

Anwendung des Konzeptes der Interface-Mobilitäten auf einen Kühlschrankkompressor

Agnes Sayer, Dietmar Greussing

Technische Universität Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik

Email: agnes.sayer@tu-berlin.de

Einleitung

Maschinen agieren im eingeschalteten Zustand als Körperschallquellen, die an den Kontaktpunkten zur Empfangsstruktur Körperschalleistung übertragen. Eine Beeinflussung und Minderung der übertragenen Leistung erfolgt momentan vorwiegend durch Einbauten wie Isolatoren oder zusätzliche Massen, die die Impedanzen der jeweiligen Struktur verändern [1]. Allerdings ist dabei mit weiteren Schwierigkeiten zu rechnen, wie zum Beispiel der Dimensionierung der Isolatoren.

In diesem Beitrag wird untersucht, in wieweit die übertragene Leistung lediglich anhand kleiner konstruktiver Änderungen der Übertragungswege beeinflusst werden kann, ohne zusätzliche Einbauten zu verwenden. Als Grundlage dient dabei die Kombination zweier Berechnungskonzepte: die sogenannten Interface-Mobilitäten und die Kenngrößen Quelldeskriptor und Kopplungsfunktion.

Das Konzept der Interface-Mobilitäten zur Analyse der Körperschalleistung zwischen Quell- und Empfangsstrukturen wurde bereits in früheren Arbeiten vorgestellt [2]. Es verspricht eine Methode zur Charakterisierung von Körperschallquellen bei mehreren Kontaktpunkten und einen zusätzlichen Einblick in den physikalischen Übertragungsprozess. In Kombination mit dem Konzept von Quelldeskriptor und Kopplungsfunktion [5] können weitere Betrachtungen vorgenommen werden, die die Möglichkeit liefern, Lärminderungsmaßnahmen abzuleiten [2]. Dieses Vorgehen wird hier anhand eines Kühlschrankkompressors und der damit verbundenen Kühlschrankstruktur untersucht und hinsichtlich seiner praktischen Anwendbarkeit diskutiert.

Interface-Mobilitäten

Das Konzept der Interface-Mobilitäten beruht darauf, die örtlichen Feldgrößen wie Schnelle und Kraft sowie die örtlichen Mobilitäten an den Kontaktpunkten zwischen Körperschallquelle und Empfangsstruktur mittels räumlicher Fouriertransformation in sogenannte Ordnungen zu überführen, welche separat betrachtet werden können. Dabei bilden alle Kontaktpunkte zusammen das sogenannte Interface.

Die räumliche Fouriertransformation der örtlichen Schnelle ergibt die sogenannten Schnelleordnungen \hat{v}_p

mit der Ordnungszahl p

$$\hat{v}_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n e^{-j \frac{2\pi p n}{N}}, \quad (1)$$

wobei die Schnelle am Kontaktpunkt n über die Summe der einzelnen Ordnungen berechnet werden kann

$$v_n = \sum_{p=-\lfloor N/2 \rfloor}^{\lfloor N/2-1 \rfloor} \hat{v}_p e^{j \frac{2\pi p n}{N}}. \quad (2)$$

Dabei entspricht N der Gesamtzahl der Kontaktpunkte und der Anzahl der Ordnungen, die betrachtet werden müssen um die örtliche Größe exakt wiederherzustellen [2]. Der Ausdruck $\lfloor \cdot \rfloor$ bedeutet dabei, dass zur nächstkleineren ganzen Zahl abgerundet werden muss, während $\lceil \cdot \rceil$ einem Aufrunden zur nächstgrößeren ganzen Zahl entspricht.

Die Kraftordnungen \hat{F}_q sowie die Kräfte an den Kontaktpunkten F_m können, wie für die Schnelleordnungen und Schnellen am Kontaktpunkt gezeigt, analog dazu nach Gl. (1) und (2) bestimmt werden.

