Messdatenbasierte Charakterisierung von Körperschallquellen in sechs Freiheitsgraden unter „blocked force“-Randbedingungen

Martin Burkhardt, Eric Hensel und Welf-Guntram Drossel
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden
Email: martin.burkhardt@iwu.fraunhofer.de

Einleitung

Für alle Methoden der Transferpfadanalyse (TPA) ist eine Beschreibung des Quellterms unabdingbar. Die Möglichkeiten der Quellcharakterisierung sind genauso verschieden wie die TPA-Verfahren. Für die klassischen Methoden wird die Quelle im Einbauzustand mit Rückwirkung der Fahrzeugstruktur betrachtet, während für die komponentenbasierte TPA die Quelle rückwirkungsfrei von der angekoppelten Struktur beschrieben wird. Neben der TPA wird die Quellcharakterisierung auch im Produktentwicklungsprozess zur Bewertung des aktuellen Baustandes, zum Variantenvergleich oder zur Komponentenfreigabe eingesetzt. Auch in diesen Fällen muss die Quelle rückwirkungsfrei vom Prüfaufbau charakterisiert werden, was im Allgemeinen durch die Messung der freien Schwingschnelle oder der blockierten Kraft realisiert werden kann. Die Einhaltung der notwendigen Randbedingungen zur Messung freier Schwingschnellen ist bei vielen Komponenten praktisch allerdings nicht möglich, wenn zur Erreichung des Betriebspunktes externe Lasten aufgebracht oder weitere Systeme (z. B. Schläuche, Leitungen) angekoppelt werden müssen. Basierend auf bisherigen Erfahrungen hat sich in vielen Bereichen eine direkte Kraftmessung zur Quellcharakterisierung etabliert.

Die Realisierung eines rückwirkungsfreien Prüfaufbaus zur Messung dynamischer Kräfte birgt jedoch ebenfalls einige Herausforderungen. Im Beitrag wird ein Aufbau vorgestellt, mit dem eine direkte Kraftmessung an einem Punkt in sechs Freiheitsgraden durchgeführt werden kann. Es wird auf die notwendigen Randbedingungen zur Annäherung an die idealisierte „blocked force“-Annahme eingegangen, die Berechnung der blockierten Kraft in sechs Freiheitsgraden vorgestellt, die strukturdynamische Antwort an einem Referenzpunkt berechnet und mit Betriebsmessungen gegenübergestellt.

Komponentenbasierte TPA mit blockierten Kräften

Für die nachfolgenden Ausführungen wird ein System betrachtet, dass sich in eine Quelle s und einen Empfänger r unterteilen lässt (siehe Abb. 1). Der Koppelpunkt beider Systeme wird mit I indiziert. Auf dem Empfänger befindet sich außerdem ein Referenzpunkt R. Admittanzen werden mit Y benannt. Ein hoch- und vorangestellter Index bringt die betreffende Struktur zum Ausdruck, tiefgestellte Indices benennen die beiden betrachten Punkte der Admittanz. ${}^{r}\mathbf{Y}_{RI}$ ist demnach die Transferadmittanz des Empfängers bei Anregung am Punkt I und Antworterfassung am Punkt R.

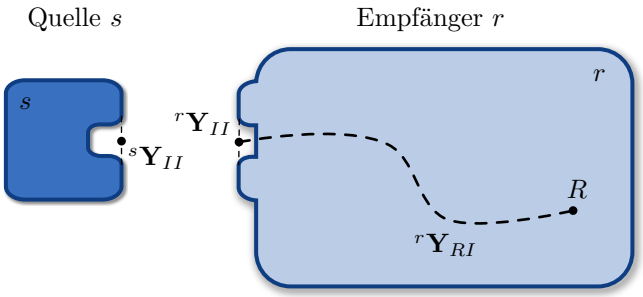

Abbildung 1: Gesamtsystem unterteilt in eine Quelle und einen Empfänger einschließlich der Benennungen

Die Zielstellung ist es, die Schwingschnelle ${}^{sr}v_R$ zu berechnen, wenn die Quelle s im Betrieb mit dem Empfänger r verbunden ist. Auf Basis der eingangs erwähnten, rückwirkungsfreien Beschreibung der Quelle ist es notwendig, die Quelle unabhängig von der Struktur zu charakterisieren. Eine Zusammenstellung möglicher Methodiken zur rückwirkungsfreien Quellcharakterisierung ist in [1] zu finden. Etabliert hat sich in vielen Anwendungsfällen die Methode der blockierten Kraft („blocked force“), welche auch im vorliegenden Fall verwendet wird.

