

Bestimmung von Admittanzen in sechs Freiheitsgraden für die komponentenbasierte TPA

Martin Burkhardt, Welf-Guntram Drossel

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden, Deutschland

Email: Martin.Burkhardt@iwu.fraunhofer.de

Abstrakt

Für die komponentenbasierte Transferpfadanalyse (TPA) wird ein komplexes Gesamtsystem in beschreibbare Teilsysteme zerlegt und dafür geeignete Schnittstellen definiert. Mit der etablierten Schnittstellenschreibung wird in den meisten Anwendungsfällen die Körperschallkopplung in einem Punkt je Schnittstelle in bis zu drei Freiheitsgraden berücksichtigt. Die messtechnische Charakterisierung der drei translatorischen Freiheitsgrade erfolgt dafür mit Hilfe triaxialer Beschleunigung- oder Kraftmesstechnik. Dabei bleiben jedoch rotatorische Freiheitsgrade und folglich die Übertragung von BiegeWellen zwischen den Teilsystemen unberücksichtigt. Die „virtual point transformation“ (VPT) bietet hierfür einen Lösungsansatz. Jedoch ist der nutzbare Frequenzbereich dieser Methode durch die Forderung nach einer starren Schnittebene zum Teil stark eingeschränkt.

Aufbauend auf der „virtual point transformation“ wird im vorliegenden Beitrag eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe Eingangs- und Transferadmittanzen von einem Koppelpunkt für einen erweiterten Frequenzbereich messtechnisch bestimmt werden können. Diese Informationen können für eine vollständige Quellcharakterisierung, Prognosen im Gesamtsystem und für eine Bewertung der Einzelbeiträge der sechs Freiheitsgrade genutzt werden.

Einleitung

Bei der komponentenbasierten Transferpfadanalyse werden die einzelnen Teilsysteme unabhängig von einander beschrieben und können mit Abbildung der Wechselwirkungen untereinander zu einem Gesamtsystem rechnerisch gekoppelt werden. Aktive Teilsysteme werden als Quellen bezeichnet und können anhand verschiedener Methoden charakterisiert werden. Für Körperschallquellen sind hierfür

- direkte Messung von blocked forces
- indirekte Bestimmung der blocked forces („in-situ“)
- freie Schwingschnelle
- hybride Formulierungen

zu nennen. Für weiterführende Informationen wird auf [1] verwiesen.

In Abbildung 1 ist ein Gesamtsystem dargestellt, dass in eine Quelle s und einen Empfänger r unterteilt werden kann. Der Koppelpunkt der beiden Teilsysteme wird mit I benannt. Auf dem Empfänger befindet sich außerdem ein Referenzpunkt R . Admittanzen werden mit Y benannt. Ein hoch- und vorangestellter Index bringt die betreffende

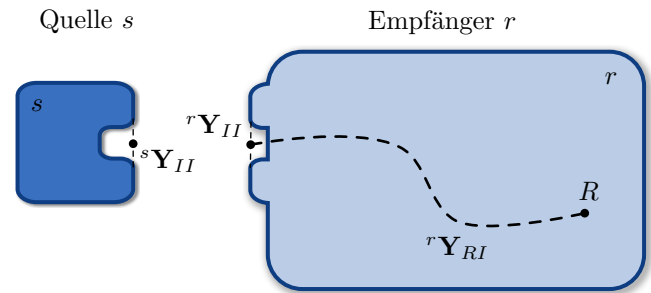


Abbildung 1: Gesamtsystem unterteilt in eine Quelle und einen Empfänger einschließlich der Benennungen [3]

Struktur zum Ausdruck, tiefgestellte Indices benennen die beiden betrachteten Punkte der Admittanz. ${}^rY_{RI}$ ist demnach die Transferadmittanz des Empfängers bei Anregung am Punkt I und Answererfassung am Punkt R .