Örtlich abhängige Mobilitäten verknüpfen die anregende Kraft mit der daraus resultierenden Schnelle. Dementsprechend sind auch deren Ordnungsgrößen, die Interface-Mobilitäten, sowohl von den Ordnungszahlen der Schnelle p als auch von den Ordnungszahlen der Kraft q abhängig. Sie ergeben sich zu

$$\hat{Y}_{pq} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N Y_{nm} e^{-j \frac{2\pi p n}{N}} e^{-j \frac{2\pi q m}{N}}, \quad (3)$$

mit

$$Y_{nm} = \sum_{p=-\lfloor N/2 \rfloor}^{\lfloor N/2-1 \rfloor} \sum_{q=-\lfloor N/2 \rfloor}^{\lfloor N/2-1 \rfloor} \hat{Y}_{pq} e^{j \frac{2\pi p n}{N}} e^{j \frac{2\pi q m}{N}}. \quad (4)$$

Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Verbindung von p -ter Schnelleordnung und q -ter Kraftordnung über die sogenannte Kreuzordnung der Interface-Mobilitäten \hat{Y}_{p-q} gegeben ist. Die Verbindung von p -ter Schnelle- und Kraftordnung wird über die sogenannte Gleichordnung \hat{Y}_{p-q} beschrieben [3].

Ein Vorteil, den das Konzept der Interface-Mobilitäten bietet, ist die Möglichkeit zur physikalischen Interpretation der einzelnen Ordnungen. Es wurde in früheren Arbeiten gezeigt, dass die nullte Schnelleordnung die translatorische Bewegungskomponente beschreibt und die erste Schnelleordnung die rotatorische Bewegungskomponente, unabhängig von der genauen Position der Kontaktpunkte [4, 3].

Komplexe Leistung

Das Konzept der Interface-Mobilitäten erlaubt die Betrachtung der komplexen Leistung Q

$$Q = \frac{1}{2} (v \cdot F^*) \quad (5)$$

am Quelle-Empfänger Interface. Dabei werden die Ordnungsgrößen am Interface aufgestellt und die beiden Übergangsbedingungen, Kontinuität der Schnellen und Gleichgewicht der Kräfte, ausgewertet. Nach Vernachlässigung der Kreuzordnungen [3] ergibt sich eine Gleichung für die komplexe Leistung, abhängig von den Ordnungen der freien Schnelle der Quelle $\hat{v}_{p,fs}$ und den Gleichordnungen von Quelle $\hat{Y}_{p-p,S}$ und Empfänger $\hat{Y}_{p-p,R}$.

$$Q_p = \frac{1}{2} \frac{|\hat{v}_{p,Sf}|^2 \hat{Y}_{p-p,R}}{|\hat{Y}_{p-p,S} + \hat{Y}_{p-p,R}|} \quad (6)$$

Weiterhin kann die komplexe Leistung aufgespalten werden in den Quelledeskriptor und die Kopplungsfunktion [5]. Im Ordnungsbereich ergeben sich dann die Quelledeskriptorordnungen

$$S_p \approx \frac{1}{2} \frac{|\hat{v}_{p,Sf}|^2}{\hat{Y}_{p-p,S}^*}, \quad S = \sum_{p=-\lfloor N/2 \rfloor}^{\lfloor N/2 - 1 \rfloor} S_p. \quad (7)$$

Die Summe der Quelledeskriptorordnungen S_p definiert den Quelledeskriptor S für den Mehrpunktfall, welcher eine charakterisierende Größe für Körperschallquellen darstellt.

Die Ordnung der Kopplungsfunktion

$$C_{f,p} \approx \frac{\hat{Y}_{p-p,S}^* \hat{Y}_{p-p,R}}{|\hat{Y}_{p-p,S} + \hat{Y}_{p-p,R}|^2}, \quad (8)$$

kann durch eine Fehlanpassung der Gleichordnungen von Quelle und Empfänger manipuliert und reduziert werden.

Eine geschickte Kombination von Quelledeskriptor- und Kopplungsfunktionsordnung erlaubt daher eine Beeinflussung der komplexen Leistungsordnung. Dies kann wiederum ausgenutzt werden um Lärminderungsmaßnahmen abzuleiten, die sich aus kleinen konstruktiven Änderungen in den möglichen Übertragungswegen ergeben.

