

Über dieses Dokument

Inhalt

Das vorliegende Dokument ist die dritte von fünf Application Notes über Transferpfadanalyse (TPA). Es beschreibt im ersten Kapitel das grundsätzliche Vorgehen bei einer In-Situ-TPA. Die nachfolgenden Kapitel zeigen einige Werkzeuge, die von HEAD acoustics für die praktische Durchführungen der TPA zur Verfügung gestellt werden.

1. In-Situ-TPA mit Matrix-Inversion _____ 1
2. Das TPA-Projekt in ArtemiS SUITE _____ 6
3. Zusatzinformation durch Betriebsschwingungsanalyse _____ 9
4. OTPA mit Prognose _____ 9
5. Auralisation und Hörversuche _____ 10

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 – In-Situ-TPA, Werkzeuge

1. In-Situ-TPA mit Matrix-Inversion

Antriebsstrang-TPA

In diesem Kapitel werden das prinzipielle Vorgehen und die Messungen für die In-Situ-TPA mit Matrix-Inversion am Beispiel einer Antriebsstrang-TPA genauer beschrieben. Bei dieser TPA werden Motor und Getriebe als Quelle betrachtet. Die Antriebsstranglager und die Fahrzeugkarosserie bilden den passiven Teil der Struktur. Die Empfängerposition ist das Fahrerohr. Für die gehörrichtige Wiedergabe wird an der Empfängerposition mit einem Kunstkopfmikrofon gemessen und die Übertragungswege zum linken und rechten Ohr werden modelliert (binaurale TPA, BTPA).



Beispiel für einen Empfängersensor:
Kunstkopfmesssystem zur Durchführung einer BTPA

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.

Übersprechkompensation

Bei der Durchführung der TPA an einer Fahrzeugkarosserie muss beachtet werden, dass die Karosserie ein gekoppeltes System ist, so dass eine Krafteinleitung an einer Stelle zu messbaren Systemantworten an der gesamten Karosserie führt. Um die eingeleiteten Kräfte und somit die Geräuschbeiträge der verschiedenen Pfade richtig abschätzen zu können, muss dieses Übersprechen in den Übertragungsfunktionsmatrizen berücksichtigt werden. Indem die Übertragungsfunktionen zu allen relevanten Punkten bestimmt werden, kann eine Übertragungsfunktionsmatrix aufgestellt werden, die das Übersprechen kompensiert. Wird kein Übersprechen berücksichtigt, müssen nur die Übertragungsfunktionen der Diagonalen bestimmt werden. Wird bei einem Körperschallpfad nur das Übersprechen innerhalb eines Einleitungspunktes berücksichtigt, also z. B. das Übersprechen der X-Richtung auf die Y- und Z-Richtung desselben Punktes, müssen die 3x3-Blöcke der Diagonalen berücksichtigt werden. Die Betrachtung der kompletten Matrix ist nötig, wenn auch das Übersprechen zwischen allen Punkten berücksichtigt werden soll.

$$I = \begin{pmatrix} I_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I_{2,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I_{3,3} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{4,4} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{5,5} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{6,6} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & I_{M,N} \end{pmatrix}$$

$$I = \begin{pmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & I_{1,3} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ I_{2,1} & I_{2,2} & I_{2,3} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ I_{3,1} & I_{3,2} & I_{3,3} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{4,4} & I_{4,5} & I_{4,6} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{5,4} & I_{5,5} & I_{5,6} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{6,4} & I_{6,5} & I_{6,6} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & I_{M,N} \end{pmatrix}$$

$$I = \begin{pmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & I_{1,3} & I_{1,4} & I_{1,5} & I_{1,6} & \dots & I_{1,N} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & I_{2,3} & I_{2,4} & I_{2,5} & I_{2,6} & \dots & I_{2,N} \\ I_{3,1} & I_{3,2} & I_{3,3} & I_{3,4} & I_{3,5} & I_{3,6} & \dots & I_{3,N} \\ I_{4,1} & I_{4,2} & I_{4,3} & I_{4,4} & I_{4,5} & I_{4,6} & \dots & I_{4,N} \\ I_{5,1} & I_{5,2} & I_{5,3} & I_{5,4} & I_{5,5} & I_{5,6} & \dots & I_{5,N} \\ I_{6,1} & I_{6,2} & I_{6,3} & I_{6,4} & I_{6,5} & I_{6,6} & \dots & I_{6,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M,1} & I_{M,2} & I_{M,3} & I_{M,4} & I_{M,5} & I_{M,6} & \dots & I_{M,N} \end{pmatrix}$$