Die zu prognostizierende Schwingschnelle im Referenzpunkt R für das Gesamtsystem sr lässt sich mit der blockierten Kraft nach [2] berechnen:

$$ {}^{sr}\mathbf{v}_R = \left[{}^{r}\mathbf{Y}_{RI} \left({}^{s}\mathbf{Y}_{II} + {}^{r}\mathbf{Y}_{II} \right)^{-1} {}^{s}\mathbf{Y}_{II} \right] {}^{s}\mathbf{f}_I^{\mathrm{bl}} \quad . \tag{1} $$

Damit wird deutlich, dass neben der blockierten Kraft auch die Eingangsadmittanzen der separierten Quelle und des Empfängers sowie die Transferadmittanz des separierten Empfängers vom Punkt I zum Punkt R notwendig. Diese können durch Impulshammermessungen unter der Randbedingung „frei/frei“ bestimmt werden.

Alternativ zur direkten Messung der blockierten Kraft wird in der kürzlich veröffentlichten ISO 20270 eine Methode zur indirekten Bestimmung standardisiert. In [1] und [2] wird dieses Vorgehen als „in-situ“-Messung bezeichnet. Dabei wird die Quelle mit einem Empfänger gekoppelt und betrieben. Die Empfängerstruktur kann ein beliebiger Prüfaufbau sein, an dessen dynamische Eigenschaften weniger spezifische Anforderungen gestellt werden. Jedoch ist der Aufbau so zu gestalten, dass an einem Referenzpunkt auf der Empfängerstruktur Betriebsschwingschnellen mit ausreichendem Signal-Rausch-Abstand gemessen werden können. Wird die Notation aus Abb. 1 beibehalten, folgt aus Gl. (1):

$$ \mathbf{f}^{\mathrm{bl}} = \tilde{\mathbf{Y}}^{-1} \, {}^{sr}\mathbf{v}_R \tag{2} $$

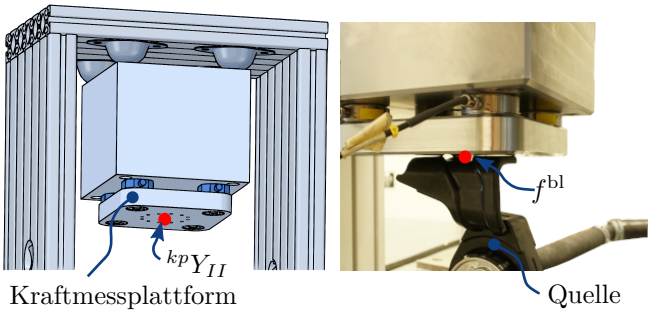

Abbildung 2: Aufbau zur Durchführung der direkten Kraftmessung

$$\text{mit:} \quad \tilde{\mathbf{Y}} = {}^{r}\mathbf{Y}_{RI}\,({}^{s}\mathbf{Y}_{II} + {}^{r}\mathbf{Y}_{II})^{-1}\ {}^{s}\mathbf{Y}_{II} \quad .$$

Wird der Koppelpunkt I als Referenzpunkt gewählt, kann die indirekt bestimmte blockierte Kraft:

$$\mathbf{f}^{\mathrm{bl}} = {}^{sr}\mathbf{Y}_{II}^{-1}\ {}^{sr}\mathbf{v}_{R} \tag{3}$$

$$\text{mit:} \quad {}^{sr}\mathbf{Y}_{II} = {}^{r}\mathbf{Y}_{II}\,({}^{s}\mathbf{Y}_{II} + {}^{r}\mathbf{Y}_{II})^{-1}\,{}^{s}\mathbf{Y}_{II}$$

angegeben werden. Dabei ist ${}^{sr}\mathbf{Y}_{II}$ die sich ergebende Eingangsadmittanz am Punkt I für den gekoppelten Zustand von Quelle und Empfänger. Neben der Berechnung mit Hilfe der Einzeladmittanzen ist ebenso eine direkte Messung der gekoppelten Admittanz möglich, sofern die Zugänglichkeit der Messstelle gegeben ist.

