

Über dieses Dokument

Inhalt

Das vorliegende Dokument ist die vierte von fünf Application Notes über die Transferpfadanalyse (TPA). Im ersten Kapitel sind praktische Hinweise zur Sensorik zusammengestellt. Die folgenden Kapitel enthalten Anmerkungen zur Durchführung der Transferfunktions- und Betriebsmessungen. Das letzten Kapitel listet potenzielle Fehlerquellen auf.

1. Sensorik	1
Mikrofone	1
Beschleunigungssensoren	2
2. Bestimmung der Körperschall-Übertragungsfunktionen	3
Messung der Übertragungsfunktion mit einem Impulshammer	4
Messung der Übertragungsfunktion mit einem Shaker	5
Transferfunktionsmatrix	6
3. Durchführung der Betriebsmessung	7
4. Mögliche Fehlerquellen	7

Zielgruppe

Der nachfolgende Text wendet sich insbesondere an (potenzielle) Anwender¹ der ArtemiS SUITE, die sich mit den Grundlagen der TPA vertraut machen wollen.

Fragen?

Sie haben Fragen? Wir freuen uns über Ihre Rückmeldungen!

Fragen zum Inhalt dieses Dokument: Imke.Hauswirth@head-acoustics.com

Technische Fragen zu unseren Produkten: SVP-Support@head-acoustics.com

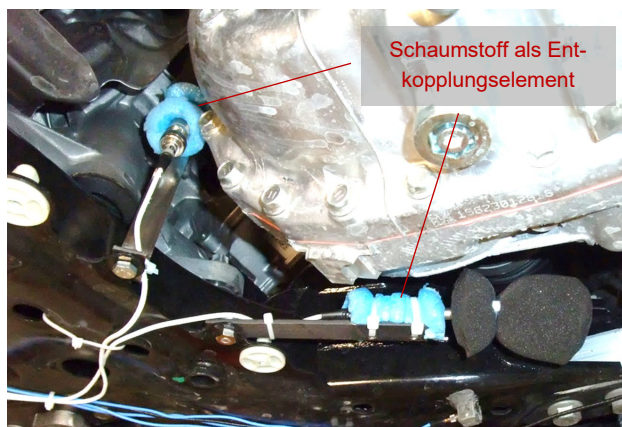
Transferpfadanalyse – Praktische Hinweise

1. Sensorik

Mikrofone

Mikrofonbefestigung

Zur Aufnahme der benötigten Luftschallsignale werden Mikrofone eingesetzt. Zur Befestigung der Mikrofone eignen sich z. B. Mikrofonständer, Magnete oder Verschraubungen. Um körperschall-induziertes Übersprechen zu vermeiden, sollten die Mikrofone nicht direkt an der Quelle bzw.



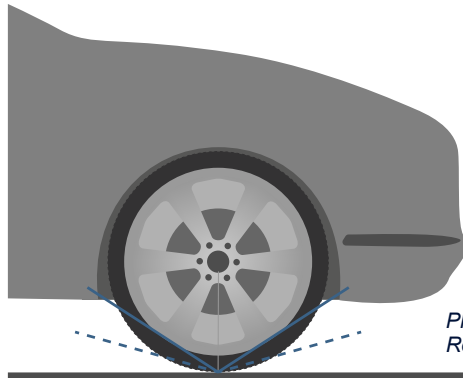
Mikrofonbestigung mit Entkopplung

¹ Im nachfolgenden Text wird verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Dies soll ausschließlich der besseren Lesbarkeit dienen. Selbstverständlich möchten wir gleichermaßen alle Geschlechter ansprechen bzw. einbeziehen.

am Messobjekt befestigt werden. Ist dies nicht zu umgehen, muss mit Entkopplungselementen, beispielsweise Schaumstoffen, gearbeitet werden.

Mikrofonplatzierung

Zur Bestimmung des Schalldrucks im Nahfeld der Quelle sollten die Mikrofone ungefähr 10–15 cm von der Quell-Oberfläche entfernt positioniert sein. Für die Messung an Strömungsöffnungen (z. B. Ansaugung und Abgasendrohr) darf das Mikrofon nicht direkt im Luftstrom platziert werden. In der Praxis hat sich die Ausrichtung im 45°-Winkel zur Öffnung bewährt. Für die Aufzeichnung von Reifengeräuschen im Ein- und Auslauf des Reifens sollten die Mikrofone mittig, so nah wie möglich am Aufstandspunkt, aber mindestens ca. 10 cm von diesem entfernt, positioniert werden.



