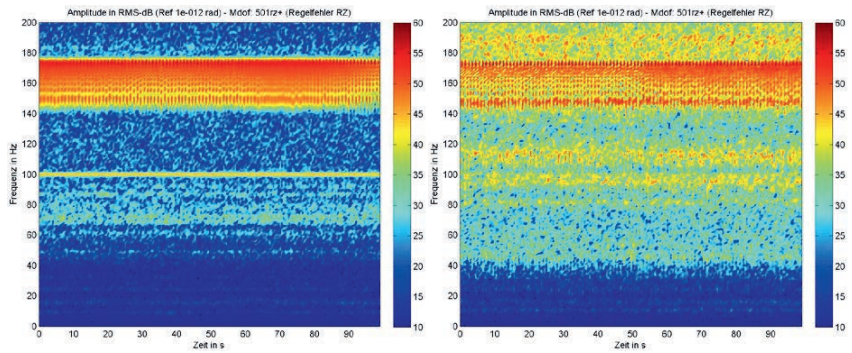


Bild 9: Regelfehler, links: Leerlaufmessung/rechts: *Schallanregung*

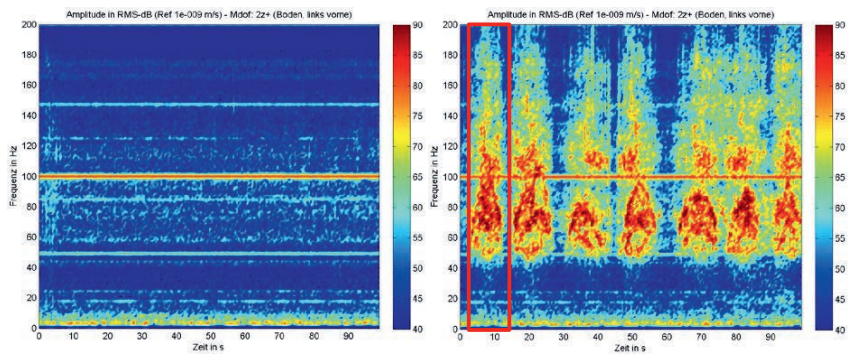
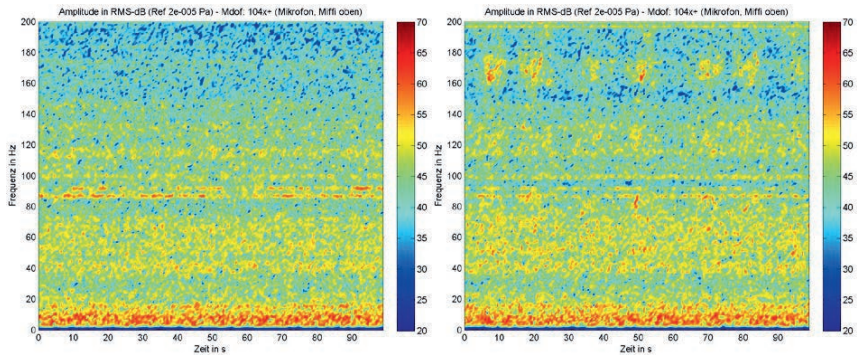
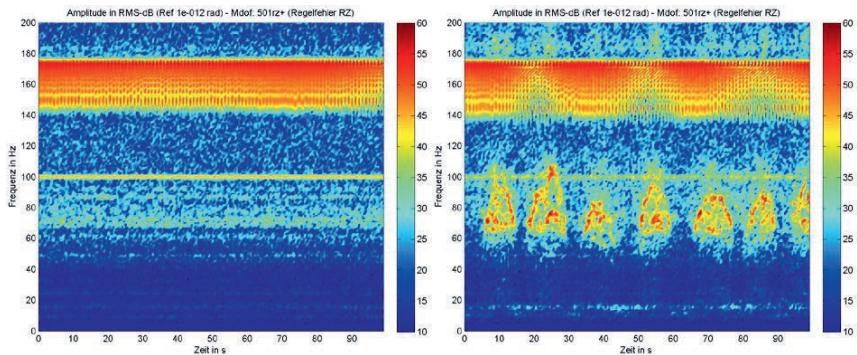


