Stand der Wissenschaft der Auralisation in der Maschinenakustik

Sabina Benatti Camargo[1], Christian Adams[1], Tobias Melz[1,2]
[1] *Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt*
E-Mail: sabina.benatti.camargo@sam.tu-darmstadt.de
[2] *Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Bartningstraße 47, 64289 Darmstadt*

Einleitung

Auralisation ist die Technik zur Erzeugung hörbarer Tondateien aus numerischen oder experimentellen Daten. Mathematisch handelt es sich um eine Faltung zwischen dem Audio-Quellmaterial und der Impulsantwort eines gegebenen Raumes an einer gegebenen Position, die auf einem Sound-Rendering-System wiedergegeben wird [1]. Das Ziel ist nicht in erster Linie, das Audio-Quellmaterial an sich wiederzugeben, sondern den Höreindruck der akustischen Eigenschaften eines Raumes, sei es im Freien oder in Innenräumen, zu reproduzieren [2]. Derzeit werden akustische Größen wie Frequenzspektren oder Pegelgrößen verwendet, um verschiedene akustische Designvarianten eines Produktentwurfs zu vergleichen. Deshalb benötigen die Entscheidungsträger akustisches Fachwissen und der Entscheidungsprozess kann erheblich erschwert und verlangsamt werden, da ein Produkt erst optimiert werden kann, wenn es bereits gebaut wurde. Im Gegensatz dazu vermittelt die Auralisation einen realen Höreindruck während der Produktentwicklung und erleichtert die Bewertung verschiedener akustischer Gestaltungsvarianten. Technische Herausforderungen dieser Methode sind noch zu beherrschen, um die auralisierten Klänge der Variationen im akustischen Design des Produkts und die Unsicherheit, die sich aus der subjektiven Bewertung der auralisierten Klänge ergibt, tatsächlich darstellen zu können [3]. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft zu den Methoden in der Auralisation im Bereich der Maschinenakustik und die wichtigsten Herausforderungen im Zusammenhang mit dieser Technik.

Auralisation in der Produktentwicklung der Maschinenakustik

In vielen Industriezweigen ist die von einem Produkt ausgehende Schallabstrahlung ein Designparameter, der entweder durch internationale Normen oder einfach durch die Präferenzen der Endverbraucher bestimmt wird. Gleichzeitig muss die Entwicklung neuer Produkte in immer kürzeren Abständen erfolgen. Dies bedeutet, dass ein auf Versuch und Irrtum basierender Ansatz zur Geräuschminimierung, bei dem jeder Versuch gebaut und getestet werden muss, sehr umständlich und zu zeitaufwändig ist. Bei der Entwicklung eines mechanischen Bauteils ist es wichtig, die von einer schwingenden Struktur abgestrahlte Schallleistung vorhersagen zu können, aber noch vorteilhafter ist es, eine Simulation des abgestrahlten Schalls in einer simulierten Umgebung hören zu können. Die Kenntnis des Schallfeldes im Voraus hat mehrere Vorteile: So kann das Produkt bereits in der Entwurfsphase akustisch optimiert werden, was Zeit und Geld spart [4]. Im Automobilbereich kann z.B. der Fahrzeugklang in jeder Phase des Entwicklungsprozesses hör- und erlebbar werden, indem Zielvorgaben, CAE-Daten, Testdaten auf Komponentenebene, gemessene Benchmark-Daten oder eine Kombination aus all diesen Faktoren verwendet werden können [5]. Neben der Erleichterung der Entscheidungsfindung durch die Simulation verschiedener Konfigurationen und möglicher Nutzungen des zu gestaltenden Raums verbessert die Auralisation die Kommunikation mit den Kunden, indem sie ihnen ein direktes Hörerlebnis des Raums vermittelt, ohne sie mit akustischen Fachbegriffen zu verwirren [6]. Da Geräusche Emotionen wecken, kann ein Kunde, der z.B. das Geräusch einer sich schließenden Autotür hört, ein Gefühl von Sicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität wahrnehmen und eher geneigt sein, das Produkt zu kaufen [7]. Die vollständige Charakterisierung und Interpretation von Klang kann letztlich nur erreicht werden, wenn das Gehör und andere Sinne direkt beteiligt sind. Daher bietet die Technik der Auralisation eine wichtige Erweiterung der akustischen Analyse und Synthese, der Vorhersage und Bewertung. Sie bezieht den Hörer direkt mit ein. Sie stellt eine wichtige Komponente der multimodalen Empfindung und der entsprechenden psychologischen Effekte dar [1]. Lutz (Anm. d. Autoren: Antriebssysteme, Getriebe, Elektrische Maschinen), und Hermes schreiben: „Nachdem nun komplette Systeme inklusive einzelner Teile und deren Kraft und Vibration in Simulationssoftware dargestellt werden können, ist der nächste logische Schritt die Akustik. Wir wollen die Übertragung in der Simulation hörbar machen. Und das wollen wir quantitativ und qualitativ tun. Ähnlich wie Sounddesigner für Autotüren wollen wir sicherstellen, dass unsere Übertragungen nicht zu laut sind und eine gute Akustik haben"[8]. Daher ist die Rolle der Auralisation in der Produktentwicklung der Maschinenakustik evident.

