

Modellentwicklung für die Auralisation von Industrieprodukten für 3D-VR-Anwendungen

Hannes Münch¹, Stefan-Georg Backhaus², Stefan Becker³

¹ *Bosch Rexroth AG, 97816 Lohr am Main, E-Mail: Hannes.Muench@boschrexroth.de*

² *Bosch Rexroth AG, 97816 Lohr am Main, E-Mail: Stefan-Georg.Backhaus@boschrexroth.de*

³ *Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, E-Mail: sb@ipat.uni-erlangen.de*

Einleitung

Das virtuelle Prototyping ist als Bestandteil des Produktentstehungsprozesses weit verbreitet. Werden die Ergebnisse dieser Methoden in Virtual-Reality (VR)-Systeme übertragen, liegt der Fokus meist rein auf der visuellen Wahrnehmung. Um auch den Höreindruck von virtuellen Prototypen in einer möglichst frühen Entwicklungsphase präsentieren und bewerten zu können, sollen im Rahmen des AVP³-Projekts Maschinengeräusche ausgewählter Industrieprodukte auralisiert und in eine visuelle 3D-VR-Technologie integriert werden [1]. Hierfür werden Daten zur Abbildung von Schallentstehung und Schallausbreitung benötigt, die durch Messungen oder Simulationen erhoben werden können.

Bisher ist in der Literatur noch kein Standard formuliert, welche Anforderungen bei der experimentellen Datengenerierung für die Auralisation einer Schallquelle erfüllt werden müssen. Daher soll für eine konkrete Anwendung ein Modell entwickelt werden, auf dessen Basis möglichst leicht verschiedene Messanordnungen und ihre Tauglichkeit hinsichtlich der räumlichen Abbildung einer Schallquelle in einer VR untersucht werden können.

Im Rahmen des Gesamtprojekts soll eine Motorpumpengruppe exemplarisch als Industrieprodukt auralisiert werden. Diese setzt sich aus den drei Schallquellen Pumpe, E-Motor und Axiallüfter zusammen. In dieser Arbeit soll jedoch alleine die Schallquelle des Axiallüfters im Fokus der Untersuchungen stehen.

Experimentelle Untersuchungen

Als Grundlage einer realitätsgetreuen, räumlichen Reproduktion einer Schallquelle dient eine Richtcharakteristikmessung. In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 3382-1 [2] wurde der Schalldruck als Zielgröße auf einer Kugeloberfläche im Halbfreifeld gemessen. Dazu wurden, wie in Abb. 1 dargestellt, auf einem Kreisbogen zehn Mikrofone zunächst im oberen und anschließend im unteren Quadranten angeordnet. Durch das Rotieren der Apparatur um die Schallquelle wurde der Schalldruck sequentiell auf einer Kugeloberfläche mit einem Kugelradius von 1 m in einer räumlichen Auflösung von 10° Elevationswinkel und Azimut erfasst.

Die Lagerung der Motorpumpengruppe limitiert zwar den messbaren Bereich auf das Intervall $\varphi \in [50^\circ; 320^\circ]$, wie ein Blick auf das Messgitter in Abb. 2 zeigt. Diese

Beschränkung reduziert sich jedoch auf einen Sektor, in dem das Maschinengeräusch der drei beschriebenen Schallquellen von der Pumpe und dem E-Motor bestimmt wird, so dass der Einfluss der Lüfterakustik auf das Auralisationsergebnis hier vernachlässigbar ist. Insgesamt ergibt sich durch die beschriebene Vorgehensweise ein Messgitter bestehend aus 478 Punkten.



Abbildung 1: Aufbau der Messung der Richtcharakteristik für einen Axiallüfter in Anlehnung an DIN EN ISO 3382-1.

Da der Lüfter nur in einem Betriebspunkt bei einer konstanten Drehzahl arbeitet, ist eine Messprozedur für die Abbildung der Schallquelle ausreichend.

