Bestimmung kritischer Übertragungspfade bei der BTPA

Bernd Philippen, Roland Sottek

HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: Bernd.Philippen@HEAD-acoustics.de

Zusammenfassung

In einem Fahrzeug gibt es viele Übertragungswege von den Schallquellen zu den Fahrerohren. Mit der Binauralen Transferpfadanalyse und –synthese (BTPA/BTPS) können die Übertragungspfade und deren Anteile an den Empfängersignalen ermittelt werden [1], um die Ursache für eine Beanstandung und mögliche Abhilfemaßnahmen zu finden.

In der Regel tragen nicht alle Pfade gleichermaßen zum Innenraumgeräusch bei. Aufgabe des Akustikingenieurs ist es, die kritischen Übertragungspfade, die einen nennenswerten Beitrag liefern, zu identifizieren. Denn nur eine Modifikation dieser dominanten Pfade bietet Potential für Verbesserungen des Gesamtgeräusches.

Bei vielen Übertragungspfaden ist eine Beitragsanalyse umfangreich und unübersichtlich. In diesem Artikel wird eine Strategie vorgeschlagen, um die kritischen Pfade einer BTPA/BTPS effizient zu bestimmen. Einerseits werden die dominanten Pfadbeiträge ermittelt, andererseits wird untersucht, ob die zugrunde liegende Ursache in einer hohen Anregung oder einem schlechten Übertragungsverhalten liegt. Eine automatische Auswertung kann den Prozess beschleunigen und liefert in Verbindung mit einer geeigneten Visualisierung einen schnellen Überblick der kritischen Pfade.

Einleitung

Die Binaurale Transferpfadanalyse und –synthese (BTPA/BTPS) eignet sich zum Troubleshooting von Geräuschbeanstandungen im Fahrzeug. Mit dieser Methode können Geräuschquellen und deren dominante Übertragungspfade zu den Fahrerohren identifiziert werden. Dieses Wissen lässt sich im Bereich Sounddesign nutzen, um beispielsweise einen sportlicheren Sound zu erreichen, indem gezielt diejenigen Übertragungspfade manipuliert werden, die zu einem raueren und damit tendenziell sportlicheren Motorengeräusch führen. Was-wäre-wenn-Analysen und insbesondere virtuelle Modifikationen lassen sich hörbar machen. Dies erleichtert eine Bewertung von Akustikmaßnahmen und kann als Entscheidungshilfe dienen.

Die Übertragung von den Schallquellen zu einem binauralen Empfänger (Kunstkopf) wird in einem BTPA Modell abgebildet (siehe Abbildung 1). Aus den im Betrieb gemessenen Signalen der Nahfeldmikrofone und Beschleunigungssensoren an den Schallquellen werden mit der binauralen Transferpfadsynthese (BTPS) die Geräusche am Empfänger synthetisiert. Je nach Anwendungsfall gibt es entsprechend viele Übertragungspfade, die aber im Allgemeinen nicht alle gleichermaßen zum Innenraumgeräusch beitragen. Die kritischen Übertragungspfade sind diejenigen Pfade, die einen nennenswerten Beitrag zum Gesamtgeräusch liefern. Sie zu identifizieren ist eine wichtige Aufgabe, denn Modifikationen der dominanten Pfade bieten Potential für eine Verbesserung bzw. Veränderung des Gesamtgeräusches.