Kompressor und Kühltankstruktur

Die oben genannten theoretischen Überlegungen und die sich daraus ergebende Möglichkeit zur Ableitung von Lärminderungsmaßnahmen werden nun anhand eines Kompressors und der dazugehörigen Kühltankstruktur analysiert. Um den Einfluss der Übertragung durch die Kontaktpunkte genauer zu untersuchen, werden zwei unterschiedliche Interfaces betrachtet. Diese, sowie der Kompressor, sind in Abb. 1 zu finden. Dabei kennzeichnen die blauen Punkte das Interface, welches vom Hersteller vorgesehen ist. Es befindet

sich am flanschähnlichen Fortsatz des Kompressors. Die roten Punkte markieren ein Interface, welches zusätzlich untersucht wird, um die Auswirkungen der Interfaceabmessungen auf die komplexe Leistung zu analysieren. Es liegt direkt auf der rundlichen Kompressorstruktur und hat kleinere Abmessungen als das vorgesehene Interface.

Als tatsächliche Körperschallübertragungswege werden nur die Kontaktpunkte zwischen Kompressor und Kühltankstruktur betrachtet. Die Kühlmittel führenden Rohre und Schläuche, die mit der Kühltankstruktur verbunden sind und dementsprechend auch Leistung übertragen können, werden als Konstanten angesehen, die sich durch eine Variation der Interfaceabmessungen nicht ändern.



Abbildung 1: Kompressor und Interface-Positionen; ● vorgesehene Interface, ● zusätzliches Interface

Als Empfangsstruktur dient die dazugehörige Kühltankstruktur, siehe Abb. 2. Die blauen und roten Punkte in Abb. 3 markieren die untersuchten Kontaktpunkte.

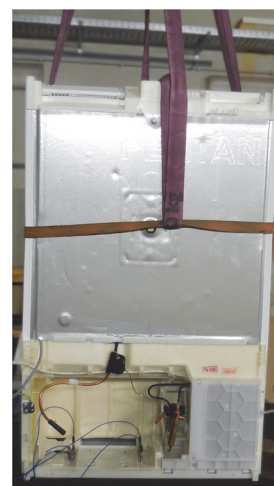


Abbildung 2: Frei aufgehängte Kühltankstruktur

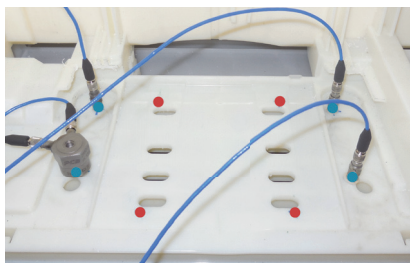


Abbildung 3: Interface-Positionen innerhalb der Kühl-schrankstruktur; ● vorgesehene Interface, ● zusätzliches Interface

Schnelle- und Gleichordnungen

Beispielhaft werden hier die Ergebnisse für die erste Ordnung gezeigt. So ist in Abb. 4 die erste Schnelleordnung für beide Interfacegrößen zu finden. Es ist zu sehen, dass das zusätzliche Interface mit den verkleinerten Dimensionen kleinere Werte als das vorgesehene Interface liefert, außer im Bereich zwischen 100 Hz und 200 Hz. Allerdings zeigt die Kohärenz in genau diesem Bereich einen Einbruch, so dass die Messergebnisse hier nicht vollständig bewertet werden können.

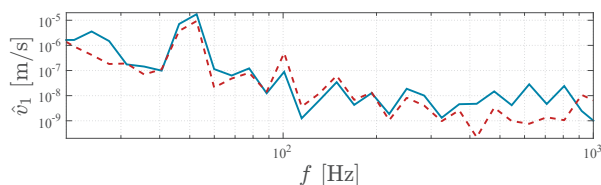


Abbildung 4: Erste Schnelleordnungen; — vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

Die höheren Werte für das vergrößerte Interface lassen sich anhand der physikalischen Bedeutung der erste Schnelleordnung erklären. Wie oben beschrieben, stellt diese Ordnung die rotatorische Bewegungskomponente um einen Rotationspunkt dar, welcher dem Mittelpunkt des Interfaces entspricht. Werden die Interfacedimensionen vergrößert, so nimmt auch der dazugehörige Hebelarm zwischen Kontaktpunkt und Rotationspunkt zu, was wiederum zu einer größeren Auslenkung und dementsprechend zu einer größeren Schnelle führt. In Abb. 5 ist dies schematisch an einer vereinfachten Struktur gezeigt. Die Auslenkung der Kontaktpunkte des vorgesehene Interfaces ist höher als die Auslenkung der Kontaktpunkte des zusätzlichen Interfaces.