Inertanzmatrizen mit und ohne Übersprechkompensation

Überbestimmte Matrix

Bei der Matrix-Inversion kann die Berücksichtigung des Übersprechens allerdings problematisch sein, sofern das Gleichungssystem nicht korrekt konditioniert ist. Die Matrix-Konditionierung kann durch Überbestimmung – auch Überdeterminierung genannt – verbessert werden. Für eine überbestimmte Matrix werden mehr Antwort- als Eingangspositionen erfasst. Das heißt, bei M Beschleunigungssensoren und N Krafteinleitungspunkten ist $M > N$. Eine überbestimmte Matrix mit mehr Zeilen als Spalten kann allerdings nicht mehr direkt invertiert werden. In diesem Fall wird für die folgenden Berechnungen die Pseudoinverse der Matrix bestimmt. Die Singulärwertzerlegung ist ein verhältnismäßig einfaches Hilfsmittel zur Berechnung der Pseudoinversen und das für die TPA am häufigsten verwendete.

Die Formeln auf den nächsten Seiten stellen die Zusammenhänge vereinfacht dar. Wird zum Beispiel im Zeitbereich gearbeitet, müssen zunächst jeweils die Impulsantworten der Übertragungsfunktionen bestimmt werden. Die Zeitsignale der Eingangsgrößen werden dann im weiteren Verlauf mit diesen Impulsantworten gefaltet. Um die Lesbarkeit der Formeln zu erhöhen und die Zusammenhänge möglichst verständlich darzustellen, wird hierauf in den folgenden Formeln nicht gesondert hingewiesen.

Messungen bei eingebauter Quelle

Köperschallpfade

Bei der In-Situ-TPA werden alle Messungen bei eingebauter Quelle durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass auf den zeitaufwendigen Ausbau der Quelle verzichtet werden kann. Zur Bestimmung der körperschallinduzierten Geräuschbeiträge des Fahrzeugs werden folgende Eingangsgrößen und Übertragungsfunktionen gemessen.

Aktivseitige Betriebsbeschleunigungen

Triaxiale Beschleunigungssensoren werden motorseitig vor allen Motorlagern appliziert, an denen die Quelle Kraft einleitet. Die Beschleunigungen werden für alle relevanten Betriebszustände gemessen.

Passivseitigen Betriebsbeschleunigungen

Triaxiale Beschleunigungssensoren werden karosserie-seitig hinter den Motorlagern an allen Punkten appliziert, an denen Kraft in die Empfängerstruktur eingeleitet wird. Die Beschleunigungen werden für alle relevanten Betriebszustände gemessen.

Bestimmung der Inertanzen

Inertanz der Struktur

Mit einem Impulshammer oder Shaker wird eine definierte Kraft karosserie-seitig an N Positionen in die Struktur eingeleitet. Gleichzeitig werden die Systemantworten mit den karosserie-seitig applizierten Beschleunigungsaufnehmern gemessen (an M Positionen). Um die Nachgiebigkeit der Struktur korrekt zu bestimmen, sollte die Kraftanregung in unmittelbarer Nähe zur tatsächlichen Kraftanregung erfolgen und unweit davon die Beschleunigung gemessen werden. Die erfassten Übertragungsfunktionen $\frac{a_m}{F_n}$ werden in der Inertanz-Matrix zusammengefasst. Diese Matrix berücksichtigt das Übersprechen zwischen den Übertragungspfaden durch die Elemente außerhalb der Matrix-Diagonalen. Um die Genauigkeit und die numerische Stabilität der Matrix zu erhöhen, kann die Matrix überdeterminiert werden, d. h. die Anzahl der Beschleunigungssensoren ist höher als die der Kräfteinleitungspunkte $M > N$.



Bestimmung der Inertanz mit Impulshammermessungen

Vibro-akustische Empfindlichkeiten

Vibro-akustische Empfängerübertragungsfunktion

Die vibro-akustische Empfindlichkeiten des jeweiligen Kräfteinleitungspunktes kann parallel zur Inertanz gemessen werden. Dazu wird zusätzlich zur eingeleiteten Kraft und resultierender Beschleunigung noch der Schalldruck am Empfänger, also am Fahrerohr gemessen.