Platzierung von Mikrofonen zur Messung von Reifengeräuschen

Platzierung von Mikrofonen zur Messung von Reifengeräuschen im Ein- und Auslauf des Reifens sollten die Mikrofone mittig, so nah wie möglich am Aufstandspunkt, aber mindestens ca. 10 cm von diesem entfernt, positioniert werden.

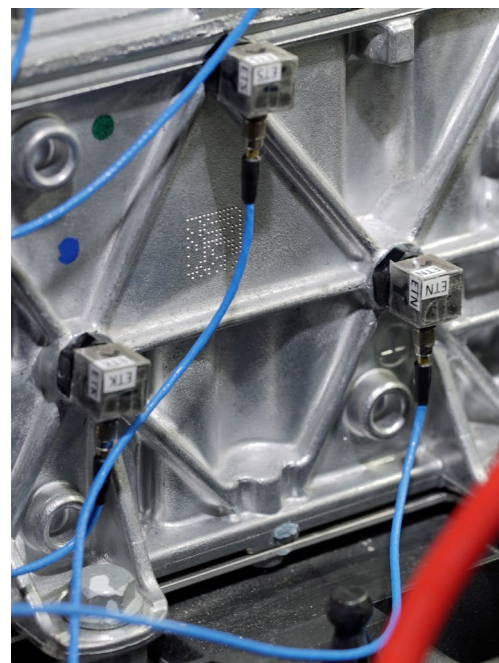
Mikrofondurchmesser

Am häufigsten werden bei der TPA Schalldruckmikrofone mit Kugelcharakteristik verwendet. Der Durchmesser der eingesetzten Mikrofone beträgt meist $\frac{1}{4}$ bzw. $\frac{1}{2}$ Zoll. $\frac{1}{4}$ “-Mikrofone können Signale mit einem guten Signal-Rausch-Abstand aufzeichnen. Wird für die anschließenden Auswertungen ein höherer Signal-Rausch-Abstand benötigt, werden meist $\frac{1}{2}$ “-Mikrofone eingesetzt. Allerdings lassen sich mit diesen Mikrofonen nicht so hohe Schalldrücke wie mit $\frac{1}{4}$ “-Mikrofonen aufzeichnen. Die Auswahl des Mikrofonen richtet sich also nach der Aufgabenstellung.

Beschleunigungssensoren

Körperschallsignale werden häufig mit Beschleunigungsaufnehmern aufgezeichnet. Meist werden piezoelektrische Beschleunigungssensoren eingesetzt. Bei diesen wird durch die Beschleunigung einer Masse, die an ein Piezoelement gekoppelt ist, eine elektrische Ladung erzeugt. Die Nutzung der IEPE-Technologie (Integrated Electronics Piezo Electric) reduziert die Störanfälligkeit, so dass auch bei langen Kabeln zum Sensor eine hohe Signalqualität erreicht werden kann.

IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric)



Beschleunigungssensoren an eine Teststruktur

Charge Sensoren

Alternativ werden – je nach Anwendungsgebiet – auch ladungskapazitive Sensoren (Charge Sensors) verwendet. Diese trennen die Rolle des eigentlichen Sensors und des Signalverstärkers. Dies hat den Vorteil, dass die Verstärker komplexer aufgebaut werden können. Der Nachteil dieser Sensoren ist jedoch, dass das Sensorsignal ggf. über lange Kabel bis zum Verstärker transportiert wird.