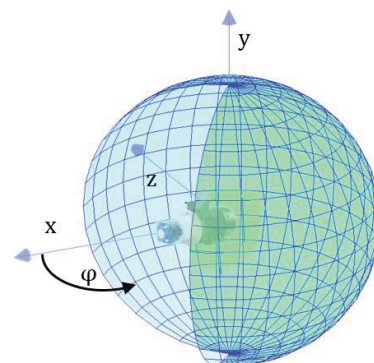


Abbildung 2: Messgitter der Mikrofonpositionen zur Bestimmung der Richtcharakteristik.

Die in den Abbildungen 2 und 4-6 illustrierte Motorpumpengruppe entspricht einer dem eigentlichen Produkt ähnlichen Einheit und soll als Orientierungshilfe für Messgitter- bzw. Messpunktanordnung dienen.

Die Auswertung der Messdaten in Abb. 3 zeigt zwei verschiedene Charakteristiken. Während sich für bestimmte Frequenzbereiche, die später in Abb. 4 genauer spezifiziert werden, eine dominante Schallabstrahlung in Richtung der Lüfterachse ausbildet (Abb. 3: linke Kugeloberfläche), kann für andere Frequenzen eine Abstrahlcharakteristik identifiziert werden, die genau senkrecht zur Lüfterachse orientiert ist (Abb. 3: rechte Kugeloberfläche).

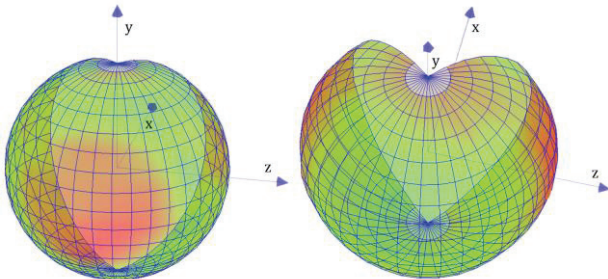


Abbildung 3: Abstrahlcharakteristik für verschiedene Frequenzbereiche. Links: Dominante Schallabstrahlung in Lüfterachse. Rechts: Dominante Schallabstrahlung senkrecht zur Lüfterachse.

Zur Verifizierung dieser Charakteristik wurde eine weitere Messung mit deutlich weniger Messpositionen durchgeführt, die eine synchrone Aufnahme der Daten in horizontaler Ebene erlaubte. Dabei wurden zehn Mikrofonpositionen äquidistant auf einem Kreisbogen mit dem Radius 1 m in der horizontalen Ebene des Lüfters verteilt, so dass sich eine Auflösung des Azimutwinkels von 36° ergab. Abb. 4 zeigt sowohl eine schematische Anordnung für sieben der zehn Mikrofonpositionen als auch einen Vergleich der Schalldruckspektren für die dargestellten Punkte. In dieser Abbildung treten nun auch quantitativ eindeutig die Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik hervor. Für die Frequenzbereiche um etwa 500 Hz und 800 Hz weist die Schallabstrahlung senkrecht zur Lüfterachse einen um mehr als 6 dB signifikant erhöhten Pegel auf. Wichtig ist außerdem, dass diese Charakteristik in gleichem Maße für beide Seiten ausgebildet ist.

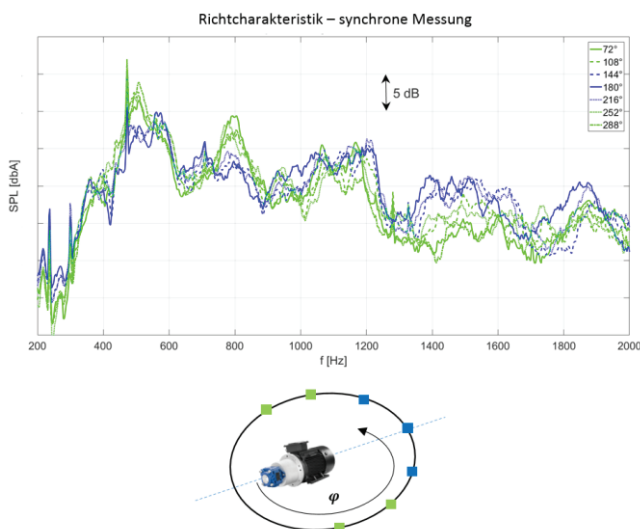


Abbildung 4: Schalldruckspektren für sieben Messpositionen in der horizontalen Ebene des Lüfters.