Messaufbau zur direkten Bestimmung der blockierten Kräfte

Für eine direkte Messung der blockierten Kraft ist die Lagerrandbedingung der Quelle so zu gestalten, dass für die Schnelle im betrachteten Messpunkt ${}^{s}\mathbf{v}_{I}^{\mathrm{bl}} \rightarrow 0$ gilt. Um diese Forderung zu erfüllen, muss für die Admittanz im betrachteten Punkt und für den gesamten interessierenden Frequenzbereich ebenfalls $\mathbf{Y}_{II}^{\mathrm{bl}} \rightarrow 0$ gelten. Bei der praktischen Umsetzung eines Prüfaufbaus ist dies jedoch nicht realisierbar, sodass lediglich eine Annäherung an die ideale Randbedingung möglich ist. Wird eine Kraftmesszelle als masselose Feder mit unendlicher Steifigkeit angenommen, kann die Abweichung der messbaren Kraft $\mathbf{f}^{\mathrm{mess}}$ zur Modellvorstellung blockierte Kraft $\mathbf{f}^{\mathrm{bl}}$ anhand der Eingangsadmittanzen ${}^{s}\mathbf{Y}_{II}$ (Quelle) und ${}^{kp}\mathbf{Y}_{II}$ (Kraftmessplattform kp) abgeschätzt werden [3]:

$$\frac{\mathbf{f}^{\mathrm{mess}}}{\mathbf{f}^{\mathrm{bl}}} = \frac{1}{{}^{kp}\mathbf{Y}_{II}/{}^{s}\mathbf{Y}_{II} + 1} \quad . \tag{4}$$

Für die Auslegung des Prüfaufbaus wird im vorliegenden Fall gefordert, dass die maximal zulässige Abweichung der messbaren zur idealen blockierten Kraft 10 % beträgt ($\mathbf{f}^{\mathrm{mess}}/\mathbf{f}^{\mathrm{bl}} \geq 0{,}9$). Die Admittanz der Kraftmessplattform ist daher näherungsweise so zu wählen, dass gilt:

$${}^{kp}\mathbf{Y}_{II} \leq 0{,}1\ {}^{s}\mathbf{Y}_{II} \quad . \tag{5}$$

Der sich daraus ergebende Prüfaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Die Kraftmessplattform wird mit vier triaxialen Kraftmesszellen an einem im betrachteten Frequenzbereich eigenfrequenzfreien Quader montiert. Dieser ist wiederum mit vier Lagerelementen an einem Gestell befestigt.

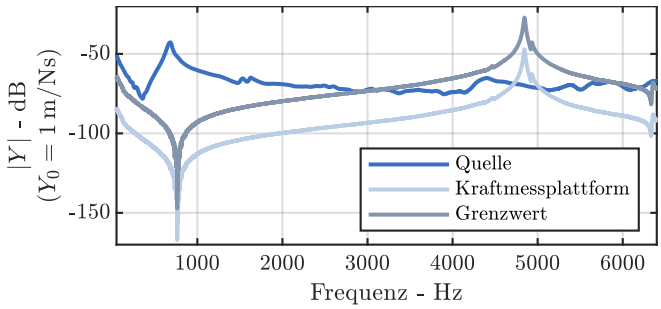

Abbildung 3: Nachweis der Randbedingung zur Messung der blockierten Kraft anhand der Eingangsadmittanzen

Die Lagerelemente sind so gewählt, dass alle sechs Starrkörpermoden des Quaders relativ zum Gestell unterhalb 25 Hz liegen. Der Nachweis zur Eignung des Aufbaus erfolgt anhand der real vorliegenden Admittanzen von Quelle und Kraftmessplattform. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde eine elektrische Wasserumwälzpumpe einschließlich hydraulischem Belastungskreis verwendet. Für die Richtung z (normal zur Oberfläche der Kraftmessplattform) sind Admittanzen in Abb. 3 dargestellt. Weiterhin ist darin die Grenzkurve nach Gl. (5) ausgehend von ${}^{kp}\mathbf{Y}_{II}$ enthalten. Das geforderte Admittanzverhältnis wird demnach bis 3000 Hz eingehalten und die Eignung des Aufbaus zur direkten Messung blockierter Kräfte ist sichergestellt.