Befestigung

Beschleunigungssensoren können auf verschiedene Arten befestigt werden, z. B. mit Magneten, Wachs, Klebstoff oder Verschraubungen. Die Auswahl der Ankopplung hat unmittelbare Auswirkungen auf den Frequenzbereich, der mit dem Sensor messbar ist. Für eine haltbare, temperaturbeständige Verbindung bei den TPA-Messungen werden die Beschleunigungsaufnehmer meist an das Messobjekt geklebt. Beim Anbringen der Sensoren muss sichergestellt werden, dass diese vom Messobjekt elektrisch entkoppelt sind. Um die geklebten Sensoren nach der Messung nicht zu beschädigen, müssen diese zum Ablösen gedreht werden. Alle Sensoren, die für Klebefestigung geeignet sind, haben eine sechseckige Grundplatte, sodass – falls nötig – zum Ablösen ein Maulschlüssel verwendet werden kann.

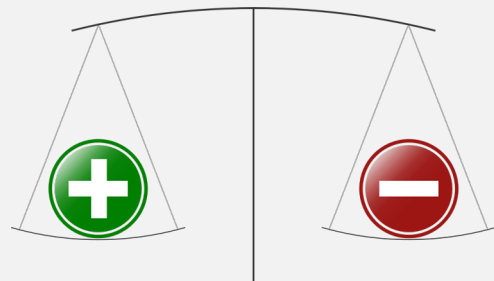
2. Bestimmung der Körperschall-Übertragungsfunktionen

Impulshammer und Shaker

Die Bestimmung der statischen Körperschall-Übertragungsfunktionen erfolgt meist mit einem Impulshammer oder einem Shaker. Bei der Anregung mit einem Impulshammer werden Kraftimpulse über Hammerschläge in die Struktur eingeleitet, um diese breitbandig anzuregen. Ein Impulshammer besitzt einen Kraftsensor, der die beim Anschlagen eingebrachte Kraft misst. Shaker bestehen in der Regel aus einer Schwingquelle sowie einem Kraftsensor, um die eingeleitete Kraft aufzuzeichnen. Für die Anregung wird das Shakersystem mit einem Anregungssignal gespeist. Beide Anregungsarten besitzen spezifische Vor- und Nachteile:

Vorteile Impulshammer (verglichen mit Shaker)

- Schnell einsatzbereit, geringerer Zeitaufwand, geringere Kosten
- Keine Querkräfte
- Einfachere Anregung hoher Frequenzen



Nachteile Impulshammer (verglichen mit Shaker)

- Signal-Rausch-Abstand meist geringer
- größere Anfälligkeit für Rauschen insbesondere während des Abklingens der Struktur nach der Impulsanregung
- höheres Risiko für nichtlineares Verhalten der Struktur (z. B. durch Verformung)

Vorteile Shaker (verglichen mit Impulshammer)

- Hoher Signal-Rausch-Abstand durch die kontinuierliche Anregung über einen längeren Zeitraum
- Individuelles Anregungssignal mit wählbarem Frequenzbereich
- Messung von stark gedämpften Systemen möglich

Nachteile Shaker (verglichen mit Impulshammer)

- Höherer Installations-/ Vorbereitungs Aufwand
- Höhere Kosten

Messung der Übertragungsfunktion mit einem Impulshammer

Messung mit einem Impulshammer

Das Kraftspektrum, das mit einem Impulshammer in eine Struktur eingebracht werden kann, ist abhängig von der Struktur am Anschlagpunkt und der Stärke der Krafteinleitung. Dabei gilt: Je kürzer der eingeleitete Impuls, desto breiter das Frequenzspektrum der Kraft.

Nutzung von Fensterfunktionen

Um Nichtlinearitäten zu vermeiden, sollte die Krafteinleitung so gering wie möglich sein. Wird dadurch der Signal-Rausch-Abstand zu klein, muss die Krafteinleitung etwas erhöht werden oder ein empfindlicherer Sensor verwendet werden. Ist das Signal der Kraftanregung verrauscht, vermindert dies die Aussagekraft der Transferfunktion. Durch Verwendung einer Fensterfunktion, die den Kraftimpuls passieren lässt und ansonsten den Wert 0 ausgibt, lässt sich der Rauschanteil minimieren. Um den Leakage-Effekt zu reduzieren, muss die Fensterfunktion zum Rand auf 0 abklingen.