Im Frequenzbereich über 1 kHz zeigt sich, dass die beiden Messpositionen für $\varphi = 144^\circ$ und $\varphi = 216^\circ$ zum Teil bereits außerhalb des Fokus liegen, in dem die Schallabstrahlung in Lüfterachse dominant ist. Weiterhin geht aus dem Vergleich zwischen dem Schalldruckspektrum der Messposition von $\varphi = 180^\circ$ (blau durchgezogen markiert) und den seitlich angeordneten Punkten (grün markiert) hervor, dass die Richtcharakteristik über 1 kHz in Lüfterachse immer wieder deutlich dominant ist. Insgesamt liegt der Schalldruck im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 2 kHz fast durchweg oberhalb der seitlichen Messpositionen.

Ausgehend von der beschriebenen, frequenzabhängigen Richtcharakteristik wird die Annahme getroffen, dass dieses Verhalten durch aeroakustische Analogien mit idealisierten Näherungsmodellen approximiert werden kann.

Approximation des Schallfelds

Die Approximation des Schallfelds ergibt sich als Superposition von Monopol- und Dipolquellen. Als elementare Lösung der Wellengleichung berechnet sich für einen Monopol im Koordinatenursprung der Schalldruck

$$p = \frac{A_M}{r} e^{ikr} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

mit der Monopolamplitude A_M , dem Abstand r vom Koordinatenursprung und der Wellenzahl k für eine ungerichtete Kugelwelle [3], [4]. Da die Monopolquelle den richtungsunabhängigen Anteil der abgestrahlten Schallwellen darstellt, wird die Amplitude A_M durch eine räumliche Mittelung über die gemessenen Schalldruckspektren auf der Kugeloberfläche angenähert. Dabei ausgenommen sind die Bereiche für die Elevationswinkel $\vartheta < 30^\circ$ und $\vartheta > 150^\circ$, die sehr nah an Raumdecke und –boden lokalisiert sind. Es ist daher davon auszugehen, dass die Messdaten in diesen Kugelabschnitten die größten Messunsicherheiten beinhalten, welche durch die Einschränkung des Mittelungsbereichs nicht in die Berechnung der Monopolamplitude überführt werden.

Bei der Untersuchung der Phaseninformationen konnte für das Geräusch des Lüfters trotz eines ortsfesten Referenzmikrofons am oberen Drehpunkt des Kreisbogens keine feste Phasenbeziehung festgestellt werden. Vielmehr ergibt sich infolge der turbulenten Lüfterströmung ein breitbandiges Geräusch. Experimente ergaben, dass das zur Implementierung der Elementarstrahler nötige Phasenspektrum daher auch zufällig generiert werden kann und diese Vorgehensweise auf das perzeptive Empfinden keinen Einfluss hat.

Mit der Ansatzfunktion aus Gleichung (1) kann die Dipolquelle als eine Superposition zweier Monopolquellen mit gleicher Amplitude und entgegengesetzter Phase beschrieben werden [3]. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet, dass für jede einzelne Frequenz im abgebildeten Schalldruckspektrum das Schalldruckmaximum auf der Kugeloberfläche erfasst und die Orientierung des Dipols entsprechend in oder senkrecht zur Lüfterachse festgelegt wird. Der beschriebenen

Richtcharakteristik wird durch diese Vorgehensweise entsprochen.

Da der Dipol genau den Anteil der Schalldruckwellen abbildet, der die Richtungsabhängigkeit der Schallquelle beschreibt, berechnet sich die Dipolamplitude für jede Frequenz als Differenz zwischen gemessenen Maximalwert und gemittelter Monopolamplitude.