Bild 10: Sensor am Boden, links: Leerlaufmessung /rechts: Betrieb mit *Hubwagen*

Bild 11: Mikrofon, links: Leerlaufmessung /rechts: Betrieb mit *Hubwagen*Bild 12: Regelfehler, links: Leerlaufmessung /rechts: Betrieb mit *Hubwagen*

Für die Betriebsmessung (hier mit vorbeifahrendem Hubwagen) sind die Signaturen des vorbeifahrenden Hubwagens auf allen Messsignalen mehr oder weniger deutlich sichtbar (siehe Bilder 10 bis 12).

### 3.3 TPA

Zusätzlich zu den Pegel- und Spektralanalysen wurde ein TPA mittels Matrixinversionstechnik durchgeführt (siehe z.B. [1], [2]). Dabei werden zunächst Frequenzgangfunktionen ausgewählter potentieller Übertragungswege (kurz „Pfade“) gemessen, aus denen anschließend (über eine Inversion der Frequenzgangfunktionsmatrix) mit Hilfe gemessener Betriebsantworten Erregungskräfte identifiziert werden können. Ausgehend von diesen Kräften ist es möglich, einzelne Komponenten der Systemantwort aufzuschlüsseln, um

schließlich die Bedeutung der einzelnen Pfade zu beurteilen. Bild 13 zeigt die mit dem TPA-Modell identifizierten Kräfte. Die Rückrechnungen für einen exemplarischen Zielsensor am Prüfling und für den Regelfehler sind in Bild 14 dargestellt. Für den Regelfehler veranschaulicht Bild 15 die einzelnen Pfadbeiträge zur Gesamtantwort.

Zunächst ist zu erkennen, dass die Rückrechnungen die Eigenschaften der ursprünglich gemessenen Signale sehr gut abbilden. Für den Regelfehler sind im oberen Frequenzbereich größere Abweichungen zu beobachten, die durch das Reglerrauschen in diesem Frequenzbereich erklärt werden können.

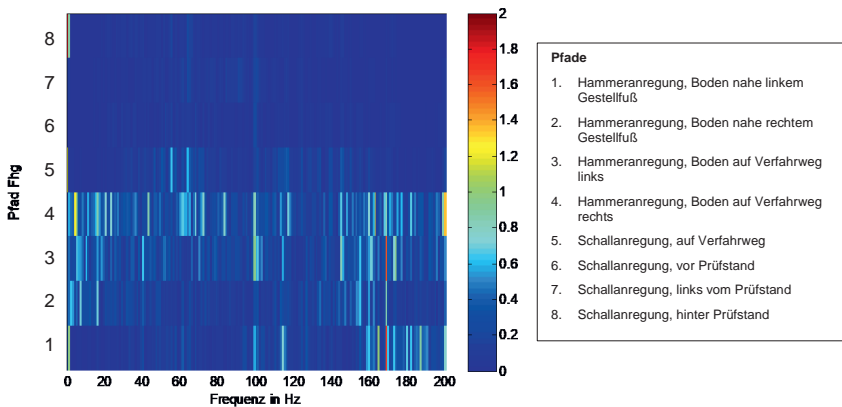


Bild 13: TPA-Ergebnisse – identifizierte Kräfte

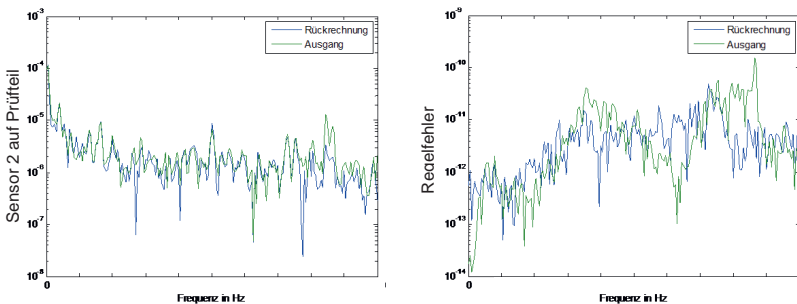


Bild 14: TPA-Ergebnisse – links: gemessene/rückgerechnete Signale für Sensor auf Prüfteil, rechts: gemessene/rückgerechnete Signale für den Regelfehler