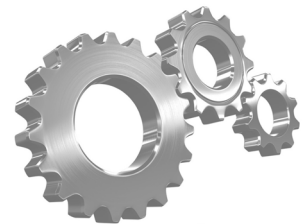
Störuschen im Antwortsignal

Auch die Systemantwort auf den Kraftimpuls, also die Beschleunigungssignale, können mit Rauschen behaftet sein. Besonders während des Abklingens der Struktur nach der Impulsanregung erschwert die Überlagerung von Systemantwort und Rauschen deren Unterscheidung. Störuschen in den Antwortsignalen tritt häufig auf, wenn Krafteinleitungspunkt und Messpunkt weit auseinander liegen. Mit geeigneter Sensorik und passenden Fensterfunktionen kann der Störgeräuschanteil in den Antwortsignalen deutlich reduziert werden. Typischerweise werden Fenster mit Exponentialfunktionen verwendet.

Parameter für die Messung

Wichtige Parameter für die Impulshammermessung:

- Trigger:** Üblicherweise wird auf das Signal des Impulshammers getriggert. Durch Testschläge können die Höhe der eingeleiteten Kraft vorab bestimmt und der Triggerpegel korrekt eingestellt werden. Die Triggerrichtung ist in den meisten Fällen die ansteigende Flanke des Kraftsignals. Damit der Anfang des Kraftimpulses nicht abgeschnitten wird, sollte unbedingt ein Pre-Trigger verwendet werden (5–10% der Aufnahmedauer).
- Aufnahmedauer:** Die Aufnahmedauer wird meist in 2^n Samples angegeben (z. B. $2^{12} = 4096$, $2^{13} = 8192$, $2^{14} = 16384$). Die optimale Aufnahmedauer ist abhängig vom Messobjekt. Daher sollten zunächst einige ungetriggerte Testschläge aufgezeichnet und die Abklingzeiten der Systemantworten analysiert werden. Bei kurzen Abklingzeiten kann die Aufnahmedauer entsprechend kurz gewählt werden und umgekehrt. Je größer die Aufnahmedauer gewählt wird, desto höher ist die Frequenzauflösung der resultierenden Transferfunktionen.
- Wiederholungen:** Jeder Messpunkt sollte mehrmals mit dem Impulshammer angeschlagen und die Messungen gemittelt werden. Üblich sind 5–6 Anschläge pro Messpunkt. Durch die Mittelung werden unkorreliertes Rauschen reduziert und die Ergebnisse statistisch abgesichert.
- Aussteuerung:** Eine optimale Aussteuerung aller Kanäle verbessert die Genauigkeit der TPA-Ergebnisse. Der Messbereich muss so klein wie möglich (→ hoher Signal-Rausch-Abstand) und so groß wie nötig (→ keine Übersteuerung) gewählt werden.



Verbesserung der Kohärenz

Eine aussagekräftige Übertragungsfunktion lässt sich nur dann bestimmen, wenn durch den Impulshammer ausreichend Energie eingeleitet werden konnte und die Messung eine hohe Kohärenz zwischen Anregung und Systemantwort im relevanten Frequenzbereich aufweist. Folgenden Maßnahmen helfen Kohärenzeinbrüche zu reduzieren:

- Anpassung der Fenster-Funktionen für Anregungs- und Antwortsignal
- Härtere Hammerspitze (wenn die Kohärenz bei hohen Frequenzen verrauscht und das Kraftsignal durch Rauschen überdeckt ist)
- Positionierung des Anschlags bei Wiederholung (d. h. bei Wiederholung möglichst exakt dieselbe Position anschlagen)

Sind nur vereinzelte Kohärenzeinbrüche im Kraftspektrum vorhanden, sind die Ursache hierfür meist Anti-Resonanzen der Struktur.

Unterschiede der Hammerspitzen

Zeigt das Kraftspektrum keine Anregung im relevanten Frequenzbereich, kann dies eventuell durch einen Wechsel der Hammerspitze geändert werden. Es gilt:

- Gummispitze für tiefe Frequenzen
- Plastik-Spitze für mittlere Frequenzen
- Stahlspitze für hohe Frequenzen

Doppelschlag

Ist das Kraftspektrum im relevanten Frequenzbereich nicht ausreichend konstant, wurde wahrscheinlich mehr als ein Impuls pro Analyseblock aufgezeichnet. Die Messung muss dann wiederholt werden.