Das Ziel dabei ist, bereits in frühen Phasen des Entwurfsprozesses Aussagen über das Produktverhalten zu bekommen. Die hauptsächliche Herausforderung liegt also darin, geeignete Simulationsmodelle und Methoden bereitzustellen, wobei der Schwerpunkt auf der Darstellung des akustischen Verhaltens von Produkten liegt. Das Modell, das die akustischen Eigenschaften des Produkts repräsentiert, muss in Echtzeit auralisiert werden, um die Interaktion und Modifikation relevanter Design- und Akustikparameter (Geometrie, Material, Schallabstrahlung, etc.) zu ermöglichen [9]. Die Computerentwicklung führt zu einer Erweiterung der Möglichkeiten der Simulation von Maschinengeräuschen und zu einer Verbesserung der Qualität der akustischen Wiedergabeverfahren, so dass die Audiowiedergabe in Echtzeit an das Nutzerverhalten angepasst werden kann. Die Interaktionsfähigkeit mit der akustischen Umgebung ist eine grundsätzliche Eigenschaft einer immersiven VR-Applikation [10], das bedeutet, dass es eine Übereinstimmung, zwischen dem Gesehenen (Visualisierung) und dem Gehörten (Auralisierung) gibt. VR-Systeme werden allmählich zu unverzichtbaren Werkzeugen in dem Bereich der Maschinenakustik. Forschung und Entwicklung im Bereich VR haben traditionell die visuelle Seite von VR favorisiert [11]. Es ist daher wichtig, die Audio-Seite von VR-Modellen zu entwickeln, und es wird viel Arbeit in diesem Bereich geleistet [12]. Der Prozess der Auralisation einer VR-Umgebung besteht in der künstlichen Nachbildung der Schallreize, die die beiden Ohren (binauraler Schall) eines Hörers erreichen würden, die sich tatsächlich in dieser Umgebung befinden. Zu diesem Zweck werden Sätze von kopfbezogenen Impulsantworten (HRIR) oder äquivalent dazu ihre entsprechenden Fourier-Transformationen (bekannt als kopfbezogene Übertragungsfunktionen - HRTF) verwendet [13]. Ein HRIR-Satz enthält die an jedem Ohr gemessenen Antworten auf Dirac-Impulse, die an Punkten erzeugt werden, die über eine kugelförmige, auf den Kopf des Zuhörers zentrierte Fläche verteilt sind. Diese Antworten erfassen die wichtigsten Eigenschaften, die vom menschlichen Gehirn zur Lokalisierung einer Schallquelle verwendet werden, nämlich die interaurale Zeitdifferenz (ITD) und die interaurale Intensitätsdifferenz (IID) sowie spektrale Eigenschaften, die von der Anatomie der Ohrmuscheln, des Kopfes und des Rumpfes des Hörers abhängen [14, 15]. Wenn die Ortung in einer geschlossenen Umgebung stattfindet, muss auch der Nachhall, d. h. die Wirkung von Reflexionen des Signals an Wänden und Gegenständen berücksichtigt werden. Dann müssen nicht nur der Direktschall (d.h. der Schall, der direkt von den Quellen kommt), sondern auch die Reflexionen an den Raumbegrenzungen (die als Direktschall von Bildquellen jenseits der Begrenzungen betrachtet werden können) berücksichtigt werden. In diesem Fall muss die BRIR gemessen oder simuliert werden [10].