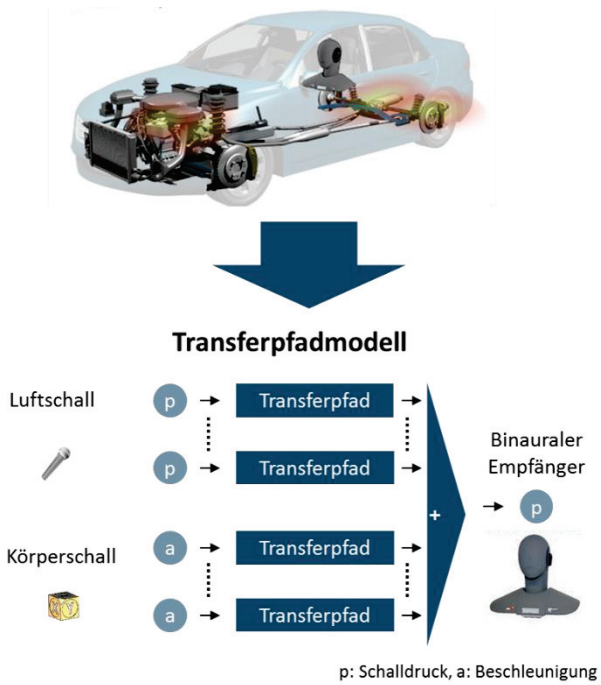

Abbildung 1: BTPA Modell

Bestimmung kritischer Übertragungspfade

In diesem Artikel wird folgende Strategie für eine effiziente Bestimmung der kritischen Übertragungspfade vorgeschlagen:

Beanstandungen festlegen

Im ersten Schritt werden die Beanstandungen oder Problemzonen für das Fahrzeuginnenraumgeräusch festgelegt. Dafür werden Zielkurven oder Streubänder von Vergleichsfahrzeugen herangezogen, um die relevanten Frequenz- bzw. Drehzahlbereiche festzulegen. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche akustische Analysen verwendet. Für ein stationäres Reifen-/Fahrbahngeräusch bietet sich ein gemitteltes Spektrum (Schalldruckpegel über Frequenz) an. Für den Antriebsstrang sind z. B. Ordnungspegel über der Drehzahl geeignet.

Durchführung der BTPA/BTPS

Die Aufstellung der Beanstandungen ist eine hilfreiche Information bei der Festlegung der zu betrachtenden Übertragungspfade und den sich daraus ergebenden Sensorpositionen. Zunächst wird das Fahrzeug mit der Messtechnik aufgerüstet und die erforderlichen Übertragungsfunktionen werden ermittelt. Anschließend erfolgt die Messung der Betriebsdaten. Für die Untersuchung des Reifen-/Fahrbahngeräusches werden in der Regel Ausrollversuche auf einer Teststrecke durchgeführt und Geräusche des Antriebsstrangs werden auf einem Rollenprüfstand gemessen. Mit diesen

Daten wird das BTPA Modell erstellt und die binaurale Transferpfadsynthese kann durchgeführt werden.

Beitragsanalyse

Die BTPS liefert sowohl die Synthese des gesamten Innenraumgeräusches als auch die Beiträge von Pfadgruppen und aller Teilpfade gemäß dem Synthesebaum (Beispiel Abbildung 2) als Zeitdaten. Damit kann eine Beitragsanalyse, d. h. die Bestimmung welchen Anteil jeder Übertragungspfad am gesamten Geräusch hat, durchgeführt werden.

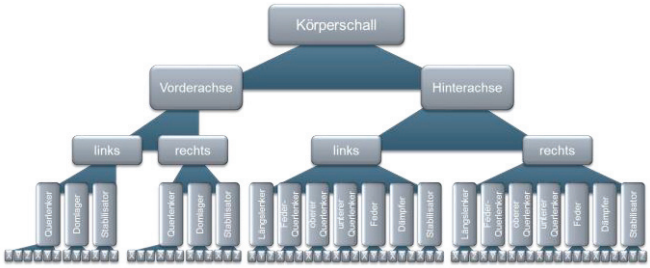

Abbildung 2: Synthesebaum für den Körperschall von einem PKW Fahrwerk

Eine gebräuchliche Methode ist es, eine Übersicht der Pfadaufteilung zu betrachten, indem von jedem Pfadbeitrag das gemittelte Spektrum als Farbbalken dargestellt wird (Abbildung 3).

