Akustik von Wärmepumpen

Marc Schneider
ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, E-Mail: marc.schneider@de.ebmpapst.com

Einleitung

Elektrisch betriebene Wärmepumpen sind eine Schlüsseltechnologie der Energiewende. Dabei nehmen Luft/Wasser-Wärmepumpen aktuell den größten Anteil ein. Diese werden in der Regel außerhalb des Gebäudes aufgestellt, was zu einer Lärmbelästigung der umliegenden Gebäude führen kann. Dabei ist (neben dem Verdichter) zumeist der Ventilator die dominante Schallquelle.
Die emittierte Schallleistung der Wärmepumpe hängt neben dem Aufstellungsort vor allem auch von der Geometrie und Einbausituation der Komponenten ab. Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Einfluss von saugseitigen Wärmeübertragern in der Zuströmung von Axialventilatoren, was dem „Standardaufbau“ solcher Wärmepumpen entspricht.
Zur Beurteilung der strömungsakustisch relevanten Vorgänge kommen dabei Strömungssimulationen (CFD) des Gesamtgerätes zum Einsatz, wobei die hinreichende Berücksichtigung der Zustömturbulenz eine besondere Herausforderung darstellt, v.a. wenn man Akustiksimulationen (CAA) der Wärmepumpen durchführen möchte.
Neben einem meist breitbandigen Rauschen beinhalten Ventilatorgeräusche oftmals tieffrequente tonale Komponenten, die abhängig von den Einbaubedingungen mehr oder weniger stark ausgeprägt und damit störend sein können.
In diesem Kontext stellt die Lärmwirkung der Wärmepumpen auf den Menschen einen weiteren wichtigen Aspekt dar. Dabei genügt es zumeist nicht, die auf der Basis physikalischer Überlegungen entstandenen Grenzwerte der aktuell gültigen TA-Lärm [5] bzw. die Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie (ErP) einzuhalten. Zur Erfassung der (subjektiven) menschlichen Wahrnehmung bieten sich eher Methoden der Psychoakustik an.

Ausgangssituation und Motivation

Abbildung 1 zeigt den Feldbestand von Heizwärmepumpen im Zeitraum 2003 bis 2022 in Deutschland. Man erkennt eine stetige Zunahme v.a. im Bereich der Luft/Wasser-Wärmepumpen (hellblau), die in 2022 einen Rekordzuwachs von 205.000 Geräte (+61% gegenüber 2021) verzeichnen. Damit wird in diesem Jahr 2023 wahrscheinlich die Marke von 2 Mio. Heizwärmepumpen überschritten. Der Bundesverband Wärmepumpe e.V. [1] prognostiziert in den nächsten 15 Jahren jährliche Zuwachsraten von ca. 700.000 Stück (s. Abbildung 2). Andererseits gibt es aber schon heute viele Gerichtsverfahren und Urteile zum Thema „Lärmbelästigung durch Wärmepumpen“. Außerdem stuft die WHO Lärm als Umweltverschmutzung (als die zweitgrößte umweltbedingte Ursache für Gesundheitsprobleme, unmittelbar nach den Auswirkungen von Luftverschmutzung) ein. Daraus folgt, dass die Akustik von Wärmepumpen absolut relevant für deren Akzeptanz in der Gesellschaft ist.

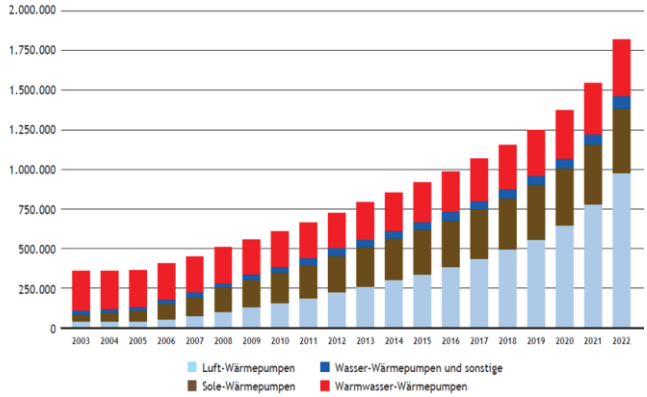

Abbildung 1: Feldbestand von Heizungswärmepumpen nach Wärmequellen und Warmwasser-Wärmepumpen von 2003 bis 2022 (Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V., [1])