Simulationskette zur Durchführung der Auralisation in der Maschinenakustik

Ziel einer zukünftigen Arbeit ist es, ein numerisches Modell einer Maschine in einem Raum zu auralisieren, so dass der simulierte Klang des Modells so realistisch wie möglich klingt. Bei dieser Maschine kann es sich um einen Motor, eine Pumpe oder ein Getriebe handeln. Zur Validierung des Modells müssen geeignete Näherungswerte verwendet werden. In den bisher durchgeführten Untersuchungen zur Auralisation in der Maschinenakustik wurde ein wiederkehrendes Schema erkannt, das in der Simulationskette der folgenden Abbildung 1 zusammengefasst ist.

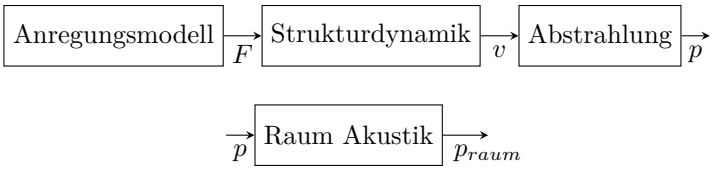

Abbildung 1: Schallentstehungskette [16]

Die Amplituden der Anregungskräfte stehen in direktem Zusammenhang mit dem Freifeld-Schalldruck auf einer die Quelle umgebenden Hüllfläche. Es ist daher möglich, die Struktur- und Strahlungsdaten im Voraus zu berechnen und anschließend das in Echtzeit erhaltene Schalldrucksignal zu auralisieren [16]. Die Auralisation der zu untersuchenden Quelle umfasst vier Simulationsschritte: Anregungskraft-Simulation, Strukturdynamik-Simulation, Abstrahlung-Simulation und Raumakustik-Simulation, wenn die Quelle in einem Raum hörbar gemacht werden soll. Bezüglich der Simulation der Anregungskräfte ist eine Mehrkörperanalyse häufig erforderlich, um die auf das System wirkenden Kräfte zu berechnen, da es sich bei den meisten Geräuschquellen im Maschinenbau um komplexe Systeme handelt [17]. Adams ist eine der am häufigsten verwendeten Software zur Durchführung solcher Analysen [18]. Ausgangspunkt der rechnerischen Untersuchung ist in der Regel ein CAD-Modell einer schallerzeugenden Strukturfläche. Mittels spezieller Schnittstellen werden die Geometriedaten entweder direkt in einen Finite-Elemente-Code (z.B. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, PERMAS) oder in einen Preprocessor (z.B. IDEAS, PATRAN) importiert. In beiden Fällen wird anschließend ein Finite-Elemente-Netz erzeugt, wobei der gesamte rechnerische und manuelle Aufwand zur Fertigstellung dieses Netzes stark von der Art der verwendeten Elemente abhängt. Ist das Berechnungsmodell fertiggestellt, wird meist eine FE-Analyse durchgeführt, um die Geschwindigkeiten der schwingenden Strukturoberfläche zu bestimmen. Anschließend werden diese Oberflächenergebnisse zusammen mit dem Strukturnetz in eine akustische Computersoftware (z.B. SYSNOISE, Virtual.Lab) importiert. Hier werden alle für Akustiker wichtigen Größen wie Schalldruckpegel, Geschwindigkeiten, Intensitäten oder abgestrahlte Schallleistung berechnet. Manchmal werden auch