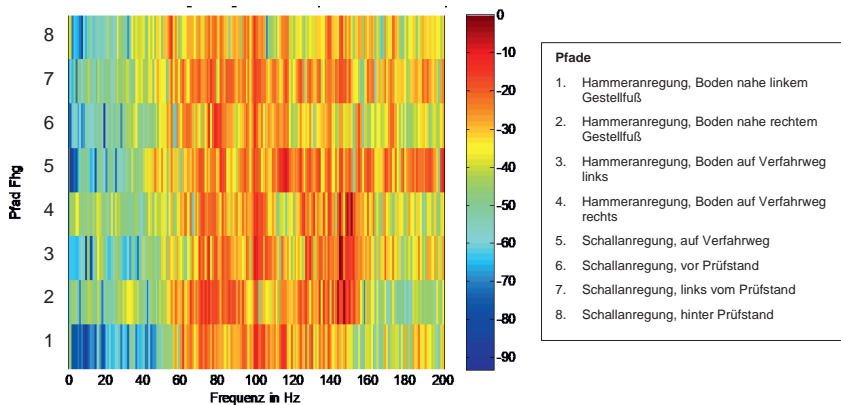


Bild 15: TPA-Ergebnisse – Beiträge der Pfade zum Gesamtsignal

Insgesamt ist zu beobachten, dass sich keiner der Pfade besonders von den anderen abhebt. Daraus lässt sich also keine Präferenz für strukturelle oder akustische Anregung ableiten. Ein Grund dafür könnte sein, dass beide Anregungsvarianten zu Regelfehlern führen können, weshalb sie in beiden Fällen grundsätzlich über entsprechende Wege und zugehörige Kräfte angeregt werden können (→ nicht eindeutige Kraftidentifikation).

#### 4 Testergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Regelfehler durch typische Betriebsituationen in der Umgebung des Prüfstandes ausgelöst werden können. Dies ist sowohl auf Zeit- als auch auf Spektraldaten deutlich zu erkennen. Darüber hinaus können durch die zeitliche Auflösung der Signalinhalte mittels kurzfristiger Spektralanalysen typische Betriebs-signaturen identifiziert werden. Diese Signaturen können je nach Anregungsart mit unterschiedlicher Intensität auf den einzelnen Komponenten des Prüfstandes selbst sowie auf den Schalldrücken und schließlich auf den Regelfehlern beobachtet werden. Bei genauer Betrachtung der Signaturen bzw. deren Ausprägung an den verschiedenen Messstellen lässt sich allerdings eine primäre Störung durch die Schallanregung ableiten.

#### 5 Reduktion der Schallanregung

Zur Reduktion der Einflüsse von Schallanregung auf die Leistungstests, die auf dem Prüfstand durchgeführt werden, wurde in der Folge eine spezielle Schallschutzeinhausung entwickelt. Bild 16 zeigt den Prüfstand inklusive Einhausung.

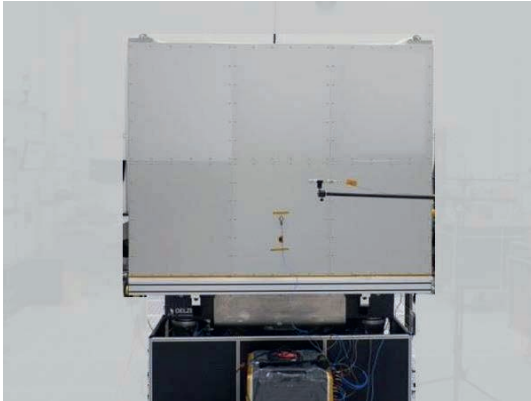


Bild 16: Prüfstand mit Einhausung

In Bild 17 sind schließlich typische Pegeldifferenzen sowie Regelfehler bei Schallanregung im Fahrweg ohne (rot) und mit (grün) neuer Einhausung gezeigt. Die Verbesserung, die durch die neue Einhausung erzielt werden kann, ist dabei deutlich zu erkennen.