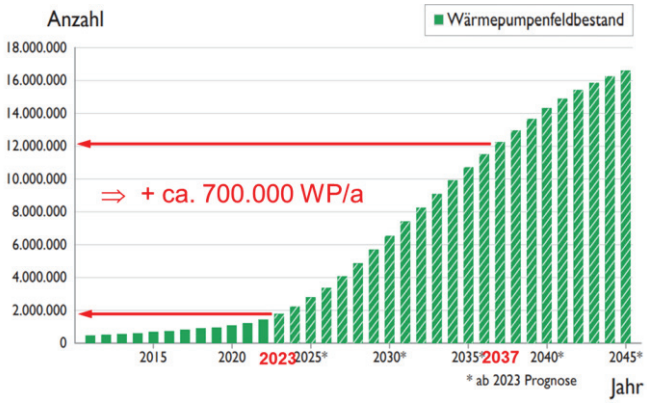

Abbildung 2: Feldbestand an Heizungswärmepumpen (ab 2023 Prognose, Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V. [1])

Schallquellen am Axialventilator und in der Wärmepumpe

In außen aufgestellten Wärmepumpen stellt der Ventilator oftmals die Hauptschallquelle [2] dar.

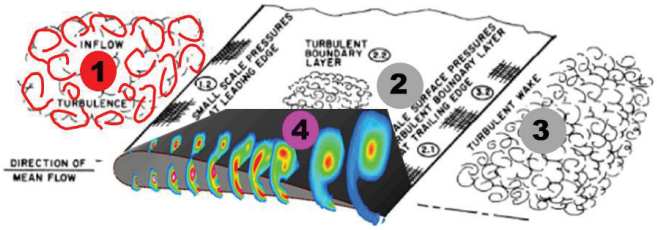

Abbildung 3: Schallquellen am Axialventilator (vergleichbar zu Schallquellen an einem Tragflügelprofil)

Abbildung 3 zeigt die Schallquellen am (in Luft/Wasser-Wärmepumpen fast ausschließlich verbauten) Axialventilator. Dabei handelt es sich um Schallquellen, die auch am Tragflügelprofil auftreten. Die entsprechende spektrale Auswirkung der Mechanismen „Zuströmturbulenz“ (1), „Turbulente Grenzschicht / Hinterkantenschall“ (2/3) und „Tip Noise /Kopfspalt“ (4) auf den Geräuschpegel SPL wird schematisch in Abbildung 4 gezeigt. Auch der Drehklang (tieffrequente tonale Schallanteile) wird maßgeblich von der Zuströmturbulenz in Interaktion mit der Vorderkante der Ventilatorschaufeln bestimmt.

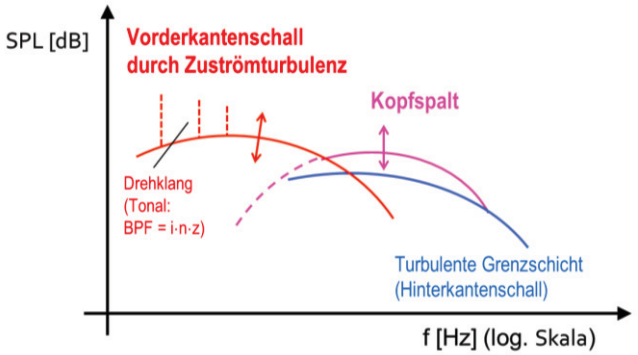

Abbildung 4: Schallquellen am Ventilator – typische spektrale Auswirkung auf den Schallpegel SPL (BPF = Blade Passing Frequency, i = Harmonische, n = Drehzahl, z = Schaufelzahl), in Anlehnung an [3]

Um eine möglichst gleichmäßige (Strömungsgeschwindigkeits-) Beaufschlagung der kühlmitteldurchflossenen Rohre des Wärmetauschers in einer Wärmepumpe zu erreichen, wird der Axialventilator zumeist stromab des Tauschers angeordnet (s. Abbildung 5).