Spektrum bei hohen Frequenzen

Das Kraftspektrum sollte zu hohen Frequenzen abfallen. Ist dies nicht der Fall, wurde das System wahrscheinlich mit zu hohen Frequenzen angeregt, was zu Nichtlinearitäten führen kann. Andererseits sollte es nicht zu stark abfallen, da sonst das Grundrauschen das Kraftsignal überdeckt.

Korrekte Verwendung eines Shakers

Messung der Übertragungsfunktion mit einem Shaker

Auch bei der Messung der Übertragungsfunktionen mit Shakeranregung müssen einige Punkte berücksichtigt werden. Zum Beispiel:

- Die Ankopplung des Shakers an die Struktur darf deren dynamisches Verhalten nicht beeinflussen. Die Teststruktur muss sich trotz Shaker frei bewegen können.
- Die Krafteinleitung durch den Shaker sollte nur in der gewünschten Richtung erfolgen. Zur Vermeidung von Querkräften wird z. B. ein Stinger für die Kraftübertragung vom Shaker zur Struktur verwendet.



Ankopplung eines Shaker mit Stinger

Kann aufgrund von Platzmangel oder bei sehr leichten Strukturen kein großes Shakersystem verwendet werden, bietet sich der Einsatz der Qlws Lightweight Shaker von Qsources zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen an.



Qlws Lightweight Shaker von Qsources

Signale zur Shakeranregung

Für die Anregung wird das Shakersystem mit einem Anregungssignal gespeist. Folgende Signale eignen sich für die Bestimmung der Transferfunktion mittels Shaker:

- transiente oder zufallsbasierte Signale mit kontinuierlichen Spektren, wie Pure Random Noise oder Burst Random Noise (kontinuierliches Rauschen, das nur für eine bestimmte Zeit innerhalb des Messblocks aktiv ist)
- periodische Signale mit diskreten Spektren, wie Pseudo Random Noise, Periodic Chirp (Sinus mit variabler Frequenz über der Zeit) oder Stepped Sine (diskrete Anregung bei einzelnen Frequenzen)

Nutzung von Fensterfunktionen

Abhängig von der Signalart muss zur Verbesserung der Signalqualität das aufgezeichnete Zeitsignal des Shakers gefenstert werden.

Transferfunktionsmatrix

Position der Krafteinleitung

Wie oben beschrieben werden zur Bestimmung der Körperschall-Transferfunktionen definierte Kräfte mit einem Impulshammer oder Shaker in die Struktur eingeleitet. Die Position dieser Krafteinleitung sollte so nah wie möglich an der tatsächlichen Position der Krafteinleitung im Betriebsfall liegen. Je besser die Punkte übereinstimmen, desto genauer kann die Kraft im Betrieb beschrieben werden.

Überdeterminierte Matrizen

Für das Matrix-Inversionsverfahren ist eine Matrix mit guter Matrixkonditionierung entscheidend. Um die Matrixkondition zu optimieren, kann die Matrix überbestimmt und / oder regularisiert werden. Für die Überbestimmung müssen Beschleunigungen an mehr Antwortpositionen bestimmt werden, als zur Beschreibung des Systems nötig sind. Ein üblicher Richtwert ist eine doppelt so große Anzahl von Antwortpositionen wie Anregungspunkte.

3. Durchführung der Betriebsmessung

Betriebsmessungen mit aktiver Quelle

Die Betriebsmessungen werden mit aktiver Quelle ausgeführt (z. B. auf einem Prüfgelände oder Prüfstand). Alle Luft- und Körperschallkanäle werden dabei synchron aufgezeichnet. Dies erlaubt die Bestimmung und Berücksichtigung der Phasenbeziehung zwischen den verschiedenen Pfaden. Zusätzlich können weitere Messgrößen, z. B. Drehzahl, Drehmoment und CAN, aufgezeichnet werden.



Rollenprüfstand der HEAD acoustics GmbH

Auswahl der Betriebszustände

Bei der Durchführung der TPA im Zeitbereich besteht keine Beschränkung auf stationäre Betriebszustände. Die Quelle sollte in jedem kritischen Betriebszustand betrieben und die entstehenden Schalldrücke und Beschleunigungen aufgezeichnet werden. Kritische Betriebsbedingungen sind meist solche, in denen ein Störgeräusch auftritt.