Die Schwingschnelle im Referenzpunkt R des Gesamtsystems ${}^{sr}\mathbf{v}_R$ lässt sich mit der blockierten Kraft nach [2] berechnen:

$${}^{sr}\mathbf{v}_R = \left[{}^rY_{RI} ({}^sY_{II} + {}^rY_{II})^{-1} {}^sY_{II} \right] {}^s\mathbf{f}_I^{\text{bl}} \quad (1)$$

Dabei ist zu erkennen, dass für die Beschreibung des Gesamtsystems die Eingangs- und Transferadmittanzen sowie die blockierte Kraft notwendig sind. Eine Methodik zur direkten Messung der blockierten Kraft wurde [3] in vorgestellt.

Methodik zur Admittanzmessung in sechs Freiheitsgraden

Zur messtechnischen Bestimmung der Admittanzen mechanischer Strukturen wird in der Regel eine Kraft mittels Impulshammer oder Schwingerreger (Shaker) eingeleitet und die Strukturantwort mittels Beschleunigungssensoren gemessen. Sowohl die Kraft als auch die Beschleunigung werden dabei an jeweils einem Punkt ermittelt, sodass auch die Admittanz eine Beschreibung des Systemverhaltens für einen Punkt bzw. zwischen zwei Punkten darstellt. Mit in der Praxis gängigen triaxialen Beschleunigungssensoren können Admittanzen in bis zu drei translatorischen Freiheitsgraden bestimmt werden.

Der Punktkontakt zwischen Teilsystemen ist eine Vereinfachung des in der Praxis häufig auftretenden Flächenkontaktes. Für die vollständige Beschreibung des strukturdynamischen Verhaltens des Gesamtsystems ist neben den drei translatorischen Freiheitsgraden ebenso die Berücksichtigung der rotatorischen Freiheitsgrade notwendig. Werden diese nicht berücksichtigt, können Biege-

wellen nicht übertragen und Biegemoden nicht abgebildet werden.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Admittanzen in sechs Freiheitsgraden stellt die VPT dar. Dabei werden $n \geq 3$ triaxiale Beschleunigungssensoren um den Punkt appliziert, für den den Admittanz ermittelt werden soll. Die Krafteinleitung erfolgt ebenfalls an mehreren umgebenden Punkten ($m \geq 6$). Die dabei ermittelte Admittanzmatrix der Dimension $n \times m$ wird mit Hilfe der geometrischen der Abstände zum gesuchten Punkte auf diesen Punkt reduziert. Eine Herleitung und weiterführende Informationen sind in [4] zu finden.

Eine Bedingung für die Gültigkeit der VPT ist, dass im betrachteten Frequenzbereich keine Eigenmoden zwischen den n Beschleunigungssensoren auftreten. Je nach Struktur können die auftretenden Eigenmoden den nutzbaren Frequenzbereich daher deutlich einschränken.

Weiterhin ist es für die VPT erforderlich, in jedem translatorischen Freiheitsgrad eine Kraft eingeleitet zu haben. Für ebene Schnittstellen (z.B. Karosseriebauteile) stellt eine Anregung parallel zur Ebene eine Herausforderung bei der praktischen Messdurchführung dar.

Als Lösungsansatz kann eine Hilfsstruktur in Form eines Kreuzes verwendet werden. Die geometrischen Abmessungen des Kreuzes, das für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet wurde, können Abbildung 2 entnommen werden. Das Kreuz kann mittels Klebstoff am Absatz ($d = 30$ mm) an der Teststruktur appliziert werden. Die Beschleunigungssensoren werden an den Schenkeln appliziert und ebenso die Krafteinleitung mittels Impulshammer an den Schenkeln vorgenommen.