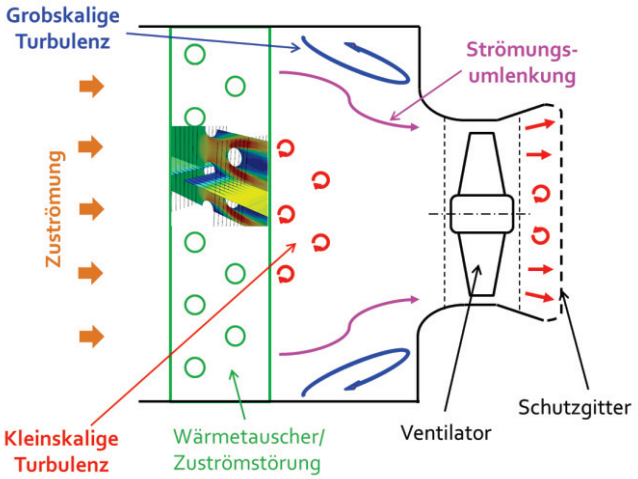

Abbildung 5: Schallquellen in der Wärmepumpe – typischer Aufbau aus Wärmtauscher und druckseitig angeordnetem Ventilator

Daraus ergibt sich als wichtige im Zusammenhang mit Geometrie und Einbausituation der Wärmepumpe in Verbindung stehende Schallquelle der Mechanismus „Zuströmturbulenz“. Dieser wird zum einen durch eine grobskalige Turbulenz, die v.a. durch Strömungsumlenkungen (Übergang rechteckig / rund) und -ablösungen hervorgerufen wird, zum anderen durch kleinskalige Turbulenz beim Durchströmen der Wärmetauscher (Rohr- / Lamellen- Geometrie, s. auch Abbildung 7) charakterisiert. Die Interaktion der Nachlaufströmung des Ventilators mit dem aus Berührschutzgründen druckseitig erforderlichen Schutzgitter stellt eine weitere Geräuschquelle dar.

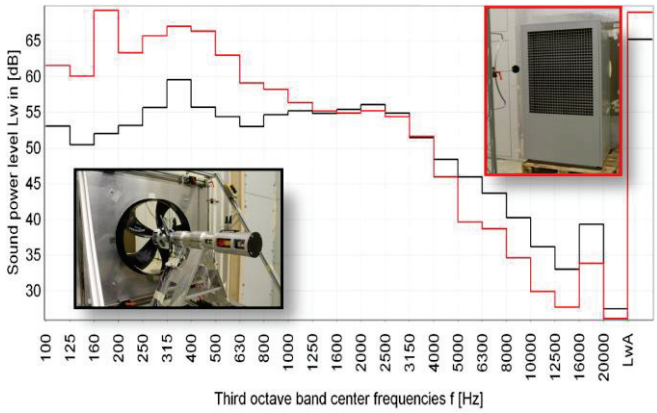

Abbildung 6: Einfluss des Mechanismus „Zuström-turbulenz“ durch den Einbau eines Axialventilators in eine Wärmepumpe (rot) gegenüber der „Prüfstandsmessung“ (schwarz)

Abbildung 6 zeigt den Einfluss des Mechanismus „Zuström-turbulenz“ am Beispiel einer Wärmepumpe auf den saugseitig gemessenen Gesamtschallleistungspegel Lw gegenüber der nahezu „turbulenzfreien“ Zuströmung des entsprechenden Ventilators. Man erkennt eine deutliche Pegelerhöhung im Frequenzbereich bis f = 1000 Hz. Die Pegelreduktion für f > 3000 Hz kann durch Schalldämpfung im Gerät erklärt werden.

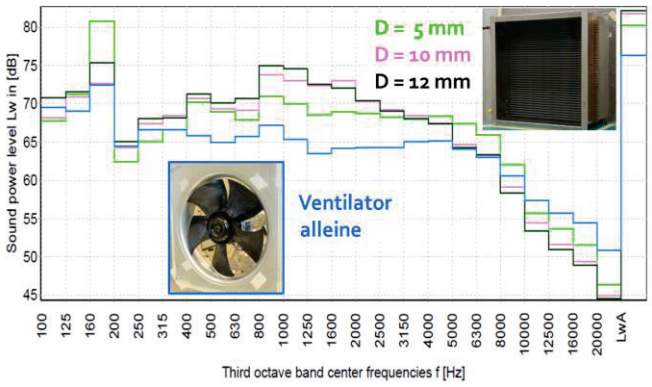

Abbildung 7: Einfluss des Rohrdurchmessers eines Wärmetauschers auf die (saugseitig) gemessene Schall-leistung Lw in

Abbildung 7 zeigt den Einfluss des Rohrdurchmessers in einem ansonsten baugleichen vierreihigen Wärmetauscher mit druckseitig angeordnetem Axialventilator auf die saugseitig gemessene Schallleistung Lw: bei Durchmesser-vergrößerung von 5 auf 12 mm steigt die Gesamtschallleistung LwA um ca. 2 dB(A) an.