Berechnung der körperschallinduzierten Geräuschbeiträge

Körperschallinduzierte
Geräuschbeiträge

Aus den so gesammelten Messdaten lassen sich nun die körperschallinduzierten Geräuschbeiträge der einzelnen Übertragungspfade berechnen. Zunächst wird die Inertanz-Matrix aus den Impulshammer- / Shakermessungen bestimmt: $I_{m,n} = \frac{a_m}{F_n}$. Nach der Matrix-Inversion können mit den passivseitigen Beschleunigungen die Betriebskräfte bestimmt werden.

$$F_n^{op} = [I_{m,n}]^{-1} \cdot a_m^{ps,op}$$

Effektive Lagerüber-
tragungsfunktion



Anregung durch Reifen-Fahrbahn-Kontakt

Diese Betriebskräfte können allerdings Störgeräuschanteile enthalten, da die nach Lager gemessenen Beschleunigungen nicht nur die Anregung des Motors beinhalten, sondern auch Störgeräuschanteile wie Anregungen durch das Abrollen der Reifen. Mit den aktivseitig gemessenen Beschleunigungssignalen der Quelle im Betrieb $a_m^{as,op}$ und der effektiven Lagerübertragungsfunktion $EMTF_{m,n}$ lassen sich optimierte Kräfte

F_n^{EMTF} berechnen, die nur durch die vorlagerseitige Anregung verursacht wurden:

$$F_n^{EMTF} = EMTF_{m,n} \cdot a_m^{as,op}$$

Die aktivseitigen Beschleunigungen sind weniger durch Störquellen beeinflusst, da sie vor Lager gemessen werden und der Einfluss der Störquellen durch die Isolationswirkung des Lagers minimiert wird. Mithilfe der effektiven Lagerübertragungsfunktion werden die zur Anregung des Motors kohärenten und inkohärenten Anteile getrennt und nur die kohärenten Anteile berücksichtigt. Das bedeutet, die bereinigten Kräfte beschreiben die passivseitigen Kräfte, die tatsächlich durch den Motor hervorgerufen werden. Sie enthalten keine Geräuschanteile, die nicht mit der Motoranregung korrelieren.²

Zur Berechnung des körperschallinduzierten Geräuschbeitrags eines Pfades müssen die optimierten Kräfte F_n^{EMTF} noch mit der vibro-akustischen Empfängerübertragungsfunktion $RTF_{j,n}$ gefiltert werden:

$$p_n = F_n^{EMTF} \cdot RTF_{j,n}$$

² Die effektive Lagerübertragungsfunktion beschreibt das Lager im eingebauten Zustand, d. h. der Motor muss zur Bestimmung nicht ausgebaut werden. Dies sorgt für eine nicht unerhebliche Zeitersparnis, kann aber auch ein Nachteil sein, da keine Aussage über die Lagerübertragung getroffen werden kann, wenn die Quelle in eine andere Empfängerstruktur mit anderer Lagerung eingebaut wird. Mittels Quadrupolen und dem Kelvin-Voigt-Modell können in diesem Fall die Lagerparameter für einfache Lager abgeschätzt werden.

Luftschallpfade

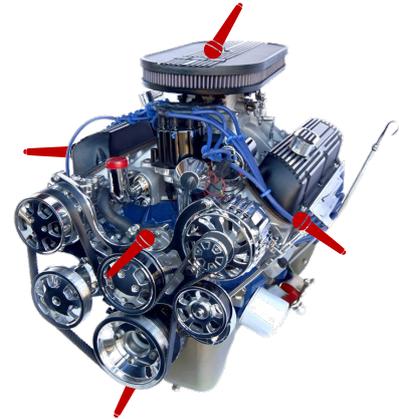
Bestimmung der luftschallinduzierten Geräuschbeiträge

Im Betrieb vibrieren die Oberflächen einer Geräuschquelle und regen so die umgebende Luft zum Schwingen an, d. h. die Quelle emittiert Luftschall. Zur Bestimmung der luftschallinduzierten Geräuschbeiträge des Fahrzeugs werden somit folgende Eingangsgrößen und Übertragungsfunktionen gemessen.