Reduktion der Koppelfläche

Wie es bei der Modellierung mechanischer Systeme im Frequenzbereich häufig getan wird, wurde im bisherigen Verlauf vorausgesetzt, dass die Kopplung von Quelle und Empfänger in einem Punkt erfolgt. Wie anhand Abb. 2 zu sehen ist, liegt jedoch ein Flächenkontakt vor. Weiterhin wurde bisher auf eine Aussage zu den betrachteten Freiheitsgraden verzichtet und die Ausführungen allgemeingültig aufgestellt.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden Strukturen zur Bestimmung von Admittanzen in einem Freiheitsgrad angeregt (Shaker oder Impulshammer) und die Antwort mittels triaxialer Beschleunigungssensoren erfasst. Aufgrund dessen können für die Annahme eines Punktkontaktes bis zu drei translatorische Freiheitsgrade im Koppelpunkt berücksichtigt werden. Eine Berücksichtigung rotatorischer Freiheitsgraden ist damit nicht möglich und erfordert eine Erweiterung um die drei rotatorischen Freiheitsgrade. Sowohl Sensor- als auch Aktorsysteme zur gleichzeitigen Betrachtung aller sechs Freiheitsgrade im Frequenzbereich bis 3000 Hz sind derzeit nicht am Markt verfügbar.

Mit der Annahme, dass sich die Koppelfläche im betrachteten Frequenzbereich starr verhält und keine Moden innerhalb der Fläche auftreten, lassen sich die dynamischen Eigenschaften der gesamten Fläche auf einen Punkt mit sechs Freiheitsgraden reduzieren. Zur messtechnischen Erfassung aller sechs Freiheitsgrade sind mindestens drei triaxiale Sensoren notwendig, wobei eine Erhöhung der Sensoranzahl zu einer Reduzierung von Messfehlern führt [4]. Mit dem bekannten Abstand $\mathbf{d}^{(x,y,z)}$ jedes Sensors k zum betrachteten Reduktionspunkt lässt sich eine Matrix $\mathbf{D}_k$ aufstellen, mit deren Hilfe die Freiheitsgrade des Sen-

sors mit den sechs Freiheitsgraden des Reduktionspunktes in Verbindung gebracht werden. Die blockierten Kräfte $\mathbf{f}_I$ im Reduktionspunkt lassen sich anhand der Kräfte $\tilde{\mathbf{f}}_k$ des Sensors k ausdrücken:

$$\begin{bmatrix} f_I^{(x)} \\ f_I^{(y)} \\ f_I^{(z)} \\ f_I^{(\varphi)} \\ f_I^{(\theta)} \\ f_I^{(\psi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -d_k^{(z)} & d_k^{(y)} \\ d_k^{(z)} & 0 & -d_k^{(x)} \\ -d_k^{(y)} & d_k^{(x)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_k^{(x)} \\ \tilde{f}_k^{(y)} \\ \tilde{f}_k^{(z)} \end{bmatrix} . \quad (6)$$

Die allgemeine Form zur Berücksichtigung mehrerer Kraftmesszellen ergibt sich aus:

$$\mathbf{f_I} = \mathbf{D}\tilde{\mathbf{f}} \qquad \text{mit} \qquad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 & \dots & \mathbf{D}_k \end{bmatrix} . \quad (7)$$

In ähnlicher Weise lässt sich ein Ausdruck für die Schnellen im Reduktionspunkt finden. Somit ist es ebenso möglich, eine gemessene Admittanzmatrix der Dimension $(3 \cdot k \times l)$ auf einen Punkt zu reduzieren, wobei k die Anzahl der triaxialen Beschleunigungssensoren und l die Anzahl von Anregungspunkten bezeichnet. Für detaillierte Ausführungen wird an dieser Stelle auf [4] verwiesen. Die Methodik wird darin als „virtual point transformation“ bezeichnet.