Simulation: CFD und CAA

Zur detaillierten Untersuchung der strömungsakustisch relevanten Vorgänge in Wärmepumpen bieten sich Strömungssimulationen (CFD, Computational Fluid

Dynamics) des Gesamtgerätes an. Dabei ist es übliche Praxis, den Wärmetauscher nicht in seinen Details geometrisch aufzulösen, sondern über ein poröses Medium den Druckverlust zu modellieren. Um darauf aufbauend Akustiksimulationen (CAA, Computational Aeroacoustics) durchzuführen, ist es grundsätzlich erforderlich, die für die Geräuschabstrahlung verantwortlichen Skalen der Turbulenz hinreichend genau aufzulösen. Dies ist aber v.a. aufgrund der feinen Lamellenstruktur herkömmlicher Wärmetauscher wirtschaftlich nicht durchführbar: Beispielsweise würde bereits eine relativ grobe RANS-Simulation (CFD) eines Wärmetauschers bereits ca. 500 Mio. Zellen und eine für die Akustiksimulation (CAA) erforderliche LES deutlich mehr als 1 Mrd. (= 1000 Mio. !) Zellen erfordern.

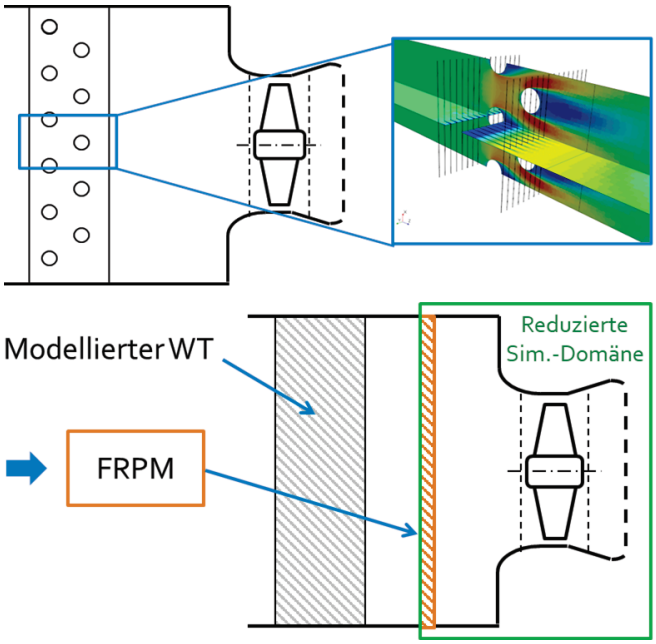

Abbildung 8: Schematischer Aufbau eines aeroakustischen Simulationssetups (CAA) für Wärmtauscher-Ventilator-Applikationen: Verwendung einer periodischen Teil-simulation (oben) und FRPM [4] als Turbulenzgenerator

Eine Möglichkeit eines deutlich weniger aufwändigen Simulationssetups für aeroakustische Berechnungen (CAA) einer Wärmepumpen-Applikation ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wird eine periodische Teil-simulation (RANS) des Wärmetauschers durchgeführt. Die sich daraus ergebende Turbulenz wird mit Hilfe eines Tools zur Turbulenzrekonstruktion (hier: FRPM [4], weitere Methoden: s. [7]) als Input in eine aeroakustische Simulation (LES) eingekoppelt. Die Zuströmturbulenz wird damit synthetisch erzeugt und der Aufwand für die geometrische Modellierung des Wärmetauschers entfällt. Ein alternativer Ansatz zur Erzeugung der Turbulenz ist die geometrische Auflösung der Rohre ohne Lamellen im oder stromab des porösen Mediums, beide Ansätze ermöglichen die aeroakustische Simulation der turbulenten Zuströmung des Ventilators in einer Wärmepumpe.