Insgesamt wird mit einem derartigen Approximationsansatz eine Funktion nach dem Superpositionsprinzip generiert, die die wellenförmige Ausbreitung des Schalldrucks in einer beliebigen räumlichen Auflösung beschreibt.

Vergleich von Messung und Approximation

Die hergeleitete, approximierte Funktion soll anhand zweier Raumpunkte mit den Messdaten verglichen und bewertet werden.

Senkrecht zur Lüfterachse

Zunächst soll in Abb. 5 für einen Messpunkt seitlich der Lüfterachse das Schalldruckspektrum von Messung, Monopol und Approximation gegenübergestellt werden. Hier ergibt sich eine Differenz zwischen Monopol und Approximation immer genau dann, wenn für den dargestellten Raumpunkt eine dominante Schallabstrahlung gemessen werden konnte. Von besonderer Bedeutung sind daher in dem dargestellten Spektrum die Bereiche bei etwa 500 Hz und 800 Hz. In diesen Frequenzen unterschätzt die berechnete Monopolamplitude den gemessenen Schalldruck um ca. 6 dB. Durch die Überlagerung des Dipols, der die spezifische Richtcharakteristik abbildet, adaptiert die Approximation die Pegelwerte der Messung sehr gut.

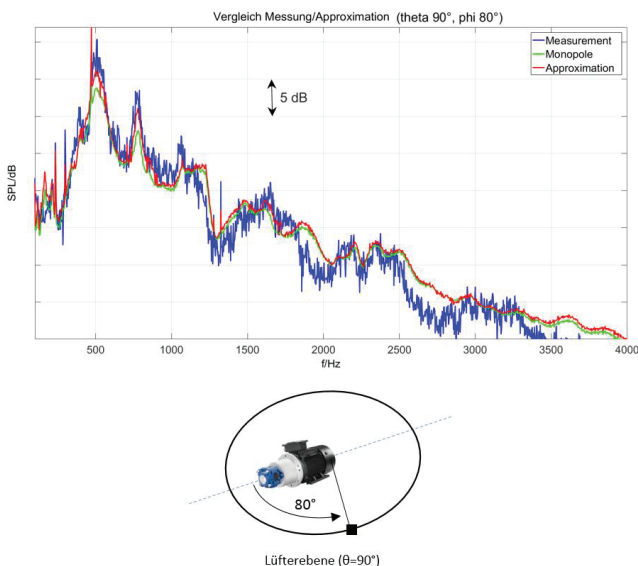


Abbildung 5: Vergleich des Schalldruckspektrums zwischen Messung, Monopol und Approximation für einen Raumpunkt im Bereich senkrecht der Lüfterachse.

Im Frequenzbereich über 1 kHz manifestiert sich die Beobachtung aus der synchronen Richtcharakteristikmessung. Hier ist die Schallabstrahlung für seitlich zur Lüfterachse ausgerichtete Gebiete nicht dominant, so dass sich das Spektrum der Approximation konsequenterweise sehr stark am Monopolspektrum orientiert. Auch wenn das

Verhalten durch die angenäherte Funktion generell für den höheren Frequenzbereich qualitativ getroffen wird, ergeben sich infolge des Mittelungsansatzes zur Berechnung der Monopolamplitude quantitative Unterschiede.

In Lüfterachse

Da das Abstrahlverhalten des Lüfters grundsätzlich in zwei verschiedene Ausprägungsformen eingeteilt wurde, stellt Abb. 6 den Vergleich zwischen den Schalldruckspektrums von Messung, Monopol und Approximation für einen Messpunkt in Richtung der Lüfterachse dar.