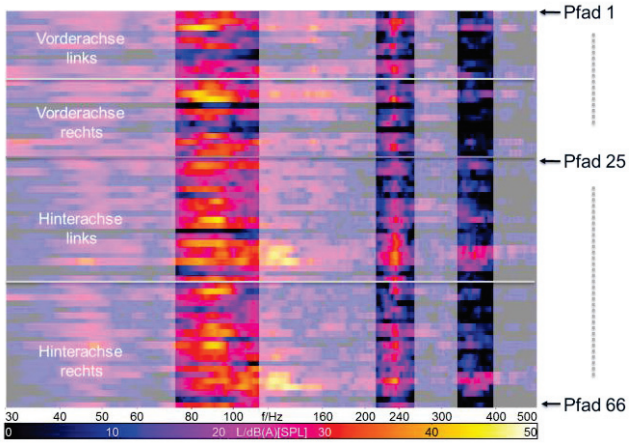

Abbildung 3: Übersicht der Pfadaufteilung mit gemittelten Spektren als Farbbalken.

Diese Darstellung liefert zwar einen guten Vergleich zwischen den Pfaden, aber das Zusammenspiel der einzelnen Pfadbeiträge ist in einer solchen Pfadübersicht nicht enthalten. Ein großer Summenbeitrag kann auch erst durch eine phasenkohärente Überlagerung vieler kleiner Einzelbeiträge entstehen, die jeder für sich alleine betrachtet unerheblich wäre. In dieser Darstellung fehlt die Relevanz eines Pfades bzw. einer Pfadgruppe zu der übergeordneten Gruppe im Synthesebaum. Deshalb sollte eine hierarchische Betrachtung durchgeführt werden. Für die Körperschallübertragung im Fahrwerk werden ausgehend von der Hauptebene die Vorderachse, die Hinterachse, die linke und rechte Fahrzeughälfte, danach die einzelnen Bauteile und abschließend noch die drei Raumrichtungen betrachtet.

Die Relevanz der einzelnen Pfade wird berechnet, indem für jede zuvor festlegte Beanstandung der mittlere Schalldruckpegel der Teilpfadsynthese im entsprechenden Frequenzbereich mit dem Pegel der zugehörigen nächsthöheren Gruppe mit Hilfe von Schwellwertentscheidungen verglichen wird. Anschließend erfolgt eine Zuordnung entsprechend einer dreistufigen Skala. Die Bedeutung der Skala wird durch eine Farbmarkierung unterstrichen. Ein Pfad ist kritisch (rot), wenn der Teilpfad bis zu 6 dB geringer als der Summenpfad ist. Die mittlere Kategorie (gelb) trifft zu, wenn der Teilpfad bis zu 12 dB aber höchstens 6 dB geringer als der Summenpfad ist. Ein Pfad ist nicht relevant (grün), wenn er mindestens 12 dB geringer ist als die übergeordnete Summe. Die konkreten Schwellwerte dienen als Anhaltspunkt. Je nach Anwendungsfall kann es sinnvoller sein, eine andere Aufteilung der Stufen vorzunehmen oder die Anzahl der Stufen zu erhöhen.

Wenn verschiedene Empfangspositionen betrachtet werden sollen, kann dies für jede Position unabhängig erfolgen oder es wird im Voraus der Mittelwert oder das Maximum aller Positionen gebildet. Eine geeignete Visualisierung der Ergebnisse, wie nachfolgend im Beispiel erläutert, erleichtert die Interpretation.

Beispiel: kritische Übertragungspfade im Fahrwerk

Die vorgestellte Strategie zur Bestimmung der kritischen Pfade wird an einem Beispiel für die Körperschallübertragung im Fahrwerk eines Kompaktvans erläutert. Zuerst werden die Problemzonen für die relevante Betriebsbedingung, hier 30 km/h auf mittelrauem Straßenbelag, festgelegt. Im Vorfeld wurde durch eine Operational TPA (OTPA) [2, 3] festgestellt, dass der Körperschallbeitrag des Reifenfahrbahnkontaktes die Ursache für die störenden Geräuschkomponenten ist. Durch einen Vergleich mit einem Streuband der zugehörigen Fahrzeugklasse fallen gemäß Abbildung 4 drei Bereiche besonders auf:

A) Wummern (75 Hz bis 100 Hz)

B) Reifentorusresonanz (215 bis 250 Hz)

C) Rumpeln (320 bis 360 Hz).