Die vollständige Admittanzmatrix eines Reduktionspunktes besitzt auf Basis der berücksichtigten Freiheitsgrade die Dimension (6×6). In Abb. 4 ist die Admittanz ${}^s\mathbf{Y}_{II}$ des Empfängers am Reduktions- bzw. Koppelpunkt in Richtung xx exemplarisch darstellt. Die Beschränkung des Frequenzbereiches auf 2500 Hz wurde auf Basis des Anregungsspektrums der Impulshammermessungen getroffen. Qualitativ entspricht sowohl der Amplituden- als auch der Phasengang den Erwartungen an den Verlauf einer Punktadmittanz. Es sind zwei deutliche Einbrüche der Admittanz im Bereich 250 Hz und 1000 Hz erkennbar. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde mit Hilfe der Passivität („conductance value“- CV) nach [5] geprüft.

Ergebnisse

Als exemplarische Empfängerstruktur wird eine Fahrzeugkarosserie einschließlich Fahrgestell verwendet und aufgrund der einfachen Zugänglichkeit ein Koppelpunkt am

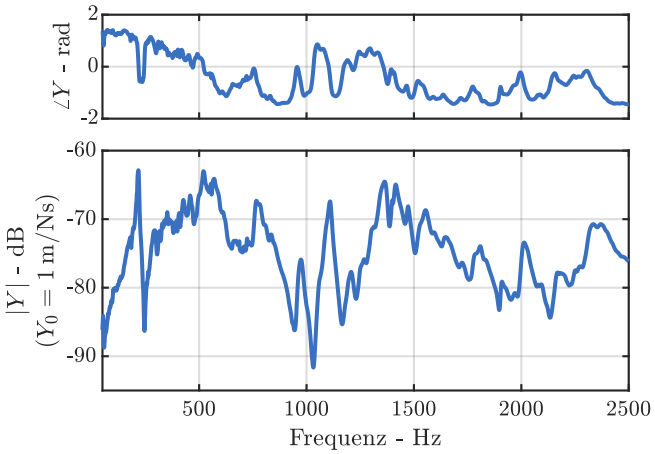

Abbildung 4: Reduzierte Punktadmittanz Y_{II}^{xx} des Empfängers im Koppelpunkt

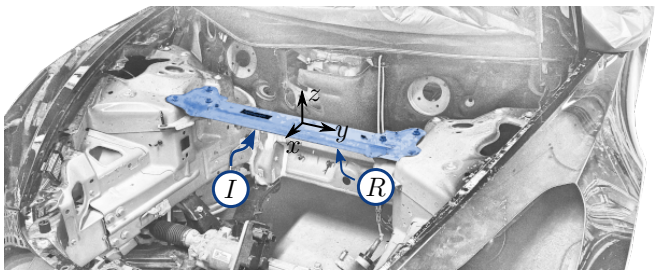

Abbildung 5: Aufbauten zur Messdurchführung

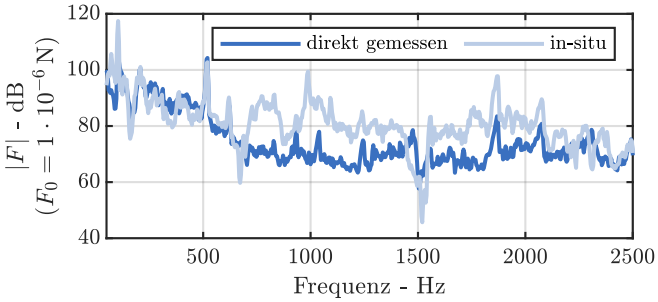

Abbildung 6: Direkt gemessene und in-situ ermittelte blockierte Kraft in Richtung x

Motorquerträger gewählt (siehe Abb. 5). Der Referenzpunkt R liegt ebenfalls auf dem Motorquerträger, fällt jedoch nicht mit dem Koppelpunkt I zusammen.