Schalldruckmessungen im Nahfeld

Luftschallabstrahlung im Betrieb

Mit Mikrofonen im Nahfeld der abstrahlenden Flächen wird der Schalldruck während des Betriebs der Quelle aufgezeichnet (mindestens ein Mikrofon auf jeder Seite der Quelle, bei größeren und komplexeren Flächen grundsätzlich mehrere Mikrofone).



Schalldruckmessung im Nahfeld der Quelle

Messung mit Volumenflussquelle

Akustischen Impedanz

An den kritischen Luftschall-Emissionspunkten wird eine kalibrierte Volumenfluss-Quelle platziert und der Schalldruck an den Nahfeldmikrofonen und an der Empfängerposition aufgezeichnet. Die kritischen Emissionspunkte können zuvor z. B. mit einer akustischen Kamera oder eine Schnelle-Sonde während des Betriebs der Quelle identifiziert werden. Das Verhältnis aus eingeleitetem Volumenfluss und Schalldruck im Nahfeld ergibt die akustische Impedanz-Matrix. Diese Matrix berücksichtigt das Übersprechen zwischen den Übertragungspfaden durch die Elemente außerhalb der Matrix-Diagonalen. Das Übersprechen ist typischerweise im tiefen Frequenzbereich größer als im hohen Frequenzbereich.

Akustische Empfänger-Übertragungsfunktion

Akustische Empfindlichkeit

Synchron zur Bestimmung der akustischen Impedanz kann die akustische Empfindlichkeit oder Empfänger-Übertragungsfunktion bestimmt werden. Dazu wird parallel zum eingeleiteten Volumenfluss der Schalldruckpegel am Fahrerohr gemessen.

Berechnung der luftschallinduzierten Geräuschbeiträge

Luftschallinduzierte Geräuschbeiträge

Aus den gesammelten Messdaten werden die luftschallinduzierten Geräuschbeiträge der einzelnen Übertragungspfade bestimmt. Zunächst wird die akustische Impedanz berechnet: $AI_{k,l} = \frac{p_k^{near}}{Q_l}$. Nach der Matrix-Inversion können mit den im Betrieb gemessenen Schalldrücken die Volumenflüsse im Betrieb bestimmt werden:

$$Q_l^{op} = [AI_{k,l}]^{-1} \cdot p_k^{op}$$

Zur Berechnung des luftschallinduzierten Geräuschbeitrags eines Pfades müssen die Volumenflüsse noch mit der akustische Empfänger-Übertragungsfunktion $RTF_{j,l}$ gefiltert werden:

$$p_l = Q_l^{op} \cdot RTF_{j,l}$$

Synthese des Gesamtgeräusches an der Empfängerposition

Gesamtgeräusch

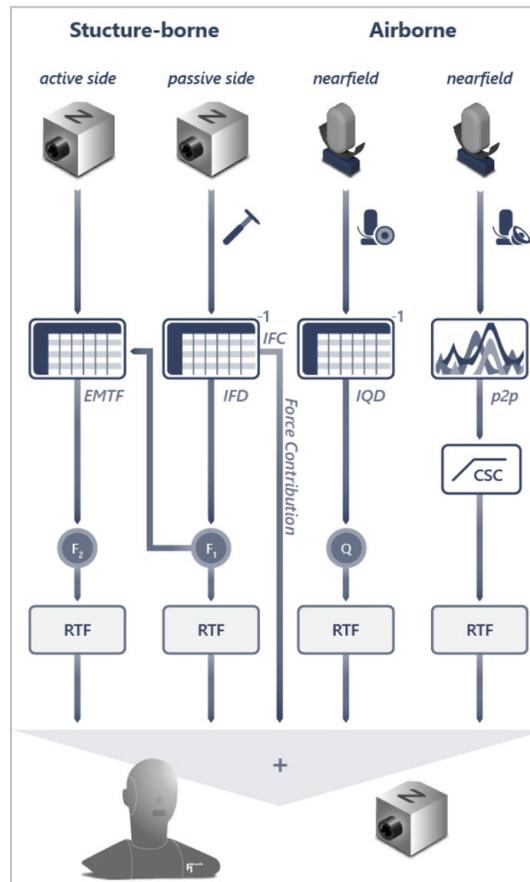
Die Summe aller Geräuschanteile im Modell (körperschall- und luftschallinduziert) ergibt das Gesamtgeräusch.