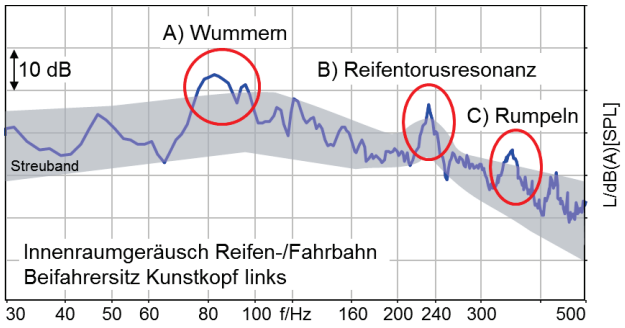

Abbildung 4: Durch einen Vergleich des gemittelten Spektrums des Innenraumgeräusches mit einem Streuband ergeben sich für das gewählte Beispiel drei Problemzonen bzw. Beanstandungen.

Für die drei Problemzonen können nun aus den BTPS-Daten automatisiert die relevanten Pfade ermittelt werden. Es wird ein vierstufiger hierarchischer Synthesebaum betrachtet: Der Körperschallbeitrag teilt sich in die Beiträge der Vorderachse und der Hinterachse auf. Die Beiträge der Achsen können jeweils in Anteile der linken und rechten Fahrzeugseite unterteilt werden. Die nächste Hierarchiestufe sind die

Bauteile (Querlenker oder Federbein). Danach kommen die Raumrichtungen x, y und z.

Für die Problemzone A) „Brummen“ sind die kritischen Pfade in Abbildung 5 als farbkodierte, hierarchische Rechtecke dargestellt. Sowohl die Hinterachse als auch die Vorderachse ist für das Brummen verantwortlich. Die relevanten Pfade der Vorderachse sind die Dreiecksquerlenker; bei genauerer Betrachtung sind es die vorderen Querlenkerlager in y-Richtung.

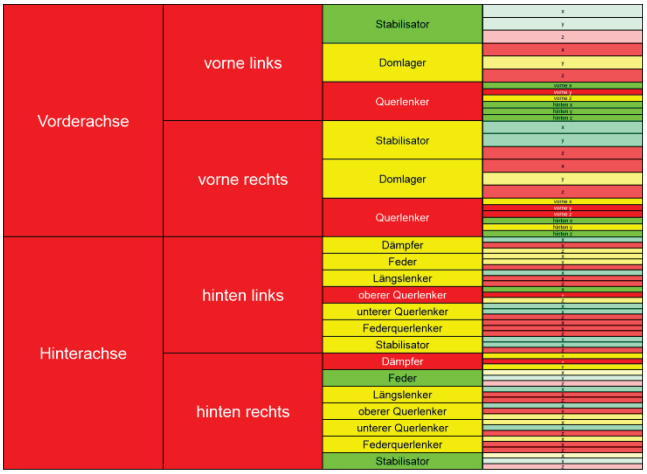

Abbildung 5: Kritische Pfade für die Beanstandung A) „Brummen“

Die durch die Reifentorusresonanz hervorgerufenen Beiträge werden von allen vier Reifen fast gleichermaßen in den Innenraum übertragen (Abbildung 6). Hier sind besonders die Beiträge der vorderen Querlenkerlager in z-Richtung dominant. Für die Hinterachse sind die Querlenker und der Federquerlenker wichtig.