Blockierte Kräfte

Abb. 6 zeigt das Ergebnis der blockierten Kraft in Richtung x. Es ist der Vergleich vom Ergebnis der direkte Messung und der „in-situ“-Methode nach ISO 20270 bzw. Gl. (3) dargestellt. Für die „in-situ“-Methode werden Quelle und Empfänger gekoppelt, die Betriebsschwingungen um den Punkt I mit vier triaxialen Beschleunigungssensoren gemessen und auf sechs Freiheitsgrade im Punkt I reduziert. Es zeigt sich, dass mit der „in-situ“-Methode ab 700 Hz eine größere Kraft ermittelt wird als bei der direkten Methode. Da der korrekte Wert der Kraft nicht bekannt ist, ist an dieser Stelle keine Bewertung der Ergebnisse möglich. Im Nachfolgenden wird jedoch die Prognose mit beiden Datensätzen durchgeführt und mit einer Referenzmessung verglichen.

Referenzpunkt

Für die Referenzmessung wird die Quelle mit dem Empfänger gekoppelt, betrieben und die Betriebsschwingschnelle im Referenzpunkt in den drei translatorischen Richtungen gemessen. Mit beiden Ergebnissätzen der blockierten Kraft (direkt gemessen, „in-situ“) und unter Anwendung von Gl. (1) kann die Betriebsschwingschnelle am Referenzpunkt berechnet werden. Abb. 7 zeigt die drei Ergebnisse für einen konstanten Betriebspunkt in der Richtung x.

Für den Frequenzbereich bis 700 Hz kann mit den „in-situ“ bestimmten Kräften eine sehr gute Übereinstimmung am Referenzpunkt mit der Referenzmessung festgestellt werden. Im Bereich 900 Hz bis 1200 Hz kommt es jedoch zu einer deutlichen Überschätzung bei Anwendung der „in-situ“-Ergebnisse. Dies kann mit dem Einbruch der Eingangsadmittanz der Empfängerstruktur (siehe Abb. 4) begründet werden. Aufgrund der damit verbundenen Steifigkeitserhöhung und dem fehlen einer hohen Anregung

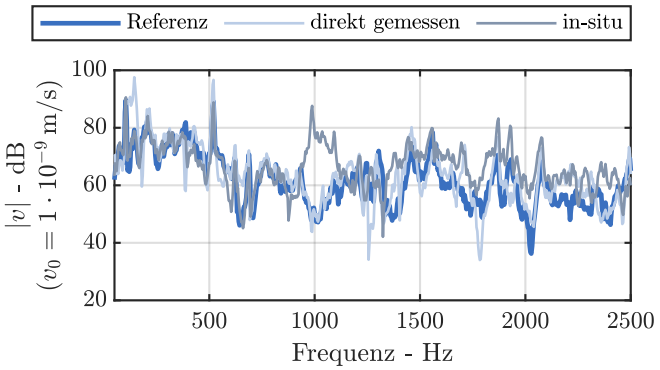

Abbildung 7: Gemessene und prognostizierte Schwingschnelle ${}^{sr}v_R^x$ im Referenzpunkt

(vgl. Abb. 6) ist die messbare Schwingschnelle bei Anwendung der „in-situ“-Methode sehr klein. Weiterhin wird die Admittanz ${}^{sr}\mathbf{Y}_{II}$ entsprechend Gl. (3) invertiert und vorhandene Fehler aufgrund einer geringen Sensoraussteuerung verstärkt. Auch im darüber liegenden Frequenzbereich sind zum Teil deutliche, wenn auch kleinere Abweichungen zur Referenzmessung zu verzeichnen. Jedoch ist eher zu einer Überschätzung der Betriebsschwingungen zu erkennen.