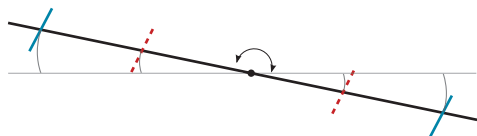


Abbildung 5: Rotatorische Bewegungskomponente einer Struktur; — vereinfachte Struktur, — vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

Zusätzlich zur ersten Schnelleordnung werden für die Bestimmung der ersten Ordnung der komplexen Leistung

noch die ersten Gleichordnungen von Quell- und Empfangsstruktur benötigt. Diese sind in Abb 6 und Abb. 7 zu finden. In beiden Fällen sind deutliche Unterschiede zwischen den Interfaces zu erkennen. So zeigt die erste Gleichordnung der Quelle für das zusätzliche Interface bei hohen Frequenzen deutlich kleinere Werte. Die erste Gleichordnung des Empfängers hingegen zeigt höhere Werte für das zusätzliche Interface, sowohl bei tiefen als auch bei hohen Frequenzen.

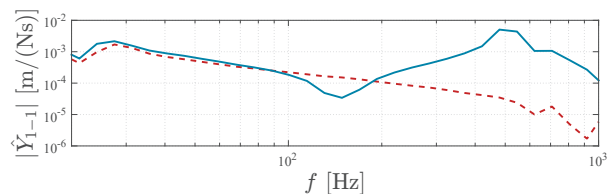


Abbildung 6: Erste Gleichordnung der Quelle; — vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

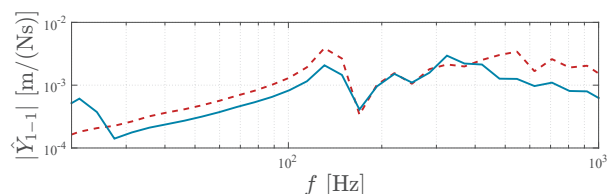


Abbildung 7: Erste Gleichordnung des Empfängers; — vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

Leistungsbetrachtungen

Es wurde gezeigt, dass die einzelnen Ordnungswerte wie Schnelleordnung und Gleichordnung von Quelle und Empfänger sich durch die Position der Kontaktpunkte und durch die Dimensionierung des Interfaces beeinflussen lassen. Werden die einzelnen Werte nun kombiniert, ergeben sich Leistungsgrößen wie Quelledeskriptorordnung, Kopplungsfunktionsordnung, komplexe Leistungsordnung und daraus resultierende übertragene Leistungen.

Die ersten Quelledeskriptorordnungen für beide Interfaces sind in Abb. 8 gezeigt. Nur leichte Unterschiede sind sichtbar und erst bei hohen Frequenzen kommt es zu einer Erhöhung beim zusätzlichen Interface. Diese Werte, als Teile der quellbeschreibenden Größe Quelledeskriptor, unterliegen wie zu erwarten nur leichten Änderungen bei gleichbleibender Quelle.

Im Gegensatz dazu zeigt die erste Ordnung der Kopplungsfunktion deutliche Unterschiede zwischen den beiden Interfaces. So sind die Ergebnisse für das zusätzliche Interface im Vergleich zum vorgesehene Interface bei tiefen Frequenzen höher. Es ist ein deutlicher Peak bei 50 Hz zu sehen, während bei hohen Frequenzen eine deutliche Erniedrigung auftritt. Dieser Verlauf ist auf eine zunehmende Fehlanpassung der Gleichordnungen von Quelle und Empfänger zurückzuführen.

Durch den ähnlichen Verlauf der ersten Quelledeskriptorordnungen und den unterschiedlichen Kopplungsfunkti-

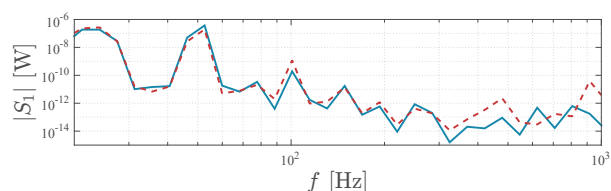


Abbildung 8: Erste Quelldeskriptorordnung;
— vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

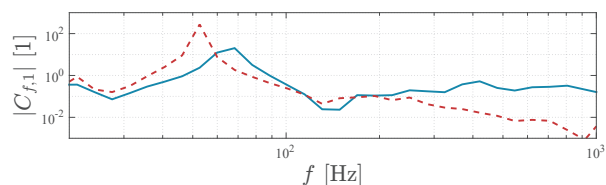


Abbildung 9: Erste Kopplungsfunktionsordnung;
— vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

ordnungen sind erste komplexe Leistungsordnungen zu erwarten, die den Verläufen der ersten Ordnungen der Kopplungsfunktion entsprechen. Diese sind in Abb. 10 zu finden.