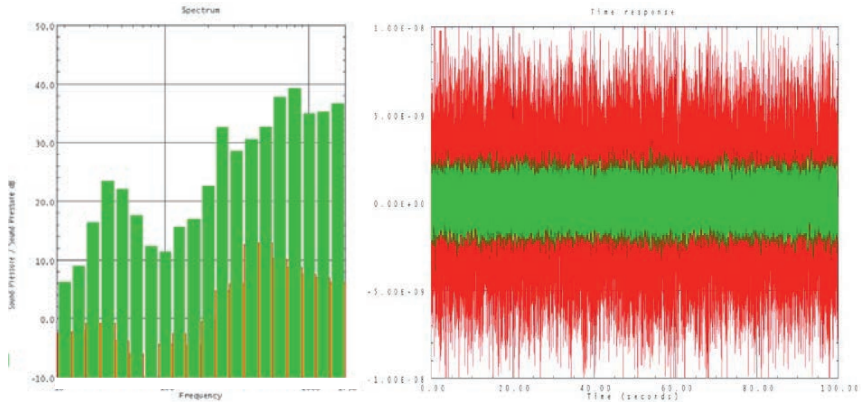


Bild 17: Links: Terzanalyse der Pegeldifferenz (Mikrofon oben) – (Mikrofon innen) bei Schallanregung im Fahrweg; rechts: Typische Verbesserung des Regelfehlers

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

An einem Prüfstand wurden Schwingungs- und Schallmessungen durchgeführt. Dabei wurden Beschleunigungen am Boden und am Prüfstand, Schalldrücke in unmittelbarer Nähe

und Regelfehler gemessen. Insbesondere die Regelfehler können als Maß für die Auswirkungen von externen Störungen angesehen werden. Die Anregung erfolgte nacheinander sowohl durch definierte Kraft- und Schallanregung an mehreren Stellen als auch durch typische Betriebslasten.

Es wurde festgestellt, dass der tägliche Betrieb vor den Prüfständen deutlich erkennbare Auswirkungen auf die Regelfehler haben kann. Diese Störungen finden sich auch bei den gemessenen Strukturbeschleunigungen und (teilweise) bei den Schalldrücken. Eine klare Trennung der einzelnen Erregungswege (strukturell oder durch Luft) über TPA ist in diesem Fall nicht vollständig möglich - im Prinzip haben beide Varianten das Potenzial, die Störungen einzeln und auch in Kombination zu verursachen. In der Gesamtbetrachtung kann jedoch eine gewisse Präferenz auf den Luftweg festgestellt werden.

Zur Reduzierung der auftretenden Störungen wurde als primäre Maßnahme daher eine akustische Einhausung zur Entkopplung des Prüfstandes von der akustischen Umgebung entwickelt. Die Wirksamkeit wurde in der Folge durch zusätzliche Messungen überprüft, und es zeigt sich, dass insbesondere der Regelfehler deutlich reduziert werden kann.

### **Danksagung**

Die Autoren danken der Carl Zeiss SMT GmbH für die Unterstützung dieser Arbeit und die Genehmigung zur Präsentation der Ergebnisse.

### **Literatur**

- [1] D. J. Ewins, Modal testing: theory, practice and application, 2nd edition, Research Studies Press Ltd. (2000)
- [2] M. V. van der Seijs, D. de Klerk, D. J. Rixen, General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques, MSSP 68-69 (2016), Seiten 217-244
- [3] Microflown Technologies, Products|Sources, Webseite: <https://www.microflown.com/products/sources-vvs/> (2019)