Psychoakustik von Wärmepumpen

Grundsätzlich muss eine Wärmepumpe den Anforderungen der TA Lärm [5] entsprechen. In Abbildung 9 sind entsprechende Grenzwerte in Abhängigkeit des Immissions-ortes und der Tageszeit (Tag- / Nachtbetrieb) dargestellt. Dabei handelt es sich um die (physikalische) Größe „A-bewerteter Schalldruckpegel LpA“ in dB(A). Allerdings sind diese Ansätze auf Basis physikalischer Überlegungen oft nur bedingt geeignet für die menschliche Lärmwahrnehmung. Zur Erfassung des subjektiven menschlichen Hörempfindens sind die Methoden der Psychoakustik besser geeignet. Dabei versucht man alle subjektiv wahrgenommenen „Dimensionen“ eines Geräuschs durch Hörversuche mit einer statistisch repräsentativen Probandengruppe (n ≥ 30) zu finden und diese mit messbaren psychoakustischen Größen in Verbindung zu setzten. Diese Korrelation wird auch als Metrik bezeichnet (s. Abbildung 10).

Gebietstyp	Tag-betrieb	Nacht-betrieb
Industriegebiete	70 dB(A)	
Gewerbegebiete	60 dB(A)	50 dB(A)
Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
allgemeine Wohngebiete und Klein-siedlungsgebiete	55 dB(A)	40 dB(A)
reine Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
Kurgebiete, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)

Abbildung 9: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden (TA Lärm 6.1, [5])

In der Arbeit von Feldmann [6] wurde eine entsprechende Metrik für verschiedene geräuschrelevante Ventilatoran-wendungen, u.a. auch für Wärmepumpen entwickelt. Mit der Hörversuchsmethode „Semantisches Differential“ (Abfrage von Adjektivpaaren auf einer 7stufigen Skala) kann die Geräuschqualität Q in Abhängigkeit der psychoakustischen Parameter Lautheit N, Schärfe S, Tonalität T und Shannon Entropy H (korrigierte Rauigkeit) berechnet werden. Dabei ergibt sich eine relativ gute Korrelation mit r = 0,78 (Korrelationskoeffizient, s. Abbildung 10).

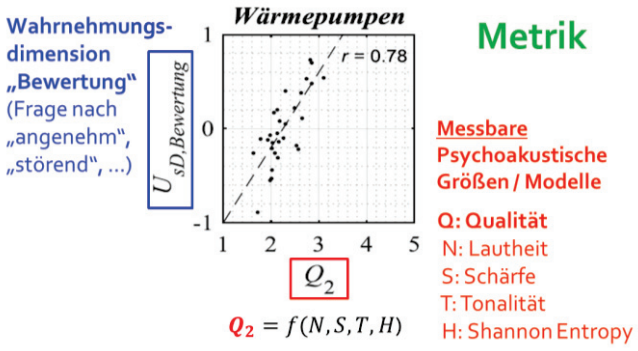

Abbildung 10: Psychoakustische Metrik für Ventilatoren in Wärmepumpenanwendungen (nach [6])

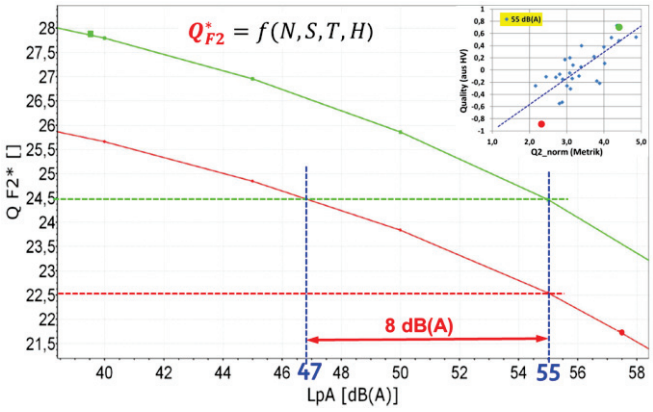

Abbildung 11: Psychoakustische Metrik für Ventilatoren in Wärmepumpenanwendungen (nach [6]); Pegelabhängige Geräuschqualität am Beispiel von 2 Wärmepumpen

In Abbildung 11 ist ein Beispiel für die Anwendung dieser Metrik dargestellt. Wenn man die Geräuschqualität Q (Q_{F2}*) zweier Extrembeispiele (rot, grün – Wärmepumpengeräusche wurden im Hörversuch alle bei 55 dB(A) bewertet, eingeklinktes Diagramm oben rechts) über dem Schalldruckpegel LpA plottet, erkennt man, dass man das „rote“ Geräusch um 8 dB(A) reduzieren müsste um ein als gleich „angenehm“ beurteiltes Geräusch wie „grün“ zu erhalten.