Optimierungsalgorithmen eingesetzt, um direkt nach der besten akustischen Lösung zu suchen. In den meisten Fällen werden Schallabstrahlungsprobleme mit Hilfe der Randelementmethode Software (z.B. COMSOL, Siemens) untersucht, da die Energieausbreitung ins Unendliche implizit in der Formulierung der Randelementmethode enthalten ist [19]. Durch die BEM-Simulation ist es möglich, den Schalldruck oder das Signal der zu auralisierenden Quelle im Freifeld zu berechnen [10]. Um das System im Frequenzbereich durch Übertragungsfunktionen beschreiben zu können, ist eine Voraussetzung für die Anwendung der Simulationskette, dass alle auftretenden Effekte zumindest näherungsweise linear zeitinvariant sind [10]. Die Übertragungsfunktion der Struktur führt zu einer Verbindung zwischen der Kraft F und der Oberflächengeschwindigkeit v. Die Simulation der Schallabstrahlung liefert die Übertragungsfunktion von der Oberflächengeschwindigkeit v zum Schalldruck p an den Auswertungspunkten im Freifeld. Diese Simulationskette bis hin zur Berechnung des Schalldrucks im Freifeld wurde von mehreren Forschungsgruppen angewandt, die bereits eine solche Analyse durchgeführt haben [16, 20, 9, 10, 21, 22]. In diesen Studien wurden unterschiedliche Methoden und Softwares für die Berechnung von BRIR und die Auralisierung der Quelle in einem Raum verwendet. Um die Maschine in einem Raum hörbar zu machen, muss sie in einem Raum mit ihrem Abstrahlverhalten aufgestellt werden. Dieser Raum wird entsprechend diesem Abstrahlverhalten angeregt und die BRIR ist dann die Übertragungsfunktion von der Maschine im Raum zu den beiden Ohren für einen Punkt im Raum und eine Kopfausrichtung. Bei anderen Kopfdrehungen und Hörpositionen ändert sich die BRIR. Die RAVEN-Software von der RWTH Aachen z. B. wurde in einer Studie über die Auralisation eines Elektromotors unter verschiedenen Betriebsbedingungen eingesetzt [16]. RAVEN ermöglicht eine physikalisch genaue Echtzeit-Auralisation der Schallausbreitung in komplexen Umgebungen und frei bewegliche Schallquellen und -Empfänger während der Aufführung, wobei Veränderungen und Manipulationen der Umgebung möglich sind [23]. Verschiedene Studien zur Auralisierung einer Maschine wurden auch beim Fraunhofer IDMT Institut durchgeführt [9, 10]. Die 3D-SpatialSound-Wave-Audiotechnologie ermöglichte die Visualisierung und dreidimensionale akustische Wiedergabe von akustisch vorberechneten Daten einer Hydraulikpumpe in einem VR-System. Raumimpulsantworten können in dieser Audiotechnologie gespeichert und beim Rendering-Prozess in Echtzeit mit dem schallfreien Signal gefaltet werden. Die primären Schallquellen können außerdem auf der Grundlage eines einzigen Datensatzes virtuell auf jede Umgebung übertragen werden [10]. VIPRA [7] ist eine weitere vom gleichen Institut entwickelte Technologie, mit der ein Produkt hörbar gemacht werden kann. RoomEncoder ist die IEM Plug-in Suite, durch die es möglich ist, eine Quelle und einen Hörer in einem virtuellen Raum zu setzen und über 200 Wandreflexionen zu rendern. Es ist möglich, die Quelle und den Hörer frei im Raum zu bewegen, wodurch automatisch der Doppler-Shift-Effekt erzeugt wird [24]. Um schließlich zu testen, ob simulierte Klänge als natürlich wahrgenommen werden können, müssen verschiedene Hörversuche stattfinden.