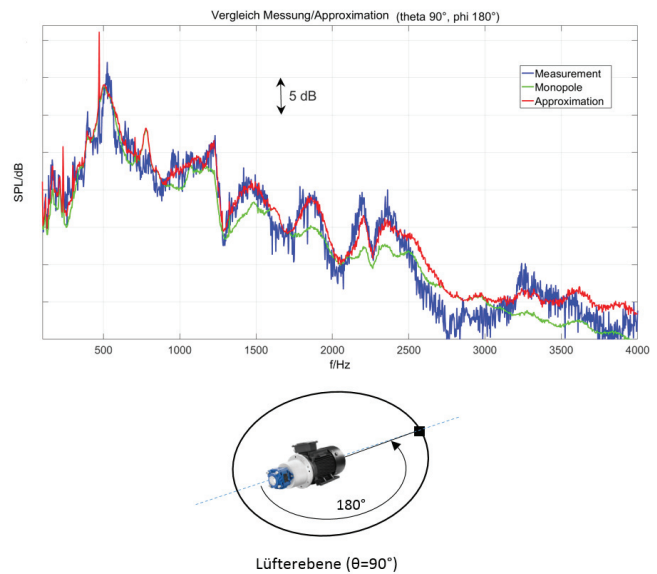


Abbildung 6: Vergleich des Schalldruckspektrums zwischen Messung, Monopol und Approximation für einen Raumpunkt in Richtung der Lüfterachse.

Für Frequenzen unterhalb von 1 kHz wird der Wirkzusammenhang der Dipolimplementierung deutlich. Während für die Frequenzbereiche um 500 Hz und 800 Hz der Schalldruckpegel der Approximation in Abb. 5 aufgrund des senkrecht zur Lüfterachse orientierten Dipols signifikant erhöht wurde, hat die Dipolstrahlung für diese Frequenzen konsequenterweise keinen Einfluss auf den Schalldruck in Abb. 6. Ferner ist festzustellen, dass der erste Peak der Messung von der Approximation gut getroffen wird, bei 800 Hz jedoch überschätzt der angenäherte Schalldruckpegel aufgrund der Mittelung der Monopolamplitude die Messdaten.

Im weiteren Verlauf des Schalldruckspektrums bis etwa 2,5 kHz wird dagegen eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen Approximation und Messung erreicht. In diesem Bereich wird durch die Superposition des Dipols der Schalldruckpegel derart erhöht, dass die Approximation die realen Werte sehr gut adaptiert. Erst über 2,5 kHz ergeben sich infolge der gewählten Methodik erkennbare Differenzen.

Das entscheidende Kriterium bei der Bewertung des approximierten Schallfeldes stellt jedoch nicht der spektrale, sondern der perzeptive Vergleich von echtem und angenähertem Lüftergeräusch dar. Zwar ist ein Unterschied zwischen den akustischen Signalen wahrnehmbar, jedoch

kann das vernommene Geräusch als plausibel eingeschätzt werden und bildet gerade vor dem Hintergrund des relativ einfachen, zugrundeliegenden physikalischen Modells die realen Verhältnisse sehr gut ab.

Um auch die perzeptive Beurteilung der Approximation klassifizieren zu können, sollen Probandenstudien als Teil der zukünftigen Forschungsarbeit durchgeführt und ausgewertet werden.

Anwendungsmöglichkeit

Die eingeführte Approximation beschreibt als Funktion das Schallfeld des Axiallüfters hinreichend genau, um als Basis weiterer Untersuchungen herangezogen zu werden. Der große Vorteil ist nun, dass diese Funktion in einer beliebigen räumlichen Auflösung vorliegt. Damit können für jeden Raumpunkt virtuell Mikrofonpositionen definiert und entsprechende Zeitsignale generiert werden.

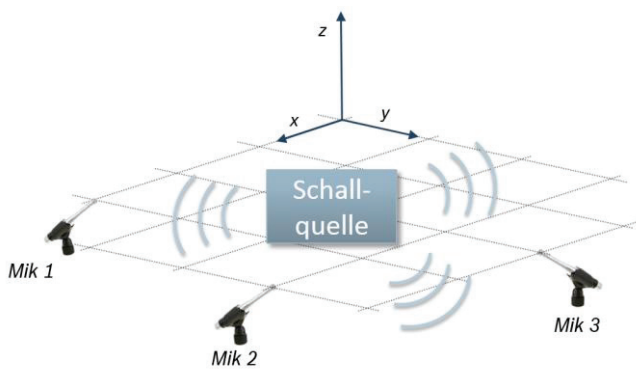


Abbildung 7: Schematische Darstellung zur variablen Definition virtueller Messpositionen.