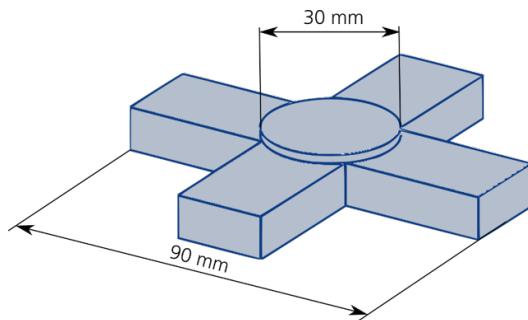


Abbildung 2: Skizze der Hilfsstruktur

Es treten zwischen den Beschleunigungssensoren keine Eigenmoden auf, wenn die verwendete Hilfsstruktur eigenfrequenzfrei ist. Um dies für einen möglichst großen Frequenzbereich sicher zu stellen, ist das Kreuz aus einem Aluminiumoxid gefertigt. Dies ist ein keramischer Werkstoff, der sich durch eine geringere Dichte und einen höheren Elastizitätsmodul im Vergleich zu Stahl auszeichnet. In Tabelle 1 sind die Materialparameter und die Masse der Hilfsstruktur zu finden. Weiterhin sind darin die numerisch ermittelten Eigenfrequenzen des Kreuzes für beide Werkstoffe zu finden. Durch die Verwendung von Aluminiumoxid kann die erste Eigenfrequenz auf über 12 kHz erhöht werden und so der nutzbare Frequenzbereich für die VPT deutlich erweitert werden.

Tabelle 1: Mechanische Materialparameter, Masse und Eigenfrequenzen der Hilfsstruktur für zwei Materialien

	Stahl	Aluminiumoxid
Dichte	7850 kg/m ³	3900 kg/m ³
Elastizitätsmodul	200 GPa	380 GPa
Masse Hilfsstruktur	0,266 kg	0,132 kg
1. Eigenfrequenz	6474 Hz	12 662 Hz
2. Eigenfrequenz	6476 Hz	12 665 Hz
3. Eigenfrequenz	6544 Hz	12 799 Hz
4. Eigenfrequenz	6820 Hz	13 338 Hz

Versuchsdurchführung

Als Versuchsträger für die nachfolgenden Messungen wurde ein Serienfahrzeug gewählt. Der Ort zur Bestimmung der Eingangsadmittanz ist nahe der Nachlagerstelle der Hinterachse. Abbildung 3 zeigt die applizierte Hilfsstruktur einschließlich der vier Beschleunigungssensoren. Die Krafteinleitung erfolgte mittels Impulshammer an 15 Punkten. Durch die größere Anzahl von Sensoren und Krafteinleitungspunkten wird das Gleichungssystem der VPT überbestimmt und die Auswirkungen auftretende Messfehler reduziert.



Abbildung 3: Messaufbau mit Hilfsstruktur

Da die Hilfsstruktur im betrachteten Frequenzbereich keine Eigenmoden aufweist, kann deren dynamisches Verhalten als ideale Trägheit (Massefunktion) angesehen werden, die mit dem Versuchsfahrzeug ein schwingungsfähiges System bildet. Um die Admittanz des Fahrzeuges Y_a zu erhalten, wird die Admittanz der Hilfsstruktur Y_b von der gemessenen Admittanz Y_{ab} entkoppelt:

$$Y_a = (Y_{ab}^{-1} - Y_b^{-1})^{-1} \quad (2)$$

Zum Vergleich wurden zusätzlich zur Messung mit Hilfsstruktur auch eine Messung ohne Hilfsstruktur mit anschließender VPT und eine direkte Messungen mit einem Sensor (ohne VPT) durchgeführt (siehe Abbildung 4).

Die Durchführung der Messungen erfolgte mit einem Impulshammer PCB 086C03 und Beschleunigungssensoren PCB 356A45. Zur Datenaquisition wurde ein MÜLLER BBM MKII mit der Software PAK 5.11 verwendet. Alle weiteren Berechnungen erfolgte mit MATLAB.

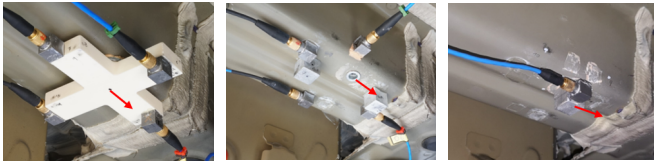


Abbildung 4: Darstellung der drei Messmethoden: *links:* mit Hilfsstruktur, *Mitte:* ohne Hilfsstruktur, *rechts:* direkte Messung