Zukünftige Herausforderungen für die Auralisation in der Maschinenakustik

Die Realisierung einer Simulationskette, wie die oben beschriebene, ist eine komplexe Studie: Das Modell des zu untersuchenden mechanischen Systems muss repräsentativ sein und daher mit experimentellen Analysen validiert werden, bevor es in einer geschlossenen Umgebung analysiert werden kann. Diese Kette erfordert den Einsatz verschiedener Software-Pakete, die entsprechend ausgewählt werden müssen, da der Output einer Simulation den Input für die nächste darstellt. Ziel der Analyse ist es, ein Maschinengeräusch zu erhalten, das der Realität so nahe wie möglich kommt. Sie hängt weitgehend davon ab, wie gut die tatsächlichen Schallbedingungen der Struktur und der Luft durch das numerische Modell beschrieben werden. Mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Modellierung steigen jedoch in der Regel sowohl der Berechnungsaufwand als auch die Datenmenge [10]. Die Erzeugung von akustischen Szenarien (Rendering) und deren Wiedergabe muss so schnell wie möglich erfolgen, damit keine Verzögerungen (Latenzen) oder andere Artefakte auftreten [1]. Da jedoch strukturdynamische Simulationen komplexer Modelle und die Ausbreitung des von ihnen abgestrahlten Schalls bereits mehrere Stunden Rechenzeit in Anspruch nehmen, kann die Auralisierung eines Maschinengeräusches auf der Grundlage numerischer Daten nur durch eine vorgeschaltete Berechnung erreicht werden [10]. Zwar lassen sich simulierte Schallfelder technisch als physikalische Größe darstellen, aber sie müssen aufgrund der individuellen Verarbeitung im menschlichen Gehör noch eine Frequenzbewertung, d.h. eine Umrechnung in subjektive Größen, erfahren, weil unterschiedliche Töne mit gleichem Schalldruck unterschiedlich wahrgenommen werden [20]. Unterschiedliche Frequenzen, die physikalisch die gleiche Intensität haben, werden vom menschlichen Gehör als unterschiedlich intensiv wahrgenommen [20]. Durch die Verwendung von empirisch berechneten Übertragungsfunktionen ist es möglich, dieses Wahrnehmungsphänomen auf physikalische Werte zu übertragen, was die Objektivierung der Schalldruckkurve ermöglicht [20]. Ein interessanter Ansatzpunkt für künftige Forschungsarbeiten wäre die Definition eines objektiven Kriteriums für die Bewertung der Qualität der Simulation auf der Grundlage von Frequenzspektren [10].

Literatur

[1] Michael Vorländer. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.* RWTHedition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

[2] Mendel Kleiner, Bengt-Inge Dalenbäck, und Peter Svensson. Auralization-An Overview. *J. Audio Eng. Soc*, 41(11):861–875, 1993.

[3] Christian Adams, Joachim Bös, und Tobias Melz. Beiträge der Maschinenakustik zu einem Design for Acoustics. *In: DAGA 2020- 46. Jahrestagung für Akustik, Hannover, 16.-19. März 2020*, Seiten 1–4, 2020.

[4] Christian Weirum Claumarch. Auralization of Sound Emitted by an Excited Structure. Master's thesis, Aalborg University, 2018.

[5] David Bogema. Auralization of Vehicle Sound in Development and Production. Technical report, SAE Technical Paper, 2014.

[6] David Thery, Vincent Boccara, und Brian FG Katz. Auralization uses in acoustical design: A survey study of acoustical consultants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(6):3446–3456, 2019.