2. Das TPA-Projekt in ArtemiS SUITE

TPA-Projekt in
ArtemiS SUITE

Bei der Durchführung einer TPA müssen große Datenmengen akquiriert und organisiert werden. Eingangsdaten und Transferfunktionen müssen korrekt erfasst und kombiniert werden, ansonsten sind die berechneten Geräuschsynthesen fehlerbehaftet. Im TPA-Projekt der ArtemiS SUITE sind alle Informationen übersichtlich strukturiert und der Anwender wird Schritt für Schritt durch die Modellerstellung, die Messungen, die Bestimmung der Kräfte und Volumenflüsse sowie die Geräuschsynthesen geführt.

Verfügbare Verfahren



Methoden-Übersicht des TPA-Projekts (ArtemiS SUITE)

Das TPA-Projekt bietet verschiedene Verfahren für die Transferpfadanalyse an. In der Methoden-Übersicht des TPA-Projekts sind diese schematisch dargestellt:

- Körperschall:
 - Indirekte Kraftbestimmung mit Matrix-Inversion (Indirect Force Determination, **IFD**)
 - Effektive Lagerübertragungsfunktion (Effective Mount Transfer Function, **EMTF**)
- Luftschall:
 - Indirekte Volumenflussbestimmung mit Matrix-Inversion (Indirect Q-Source Determination, **IQD**)
 - Luftschalldämpfungsbestimmung (Airborne Attenuation, **p2p**)

Die Bestimmung der effektiven Lagerübertragungsfunktion (EMTF) ist keine eigenständige Methode, sondern ergänzt die IFD-Methode zur indirekten Kraftbestimmung bei Anwendung der TPA bei gelagerten Quellen. Die effektive Lagerübertragungsfunktion wird eingesetzt, um die Eigenschaften der Lager zu beschreiben und die Geräuschsynthesen zu bereinigen.

Zusätzlich stellt das TPA-Projekt den Einsatz der IFC-Verfahren (Indirect Force Contribution) zur Verfügung. Dieses Verfahren bietet einen Einblick in die Zusammensetzung der berechneten Kräfte. Die Anwendung dient dabei lediglich dazu, ein besseres Verständnis des zugrundeliegenden Gleichungssystems zu erlangen und ist keine eigenständige Methode. Die Untersuchung der Zusammensetzung der Kräfte baut auf die IFD-Methode (Indirect Force Determination) auf.

*Indirect Force
Determination***IFD-Methode**

Im TPA-Projekt können mit der IFD-Methode die Betriebskräfte durch Inversion der Inertanz-Transferfunktionsmatrix bestimmt werden. Für die Kraftsynthese benötigt das TPA-Projekt die gemessenen Intertanzen (Übertragungsfunktionen aus resultierender Beschleunigung zu eingeleiteter Kraft) von allen relevanten Kraftereinleitungspunkten und die passivseitig gemessenen Betriebsbeschleunigungen. Durch zusätzliche Beschleunigungssignale an dedizierten Positionen auf der Struktur wird die Inertanz-Matrix überbestimmt. Dies dient z. B. dazu, Messrauschen zu reduzieren und so stabilere Berechnungsergebnisse zu erhalten. Die Inertanz-Matrix berücksichtigt das Übersprechen zwischen den Übertragungspfaden durch die Elemente außerhalb der Matrix-Diagonalen.

*Effective Mount
Transfer Function***EMTF-Methode**

Wird die TPA an einer gelagerten Quelle durchgeführt, kann die Lagerübertragung im TPA-Modell berücksichtigt werden. Im TPA-Projekt kommt hierzu die EMTF-Methode als Ergänzung zur IFD-Methode zum Einsatz. Neben den für die IFD-Methoden gemessenen Größen werden für die EMTF-Methode auch die aktivseitig gemessenen Betriebsbeschleunigungen benötigt.