Ergebnisse

Um die berechnete Admittanz im Reduktionspunkt auf Plausibilität zu überprüfen, kann die Passivität berechnet werden, die ein Maß für physikalisch korrektes Verhalten mechanischer Systeme darstellt. [6] Die Passivität bewertet das Vorzeichen vom Realteil der Admittanz normiert auf die Anzahl der Frequenzstützstellen. Die Werte der Passivität können zwischen -1 und 1 liegen. Physikalisch korrekt ermittelte Admittanzen erhalten einen Wert von 1 , das Ergebnis der Passivität je ist in Abbildung 5 dargestellt. Es zeigt sich, dass im Frequenzbereich bis 6000 Hz die Messung ohne Hilfsstruktur im Vergleich zur Messung mit Hilfsstruktur eine deutlich geringere Passivität aufweist. Die Ergebnisqualität der Messung mit Hilfsstruktur kann daher als höher eingeschätzt werden. Eine mögliche Ursache für Abweichungen der Passivität von 1 können Messfehler und Eigenmoden zwischen den Sensoren sein.

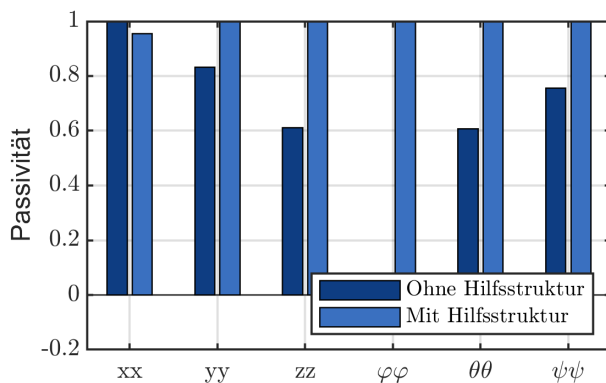


Abbildung 5: Passivität der Eingangsadmittanz im Reduktionspunkt

Die overall sensor consistency (siehe [5]) bewertet den Fehler, der durch die Annahme „keine Eigenmoden zwischen den Sensoren“ bei der VPT gemacht wird. Weicht die overall sensor consistency von 1 ab, ist dies ein Anzeichen, dass entgegen der Annahme dennoch Moden auftraten. Das Ergebnis der overall sensor consistency ist in Abbildung 6 dargestellt und zeigt, dass bei der Messung ohne Hilfsstruktur ab 1500 Hz deutliche Einbrüche zu erkennen sind. Bei der Verwendung der Hilfsstruktur kann eine overall sensor consistency von 1 bis 6000 Hz erzielt werden.

Die ermittelte Eingangsadmittanz in Längsrichtung des Fahrzeuges (roter Pfeil in Abbildung 4) ist für die drei Messmethoden in Abbildung 7 dargestellt. Da die overall sensor consistency für die Messung ohne Hilfsstruktur drauf hinweist, dass über 1500 Hz die VPT ungültig ist, ist

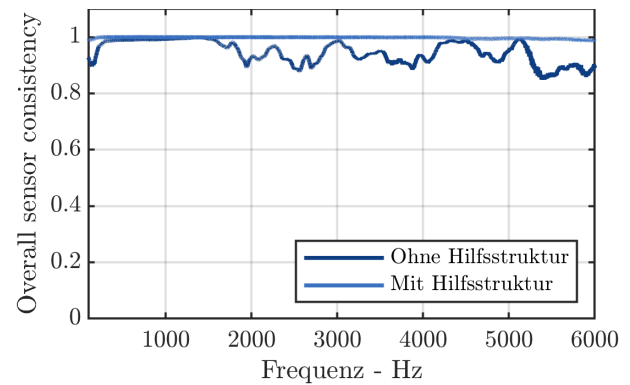


Abbildung 6: Overall sensor consistency

der Frequenzbereich in Abbildung 7 auf 1500 Hz begrenzt.

Die beiden Methoden mit Anwendung der VPT (mit/ohne Hilfsstruktur) zeigen für Amplitude und Phase eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die direkte Messung mit einem Beschleunigungssensor weicht in der Amplitude deutlich von den anderen beiden Ergebnissen ab. Die Ursache könnte sein, dass zur Krafteinleitung in Längsrichtung (parallel zur Schnittfläche) ein Hilfswürfel appliziert werden musste und eine überlagerte Einleitung von Kraft und Moment im Sensorpunkt erfolgte. Die ermittelte Admittanz könnte daher fehlerbehaftet sein.