4. Mögliche Fehlerquellen

Benennung der Aufnahmen

Die Datenmenge, die bei der TPA gemessen, analysiert und organisiert werden müssen, ist sehr groß. Um bei der Auswertung keine Fehler zu machen, müssen die einzelnen Messungen sicher unterschieden und den richtigen Messpunkten zugewiesen werden können. Das TPA-Projekt in der ArtemiS SUITE unterstützt den Anwender bei dieser Aufgabe.

Systematische Fehler

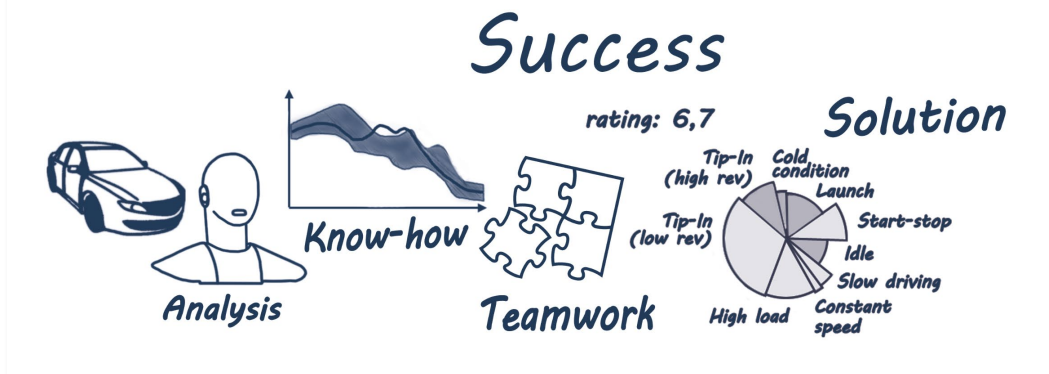
Systematische Fehler bei der TPA können z. B. folgende Ursachen haben:

- Die Beschleunigungssensoren können in der Praxis, beispielsweise an realen Fahrzeugen, aufgrund von Platzmangel nicht genau so platziert werden, wie theoretisch angenommen.
- Aufgrund beengter räumlicher Verhältnisse können bestimmte Messpunkte weder mit einem Impulshammer oder Shaker richtig erreicht werden. Die Krafteinleitung erfolgt dann nicht exakt in x, y- bzw. z-Richtung. Die resultierenden Übertragungsfunktionen sind dann fehlerbehaftet und verfälschen die Ergebnisse in nicht unerheblichem Maß. Als Folge können die im realen Betrieb auftretenden Kräfte nicht ausreichend genau modelliert werden.
- Abhängigkeiten von sich ändernden Betriebsbedingungen (z. B. Änderung der Temperatur während des Betriebs), die in der Modellierung nicht ausreichend berücksichtigt werden können, verursachen Abweichungen.
- Eine weitere häufige Fehlerquelle ist die, dass Beschleunigungen im Betrieb auf der Seite der Empfängerstruktur meist nicht nur durch die eigentlich zu untersuchende Quelle verursacht werden. Bei einem Fahrzeug werden z. B. die karoserieseitigen Beschleunigungen nicht allein durch den Motor verursacht, sondern auch durch das Abrollen der Reifen. Werden diese Beschleunigungen ursächlich der Quelle zugeschrieben, kommt es zu Abweichung bei der Modellierung des Gesamtgeräusches und der Geräuschanteile.

Engineering Services von
HEAD acoustics

Im Rahmen dieser Application Note kann natürlich nur eine Auswahl von praktischen Tipps und möglichen Fehlerquellen aufgelistet werden. Sie gibt daher nur einen kurzen Einblick in die Thematik.

Die Engineering Services von HEAD acoustics können Sie umfassender bei Ihren TPA-Projekten unterstützen. Kontaktieren Sie unsere Experten, um von unserer langjährigen Erfahrung und Expertise zu profitieren: engineering@HEAD-acoustics.com



➔ Weiter zur [fünften Application Note über Transferpfadanalyse](#) mit Hinweisen zur Modellvalidierung