[7] Fraunhofer IDMT. VIPRA – Virtuelle Produkte räumlich hörbar machen. `https://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/Videos/VIPRA_web.mp4`. Online; abgerufen am 02.09.2021.

[8] CADFEM GmbH. SIMULATION – CADFEM JOURNAL. `https://www.cadfem.net/de/de/cadfem-informiert/cadfem-newsroom/cadfem-journal/sew-eurodrive.html`. Online; abgerufen am 02.09.2021.

[9] Christian Weber, Stephan Husung, Torsten Brix, Sandra Brix, und Christoph Sladeczek. Auralisation of acoustical product properties for technical systems in virtual environments. In *Innovation in Mechanical Engineering–Shaping the Future: proceedings; 56. IWK 2011, 12-16 September 2011, Ilmenau, University of Technology*, volume 56.

[10] Hannes Münch. *Akustisch erweiterte Virtualisierung von Industrieprodukten*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Deutschland, 2021.

[11] Charles Verron, Mitsuko Aramaki, Richard Kronland-Martinet, und Grégory Pallone. A 3-D Immersive Synthesizer for Environmental Sounds. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 18(6):1550–1561, 2010.

[12] André Oliveira, Guilherme Campos, Paulo Dias, Damian Thomas Murphy, José Viera, Catarina Mendonça, und Jorge Santos. Real-time dynamic image-source implementation for auralisation. In *Proceedings of the 16th International Conference on Digital Audio Effects*, Seiten 368–372, IRL, 2013.

[13] Corey I. Cheng und Gregory H. Wakefield. Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency, and Space. Audio Engineering Society, 1999.

[14] Song Li und Jürgen Peissig. Measurement of head-related transfer functions: A review. *Applied Sciences*, 10(14):5014, 2020.

[15] Boscolo Bariga Gianluca. Gestione di database eterogenei di HRTF per il rendering in tempo reale di audio 3D. Master's thesis, UNIVERSITÁ DI PADOVA, 2012/2013.

[16] M Van der Giet, J Blum, P Dietrich, S Pelzer, M Müller-Trapet, M Pollow, M Vorländer, und K Hameyer. Auralization of electrical machines in variable operating conditions. In *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Seiten 1462–1467. IEEE, 2011.

[17] Daniela Siano, Salvina Giacobbe, und Fabio Bozza. Noise prediction of a multi-cylinder engine prototype using multi-body dynamic simulation. Technical report, SAE Technical Paper, 2011.

[18] ALMATEC SRL SOFTWARE TECHNOLOGY. Analysis and simulation software solutions. `https://translate.google.com/translate?hl=en&sl=it&u=https://www.alma-tec.it/&prev=search&pto=aue`. Online; abgerufen am 02.09.2021.

[19] Otto von Estorff. Challenges in technical acoustics: what can be computed today. *LS-DYNA Anwenderforum*, 2008.

[20] S Liefold, F Duvigneau, und U Gabbert. Advanced methods for auralization of virtual models in engineering processes. In *11th Conference: Digital Engineering for the Planning, Testing and Operation of Technical Systems, ISSN*, Seiten 2196–7598, 2014.

[21] Stephan Husung, Christian Weber, Sebastian Gramstat, et al. Simulation of acoustical product properties for technical systems in virtual environments. In *DS 58-5: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 5, Design Methods and Tools (pt. 1), Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009*, Seiten 85–96, 2009.

[22] Martin Hanke und Jürgen Wibbeler. Wie klingt die Maschine am Umrichter? Schnelle Berechnung und Auralisierung des Körperschalls. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Seiten 1–7, 2021.

[23] Dirk Schröder und Michael Vorländer. RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments. In *Forum acusticum*, Seiten 1541–1546. Aalborg Denmark, 2011.

[24] IEM Plug in Suite. Plug-in Descriptions. `https://plugins.iem.at/docs/plugindescriptions/binauraldecoder`. Online; abgerufen am 02.09.2021.