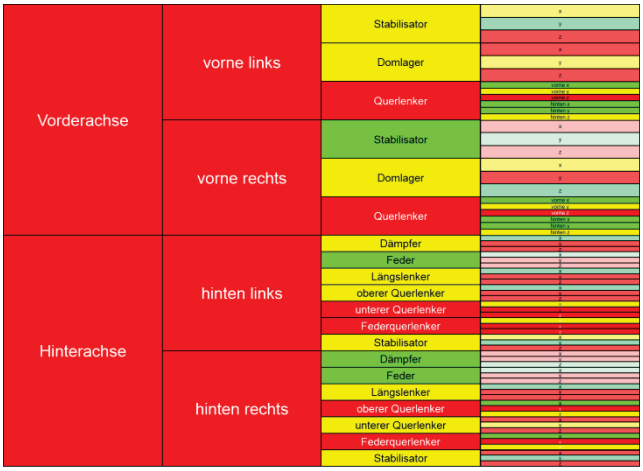

Abbildung 6: Kritische Pfade für die Beanstandung B) Reifentorusresonanz

Das Rumpeln wird hauptsächlich von den hinteren Federquerlenkern in den Innenraum übertragen (Abbildung 7). Die Vorderachse ist für dieses Geräuschphänomen weniger wichtig, hier sind die Domlager und Querlenker rot markiert.

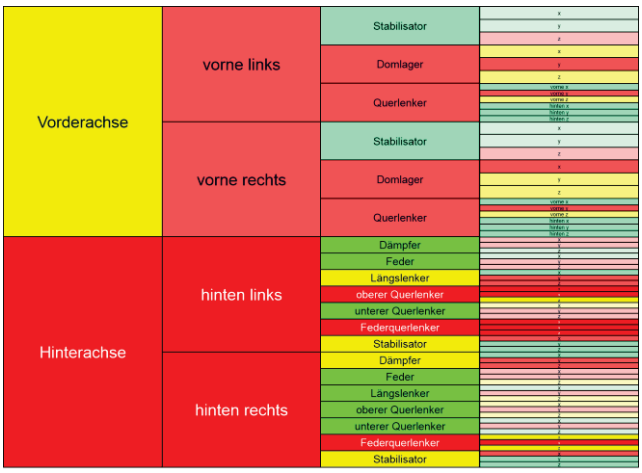

Abbildung 7: Kritische Pfade für die Beanstandung C) „Rumpeln“

Ursachenanalyse

Die Bestimmung der kritischen Pfade ist ein erster wichtiger Schritt. Eine weitere Ursachenanalyse ist hilfreich, um aus den BTPA/BTPS Ergebnissen Abhilfemaßnahmen für eine Beanstandung abzuleiten. Für den Körperschall bedeutet das: Liegt die Ursache für einen hohen Pfadbeitrag am Innenraumgeräusch in einer zu großen Anregung (Krafteinleitung), in einer Schwachstelle der akustischen Transferfunktion (ATF) oder in einer ungünstig konstruierten Struktur (lokale Nachgiebigkeit)? Es können auch mehrere Faktoren gleichzeitig auftreten. Die Kenntnis darüber, welcher der genannten Fälle vorliegt, lässt sich als Anhaltspunkt nutzen, um geeignete Maßnahmen abzuleiten. Bei einer zu hohen Kraft müsste die Anregung reduziert werden und bei einer hohen Luftschallempfindlichkeit der Karosserie könnte beispielsweise die Dämmung erhöht werden. Bei einem Problem, was auf eine zu hohe lokale Nachgiebigkeit zurückzuführen ist, muss die Struktur steifer ausgelegt werden.