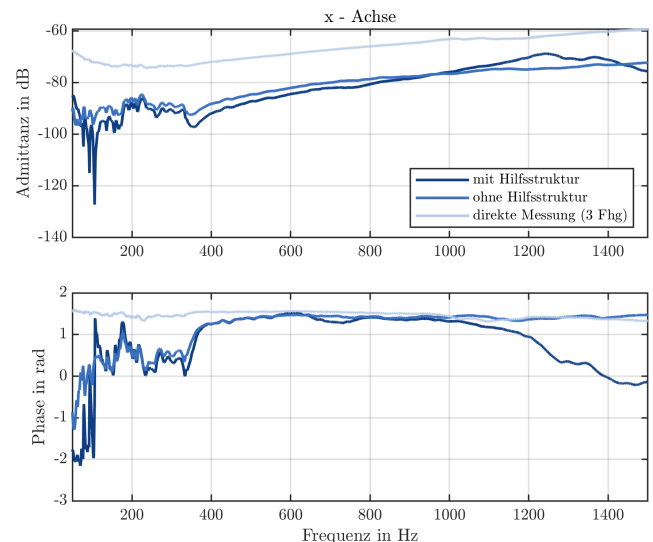


Abbildung 7: Ermittelte Eingangsadmittanz am Fahrzeug für die verschiedenen Messmethoden

Zusammenfassung

Die „virtuel point transformation“ ist eine Methode, mit der Admittanzen in einem Punkt in bis zu sechs Freiheitsgraden bestimmt werden können. Liegt der Reduktionspunkt innerhalb einer ebene Schnittflächen, können in einigen Anwendungsfällen keine Kräfte parallel zur Schnittfläche eingeleitet werden. Weiterhin besteht häufig ein Konflikt bei der Wahl des Sensorabstandes vom Reduktionspunkt. Ein großer Abstand führt zu geringeren Fehlern bei der berechneten Admittanz, schränkt den nutzbaren Frequenzbereich aufgrund von Eigenmoden zwischen den Sensoren jedoch deutlich ein. Mit einem

kleineren Sensorabstand wird der nutzbare Frequenzbereich in der Regel vergrößert.

Als Lösung dieser beiden Herausforderungen bei der Messdurchführung wurde im vorliegenden Beitrag eine Hilfsstruktur vorgestellt, die sowohl zur Sensorapplikation als auch zur Krafteinleitung verwendet werden kann. Aufgrund der Verwendung von Aluminiumoxid ist die Hilfsstruktur bis 12 662 Hz eigenfrequenzfrei.

Bei Messungen mit dieser Hilfsstruktur konnten übereinstimmende Ergebnisse im Vergleich zur Methodik ohne Hilfsstruktur erzielt werden. Die Gültigkeit der ermittelten Admittanzen ohne Hilfsstruktur ist im betrachteten Anwendungsfall auf 1500 Hz begrenzt. Auch wenn die Hilfsstruktur bis 12 662 Hz keine Eigenfrequenzen aufweist und folglich eine VPT möglich wäre, wurde die Auswertung auf 6000 Hz begrenzt. Die Ursache liegt in der verwendeten Vinylspitze des Impulshammer und dem Abfall des Anregungsspektrums begründet.

Literatur

- [1] van der Seijs, M.V. et al.: General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques. Mech. Syst. Signal Process., (2015)
- [2] Moorhouse, A.T. et al.: In situ measurement of blocked forces of structure-borne sound sources. Journal of Sound and Vibration 325, (2009), 679-685
- [3] Burkhardt, M. et al.: Messdatenbasierte Charakterisierung von Körperschallquellen in sechs Freiheitsgraden unter blocked force-Randbedingungen, DAGA 2020 - 46. Jahrestagung für Akustik
- [4] van der Seijs, M.V. et al.: An improved methodology for the virtual point transformation of measured frequency response functions in dynamic substructuring. 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2013
- [5] van der Seijs, M.V.: Experimental Dynamic Substructuring: Analysis and design strategies for vehicle development, Dissertation, 2016
- [6] Sturm, M.: Identification and quantification of transient structure-borne sound sources within electrical steering systems, Dissertation, Salford, 2013