*Indirect Q-Source
Determination***IQD-Methode**

Mit der IQD-Methode werden im TPA-Projekt die Volumenflüsse im Betrieb durch Inversion der akustischen Impedanz-Transferfunktionsmatrix bestimmt. Als Eingangsgrößen werden hierzu die gemessenen Übertragungsfunktionen aus resultierendem Schalldruck zu eingebrachtem Volumenfluss benötigt sowie die von der Quelle im Betrieb emittierten Schalldrücke. Die Impedanz-Matrix berücksichtigt das Übersprechen zwischen den Übertragungspfaden durch die Elemente außerhalb der Matrix-Diagonalen.

*Airborne Attenuation***p2p-Methode**

Alternativ zur IQD-Methode kann mit dem TPA-Projekt auch die p2p-Methode zur Berechnung der luftschallinduzierten Geräuschbeiträge eingesetzt werden. Die p2p-Methode kann verwendet werden, wenn die Zielsetzung der TPA ist, mehr über die Übertragungspfade und die Entstehung des Geräusches an der Empfängerposition zu erfahren und keine Quellgrößen bestimmt werden sollen. Für die Berechnung werden die Übertragungsfunktionen zwischen eingeleitetem und resultierendem Schalldruck (pressure to pressure, p2p) benötigt. Zusätzlich sind wie bei der IQD-Methode die von der Quelle im Betrieb emittierten Schalldrücke erforderlich. Wird die Luftschalldämpfung für eine Quelle mit mehreren Mikrofonen bestimmt, müssen die einzelnen Beiträge durch eine Kohärenz-Korrektur (Coherent Source Correction) angepasst werden.

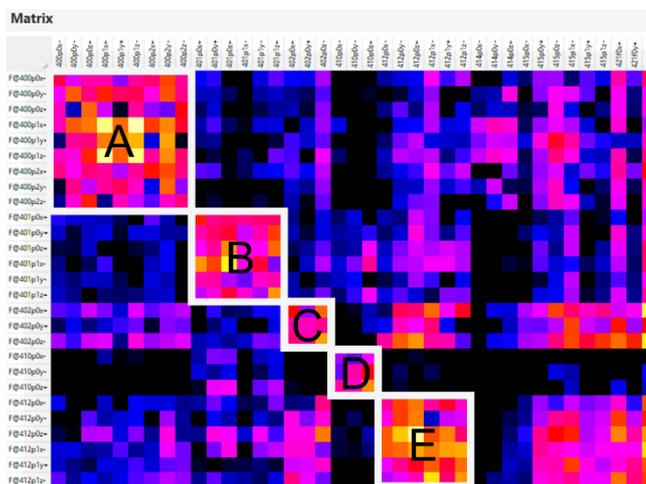
Dieses CSC-Filter wird durch das TPA-Projekt automatisch aus der Anzahl der Nahfeld-Mikrofone und der gemittelten Kohärenz der Betriebsschalldrücke bestimmt und auf den Geräuschbeitrag angewandt.

Matrix-Inversion

Sowohl für die IFD- als auch für die IQD-Methode muss die entsprechende Transferfunktionsmatrix invertiert werden. Um diesen Schritt zu vereinfachen und die Ergebnisse zu optimieren stellt das TPA-Projekt dem Anwender einige nützliche Werkzeuge zur Verfügung. Hierzu gehört z. B. die Mosaik-Ansicht und die Berechnung der Matrix-Konditionierungszahl.

Mosaik-Ansicht

Die Mosaik-Ansicht zeigt einen Schnitt durch alle Transferfunktionen bei einer bestimmten Frequenz in Matrix-Form. Die angezeigte Farbe zeigt die Amplitude, die Phase oder die Kohärenz der Transferfunktion und visualisiert so die Koppelung zwischen den verschiedenen Transferpfaden. Diese Art der Darstellung bietet z. B. die Möglichkeit, gekoppelte Transferfunktionen zu identifizieren und lokale und globale Resonanzen zu unterscheiden. So hilft die Mosaik-Ansicht das untersuchte System besser zu verstehen, geeignete Sub-Matrizen zu definieren und das optimale Matrix-Setup für die Matrix-Inversion zu finden.



Gekoppelte Bauteile indentifizieren in der Mosaik-Ansicht

So hilft die Mosaik-Ansicht das untersuchte System besser zu verstehen, geeignete Sub-Matrizen zu definieren und das optimale Matrix-Setup für die Matrix-Inversion zu finden.