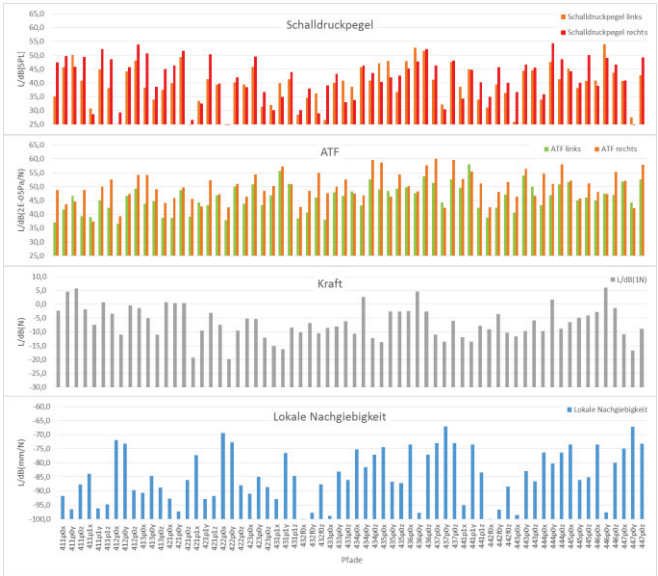

Abbildung 8: Die Übersicht zeigt für alle Pfade die lokale Steifigkeit, die Kraftanregung, die akustische Transferfunktion und der daraus resultierende Schalldruckpegel für die Beanstandung „Reifentorusresonanz“ im Frequenzbereich von 215 Hz bis 250 Hz.

Für jede Beanstandung kann eine Übersicht der lokalen Steifigkeit, der Kraftanregung, der akustischen Transferfunktion und dem daraus resultierenden Schalldruckbeitrag für alle Pfade erstellt werden (siehe Abbildung 8). Die Übertragungsfunktionen (lokale Nachgiebigkeiten und ATFs) werden im zugehörigen Frequenzbereich gemittelt und die Pegel der Kräfte und Schalldruckbeiträge werden energetisch aufsummiert. Diese Darstellung gibt ein tieferes Verständnis in das Übertragungsverhalten und erlaubt einen schnellen Vergleich zu anderen Fahrzeugen oder zu durchgeführten Modifikationen.

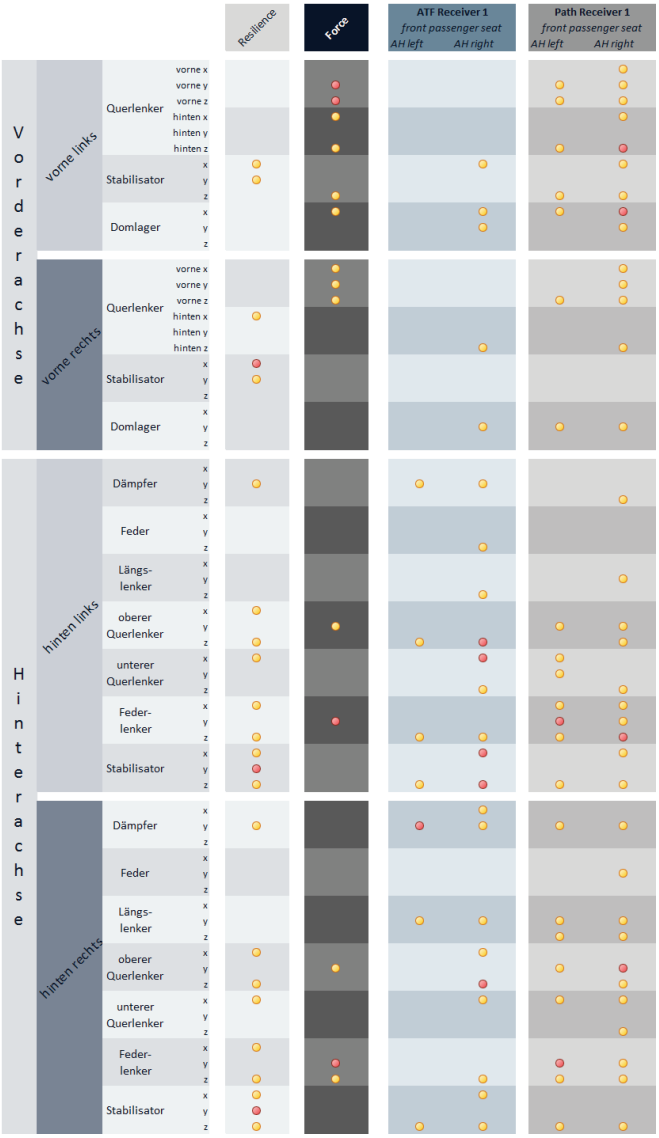

Abbildung 9: Beispielhaft wurde die Ursachenanalyse für die Beanstandung „Reifentorusresonanz“ durchgeführt. Auf einen Blick lässt sich die Ursache für einen hohen Pfadbeitrag ablesen (rotes Symbol: auffällig; gelbes Symbol: mittel; kein Symbol: unauffällig.