Werden die direkt gemessenen blockierten Kräfte zur Prognose verwendet, zeigt sich oberhalb von 200 Hz eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Referenzergebnissen. Im Bereich um 150 Hz kommt es jedoch auch hiermit zu einer signifikanten Überschätzung. Der Grund hierfür liegt im nicht näher betrachteten Einfluss der an die Wasserpumpe angeschlossenen Kühlmittelschläuche. Auch wenn für alle Messungen die identischen Schläuche verwendet werden, können aufgrund der praktischen Zugänglichkeit während der Fahrzeugmessung nicht die identischen Lagerrandbedingungen für die Schläuche im Vergleich zur direkten Kraftmessung realisiert werden. In Variantenmessungen der blockierten Kraft kann dies als relevante Einflussgröße im Frequenzbereich unterhalb 300 Hz identifiziert werden. Drehzahlunabhängige Überhöhungen der gemessenen Kräfte lassen auf vorhandene Eigenfrequenzen schließen. Da die Einzeladmittanzen unter fahrzeugnahen Bedingungen gemessen werden, wirkt sich der Einfluss der Lagerrandbedingung nicht auf die Ergebnisse der „in-situ“-Methode aus.

Der Einfluss der rotatorischen Freiheitsgrade bei der Kopplung von Quelle und Empfänger lässt sich in Abb. 8 veranschaulichen. Darin ist die Berechnung des Referenzpunktes auf Basis der direkt gemessenen Kräfte mit Berücksichtigung von allen sechs und von drei translatorischen Freiheitsgraden durchgeführt. Für fast den gesamten Frequenzbereich führen beide Methoden für die ausgewertete Richtung x zu vergleichbaren Ergebnissen. Um 500 Hz ist bei Berücksichtigung aller sechs Freiheitsgrade jedoch eine deutlich höhere Amplitude mit großem Anteil am Effektivwert festzustellen. Wie daran deutlich wird, ist die Notwendigkeit zur Berücksichtigung der rotatorischen Freiheitsgrade für den vorliegenden Fall frequenzabhängig und im Allgemeinen auch von den betrachteten Strukturen abhängig.

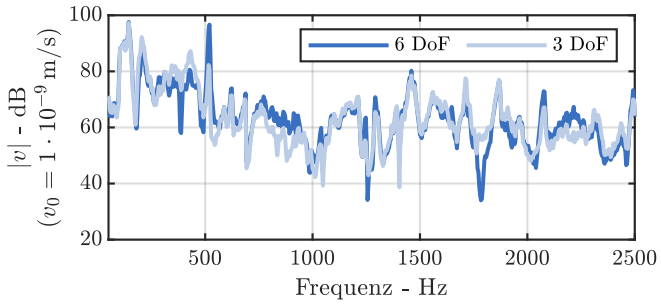

Abbildung 8: Berechnungsergebnis ${}^{sr}v_R^x$ bei Berücksichtigung von 6 und 3 Freiheitsgraden (DoF) im Koppelpunkt

Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Methodik und dem daraus entstandenen Prüfaufbau können die blockierten Kräfte in einen Punkt in sechs Freiheitsgraden direkt und rückwirkungsfrei gemessen werden. Die Prognose der Betriebsschwingschnellen führt im betrachteten Beispiel in großen Teilen des Frequenzbereiches bis 2500 Hz zu guten Übereinstimmungen mit der Referenzmessung. Jedoch ist ebenso festzuhalten, dass mit der Vernachlässigung der Kühlmittelschläuche ein deutlicher Fehler gemacht wird. Durch eine Verbesserung und Vereinheitlichung der Schlauchlagerung könnte dieser Fehler reduziert werden. Die „in-situ“-Methode zur Bestimmung der blockierten Kräfte führt ebenfalls nicht uneingeschränkt zu guten Prognoseergebnissen. Die Abweichungen sind für den betrachteten Anwendungsfall zum Teil größer. Um die Fehler aufgrund der Matrixinversion zu reduzieren, wird in der Literatur die Anwendung der Tikhonov-Regularisierung vorgeschlagen. Dies wird in zukünftigen Arbeiten Berücksichtigung finden und eine Einschätzung erlauben, inwiefern sich eine Verbesserung der „in-situ“-Ergebnisse durch Anwendung der Tikhonov-Regularisierung erzielen lässt oder eine Spezifizierung der notwendigen dynamischen Eigenschaften der Empfängerstruktur getroffen werden sollte.

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.: Körperschallanregung infolge tangentialer Luftspaltkräfte bei elektrischen Nebenaggregaten. Lärmbekämpfung 12 (4) (2017), 135-139

[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] Sturm, M.: Identification and quantification of transient structur-borne sound sources within electrical steering systems, Dissertation, Salford, (2013)