Matrix-Konditionierungszahl

Die frequenzabhängige Matrix-Konditionszahl beschreibt, wie anfällig die Transferfunktionsmatrix bei der Inversion auf Fehler ist. Sie zeigt den Einfluss von Fehlern in den Daten auf das Resultat der Matrix-Inversion. Der Zahlenwert sollte möglichst klein sein. Allerdings gibt es keinen allgemeingültigen Grenzwert, der eine gute Matrix-Konditionierung gewährleistet. Daher sollte die Konditionszahl nicht überbewertet, sondern stattdessen immer im Zusammenhang betrachtet werden. Sie ist nur eines von mehreren Kriterien für valide Daten.

Mittels Matrix-Regularisierung kann die Matrix-Konditionszahl optimiert werden. Jedoch gehen durch diesen Prozess auch Informationen verloren. Daher sollte die Matrix-Regularisierung mit Bedacht eingesetzt werden. Statt der Matrix-Regularisierung kann auch das Matrix-Setup verändert werden (z. B. Verwendung von Sub-Matrizen), um die Matrix-Konditionszahl zu verringern. Wird durch Matrix-Regularisierung eine deutliche Verbesserung der Matrix-Konditionszahl erreicht, muss sich dies auch in den synthetisierten Kräften widerspiegeln. Ist dies nicht der Fall, war die Matrix-Regularisierung nicht erfolgreich.

3. Zusatzinformation durch Betriebsschwingungsanalyse

Betriebsschwingungsanalyse (ODS)

Neben dem TPA-Projekt können die gemessenen Daten auch im Betriebsschwingungsanalysen-Projekt der ArtemiS SUITE genutzt werden. Mithilfe dieses Projekts können die Schwingformen sehr einfach visualisiert werden. Dies erlaubt eine sehr intuitive Interpretation der Schwingformen und potenzieller Subsysteme und vereinfacht die Identifikation dominanter bzw. nicht dominanter Bewegungsrichtungen für den relevanten Frequenzbereich.



Betriebsschwingformen einfach visualisieren in ArtemiS SUITE

Es kann auch eine Modalanalyse mit dem Modalanalyse-Projekt durchgeführt und die Eigenmoden der Struktur bestimmt werden.

4. OTPA mit Prognose

Operational TPA

Für die Durchführung einer Betriebs-TPA (Operational TPA, OTPA) werden keine Transferfunktionen gemessen. Stattdessen werden die Übertragungsfunktionen aus den während des Betriebs aufgezeichneten Größen geschätzt. Dies bedeutet eine deutliche Zeitersparnis, da die Messung der Transferfunktionen mit steigender Komplexität des Modells sehr aufwendig sein kann. Allerdings eignet sich die OTPA nicht für alle Anwendungsgebiete und sie bietet nicht nur Vorteile, da mitunter die Genauigkeit der Vorhersagen geringer ist. Zur Durchführung einer OTPA stellt HEAD acoustics die Analyse-Software Prognose mit dem OTPA-Wizard zur Verfügung. Mithilfe dieses Wizards werden das OTPA-Modell aufgebaut und die Betriebsmessungen strukturiert. Weiterhin können das Gesamtgeräusch und die einzelnen Geräuschbeiträge in Prognose synthetisiert und auralisiert werden.

5. Auralisation und Hörversuche

*Analysator
„menschliches Ohr“*

Mit dem TPA-Projekt wird sowohl die Transferpfadanalyse als auch die -synthese im Zeitbereich durchgeführt. Dies erlaubt eine einfache Auralisation der Ergebnisse und somit die Bewertung der Geräusche mit dem Analysator „menschliches Ohr“.

Mit dem Jury Testing Module SQala der ArtemiS SUITE können Originalgeräusche sowie die mit dem TPA-Modell berechneten Geräusche verschiedener Modifikationen in einem Hörversuch bewerten werden. Durch Hörversuche lassen sich Kundenfeedback abfragen und die Akzeptanz von Produktgeräuschen bewerten. Mithilfe der Ergebnisse aus den Hörversuchen kann dann das für die angestrebte Zielgruppe optimale Geräuschdesign gefunden werden.



Kundenfeedback abfragen im Hörversuch

➔ Weiter zur [vierten Application Note über Transferpfadanalyse](#) mit Hinweisen zur Sensorik und zur Durchführung der Messungen