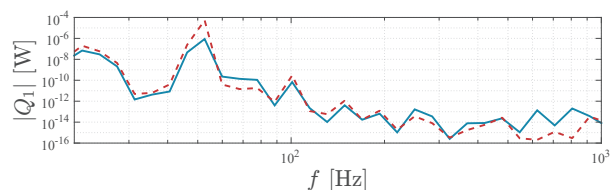


Abbildung 10: Erste komplexe Leistungsordnung;
— vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

Um die gesamte übertragene Leistung zu erhalten, müssen alle komplexe Leistungsordnungen aufsummiert und der Realteil gebildet werden. Diese Werte für beide untersuchten Interfaces sind in Abb. 11 dargestellt. Dabei sind die Werte als Pegel mit der Referenzgröße $W_0 = 10^{-12}$ W dargestellt und in Terzen angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass der dominante Frequenzbereich der Leistungsübertragung bei Mittenfrequenzen von 25 Hz und 50 Hz liegt. Hier ergeben sich Schallleistungspegel von 70 dB bzw. 80 dB.

Um die Unterschiede zwischen den Interfaces zu verdeutlichen, wird der direkte Pegelunterschied in Abb. 12 gezeigt. Es ergeben sich Unterschiede bis zu 15 dB. Bei den dominanten Peaks bei 25 Hz und bei 50 Hz sind Unterschiede von 7 dB und 4 dB zu erkennen.

Fazit

Die Kombination der Konzepte von Interface-Mobilitäten sowie Quelldeskriptor und Kopplungsfunktion erlaubt eine tiefergehende Betrachtung des Übertragungsprozesses von Körperschallquelle zu Empfangsstruktur, indem dominante Ordnungswerte, die elementare Schwingformen repräsentieren, herausgefiltert werden. Anhand eines Kompressors und der dazugehörigen

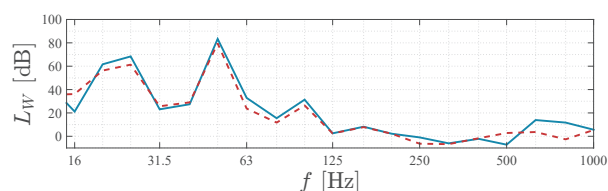


Abbildung 11: Gesamte übertragene Leistung;
— vorgesehene Interface, - - - zusätzliches Interface

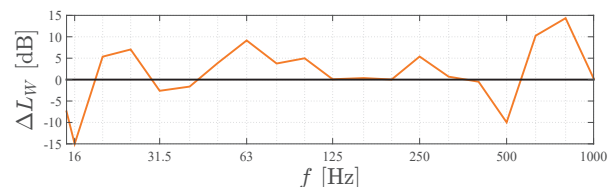


Abbildung 12: Pegeldifferenz der übertragenen Leistung

Kühlschrankstruktur wurde die Anwendbarkeit der Konzepte untersucht.

Es konnte beispielhaft gezeigt werden, dass die übertragene Leistung durch eine Änderung der Interfacedimensionen manipuliert werden kann. Letztendlich konnten bei der Berechnung der übertragenen Leistung Pegeldifferenzen bis zu 15 dB nachgewiesen werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 11688-2. Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 2: Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen, 2001
- [2] Bonhoff, H.A.: Interface Mobilities for Low-Noise Design of Structure-Borne Sound Sources. Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark
- [3] Bonhoff, H.A.: The influence and significance of cross-order terms in interface mobilities for structure-borne sound source characterization, Dissertation, TU Berlin, 2010
- [4] Sayer, A., Bonhoff, H.A.: Interpretation of velocity orders in the discretized formulation of interface mobilities. Proceedings of the International Conference on Acoustics, AIA-DAGA 2013:2246-2249, Merano, Italy
- [5] Mondot, J.M., Petersson, B.A.T.: Characterization of structure-borne sound sources: the source descriptor and the coupling function. Journal of Sound and Vibration, 114:507-518, 1987