Diese Vorgehensweise eröffnet die Möglichkeit, verschiedene Messszenarien mit einer frei wählbaren Mikrofonanzahl und -positionierung in kurzer Zeit zu simulieren und den Aufwand im Vergleich zu realen Messungen so drastisch zu reduzieren. Ziel weiterer Untersuchungen soll zukünftig sein, den Einfluss des Messsetups auf das Ergebnis der virtuellen, räumlichen Darstellung einer Schallquelle hin zu analysieren. Durch die Beurteilung des Auralisationsresultats soll klassifiziert werden, wie umfangreich der Messaufwand für die Generierung der Daten, die dem Auralisationsprozess zugrunde liegen, gestaltet werden muss.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Ansatz untersucht, der die Bewertung verschiedener Messszenarien als Grundlage des Auralisationsprozesses von Industrieprodukten für dreidimensionale VR-Anwendungen ermöglichen soll. Die Untersuchungen wurden am Beispiel eines Axiallüfters - einer von drei Schallquellen einer Motorpumpengruppe - durchgeführt. Zunächst wurde die Schalldruckverteilung sequentiell auf einer Kugeloberfläche mit dem Kugelradius von 1 m gemessen, um das gerichtete Abstrahlverhalten des Lüfters zu charakterisieren. Die anschließende Auswertung der Daten wies zwei konträre Eigenschaften der

Richtcharakteristik auf: Während für einzelne Frequenzbereiche unterhalb von 1 kHz eine signifikant erhöhte Schallabstrahlung senkrecht zur Lüfterachse identifiziert werden kann, wird die Richtcharakteristik über 1 kHz von der Richtung in Lüfterachse dominiert.

In einer weiteren Messung mit einer synchronen Datenerfassung in horizontaler Ebene wurde dieses Verhalten zusätzlich validiert.

Anschließend wurde die beschriebene Richtcharakteristik mit aeroakustischen Analogien approximiert. Durch die Implementierung eines Monopolstrahlers wird der ungerichtete Anteil des emittierten Schalldrucks des Axiallüfters angenähert. Ein frequenzabhängig orientierter Dipol bildet dagegen die spezifische Richtcharakteristik der Schallquelle ab. In einem spektralen Vergleich der Schalldruckpegel wurde für zwei verschiedene Punkte gezeigt, dass die Approximation die realen, gemessenen Verhältnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gut adaptiert.

Mit dieser Herangehensweise wurde eine Funktion als Beschreibung des emittierten Schalldrucks eines Axiallüfters auf Basis von Elementarstrahlern hergeleitet, die das reale Wellenfeld der Schallquelle hinreichend genau beschreibt. Die Schallfeldapproximation bietet nun den Vorteil, dass sie eine beliebige räumliche Auflösung besitzt. Damit kann an jeder Stelle im Raum ein Zeitsignal für den Schalldruck simuliert und verschiedene Messszenarien virtuell nachgestellt werden. Der Aufwand für reale Messungen wird auf diese Weise drastisch reduziert. Anhand der entwickelten Approximation soll in zukünftigen Arbeiten der Einfluss der Messanordnung auf das Auralisationsergebnis untersucht werden.

Literatur

- [1] AVP³ Homepage,
URL: <http://www.avp3.info/>
- [2] DIN EN ISO 3382-1:2009:10,
Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik,
Teil 1: Aufführungsräume
- [3] Möser, M.: Technische Akustik. Springer Verlag,
Berlin, 2012
- [4] Lerch, R., Sessler, M., Wolf, D.: Technische Akustik.
Springer Verlag, Berlin, 2009