Für eine übersichtlichere Darstellung können die Pfade hinsichtlich der lokalen Nachgiebigkeit, der Krafteinleitung, der ATFs und der Schalldruckbeiträge bezüglich einer Referenz bewertet werden. Anschließend erfolgt über Schwellwerte die Zuordnung in eine dreistufige Kategorie: unauffällig, mittel und hoch. Die Einstufung kann zum Beispiel anhand von Grenzkurven der jeweiligen Fahrzeugklasse erfolgen, die durch die Auswertung von früheren Projekten gewonnen wurden. Es ist auch denkbar, dass Entwicklungsziele in die Schwellwertbetrachtung einfließen. Besonderes Augenmerk sollte hier auf die kritischen Pfade gerichtet werden, die im ersten Schritt ermittelt wurden.

Abbildung 9 zeigt eine solche Darstellung für das oben aufgeführte Beispiel im Falle der Beanstandung B) „Reifentorusresonanz“. Auf einen Blick lässt sich die Ursache für einen hohen Pfadbeitrag ablesen. Ein rotes Symbol bedeutet Kategorie „auffällig“ und ein gelbes Symbol Kategorie „mittel“. Die dritte Kategorie „unauffällig“ erhält zu Gunsten einer besseren Lesbarkeit kein Symbol.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Methodik hilft schnell, einen Überblick der kritischen Pfade zu erlangen. Die hierarchische Auswertung und Darstellung unterstützt dabei, die Relevanz von Pfaden und Pfadgruppen besser einordnen zu können. Die Ursachenanalyse, d. h. die Unterteilung in die Bereiche Anregung, Struktur und Übertragungsverhalten vereinfacht die Ableitung von Abhilfemaßnahmen für beanstandete Geräusche beim Troubleshooting.

Viele der erforderlichen Schritte lassen sich automatisiert durchführen, sodass der Arbeitsprozess erleichtert und beschleunigt werden kann. Diese Methodik ist nicht als Ersatz sondern als Ergänzung zu einer Auralisation der Ergebnisse und einer perzeptiven Bewertung zu verstehen. Denn in den meisten Fällen kann durch die alleinige Betrachtung von Pegelwerten die empfundene akustische Qualität nicht hinreichend beschrieben werden. Die Zuordnung in drei Kategorien (grün, gelb, rot) zur Bewertung der Pfadeigenschaften erlaubt eine gute Übersicht und erleichtert den Vergleich zwischen verschiedenen Fahrzeugen oder Modifikationen. Wird ein tiefergehendes Verständnis über das System und die Zusammenhänge gewünscht, dann wird eine zusätzliche detailliertere Betrachtung empfohlen.

Als Ausblick kann die Beitragsanalyse für die BTPA/BTPS mit einer Auswertung und Visualisierung der Phasenbeziehung zwischen den Pfaden ergänzt werden. Die Fragestellung lautet dann: Welche Pfade sind tendenziell gleichphasig und welche gegenphasig? Zudem ist eine erweiterte Beitragsanalyse basierend auf psychoakustischen Größen (z. B. Rauigkeit) oder die Auswertung von Mustern denkbar.

Literatur

[1] K. Genuit and J. Poggenburg, “The Design of Vehicle Interior Noise Using Binaural Transfer Path Analysis,” in SAE Technical Paper 1999-01-1808, 1999.

[2] K. Noumura and J. Yoshida, “Method of transfer path analysis for vehicle interior sound with no excitation experiment,” in FISITA 2006 World Automotive Congress, 2006.

[3] R. Sottek and B. Philippen, “Separation of Airborne and Structure-Borne Tire-Road Noise Based on Vehicle Interior Noise Measurements,” in *SAE Technical Paper 2010-01-1430*, 2010.