Möglichkeiten der Schallreduktion

Abbildung 12 zeigt eine Möglichkeit der Schallreduktion einer Wärmepumpenapplikation durch den Einsatz eines saugseitig des Ventilators angebrachtem Strömungsgleichrichters (FlowGrid), der wirkungsvoll den Mechanismus „Zuströmturbulenz“ positiv beeinflusst.

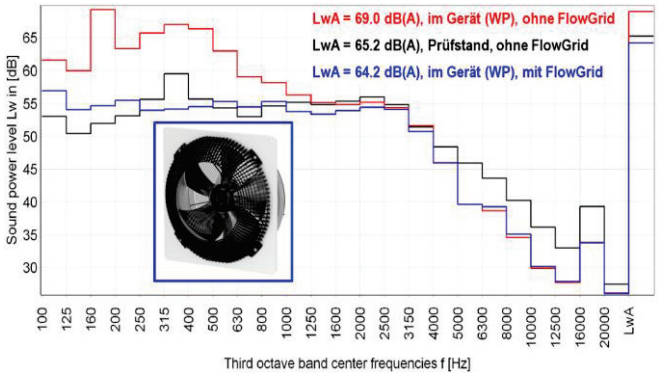

Abbildung 12: Schallreduktion durch den Einsatz eines saugseitig des Ventilators angebrachtem Strömungsgleichrichters (FlowGrid) in der Wärmpumpe

Grundsätzlich sollte für eine akustische Optimierung immer das Gesamtsystem Wärmepumpe (unter Berücksichtigung der thermodynamischen Prozesse) berücksichtigt werden.

Zusammenfassung und Fazit

Die Wärmepumpe nimmt in der Wärmeversorgung von Gebäuden in Zukunft eine zunehmend wichtigere Schlüsselrolle ein. Vor allem in Ballungsgebieten, in denen die Menschen durch immer kleinere Grundstücke enger aneinanderrücken, ist daher die Akustik der meist außen aufgestellten Geräte für deren Akzeptanz von entscheidender Bedeutung.

Dabei spielt neben dem Aufstellungsort der Wärmepumpe die Geometrie und die Einbausituation und die damit in Verbindung stehende Zuströmbedingung der zumeist druckseitig der Wärmetauscher angeordneten Axialventilatoren eine wichtige Rolle. Eine wirksame Möglichkeit der Schallreduktion in diesem Zusammenhang stellt die Verwendung eines zuströmseitig montierten Strömungsgleichrichters (FlowGrid) dar.

Zur Untersuchung der Schallmechanismen in Wärmepumpen können aufwendige Strömungs- (CFD) und Akustiksimulationen (CAA) eingesetzt werden – mit dem Ziel, die Geräuschabstrahlung der Geräte zu reduzieren.

Zusätzliches Potenzial zur Verbesserung der akustischen Situation bietet die Verwendung von psychoakustischen Methoden. Wünschenswert wäre, dass neben den rein physikalischen Grenzwerten (Lp(A), TA Lärm) auch psychoakustische Größen in der Normung Verwendung finden würden, um dem subjektiven Höreindruck der Betroffenen Rechnung zu tragen.

Literatur

[1] Bundesverband Wärmpumpe e.V.: Branchenstudie 2023. Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen, URL: https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/branchenstudie-2023/

[2] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW: Mach es richtig! Lärmschutz bei Luftwärmepumpen. URL: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/klimawandel/laermschutz_bei_luftwaermepumpen.pdf

[3] Carolus, T.: Ventilatoren. Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion. 1. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 2003

[4] Ewert, R.: The Fast Random Particle-Mesh Method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications. Proceedings of the 13th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, Rome, 2007

[5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immisionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Berlin, 1998

[6] Feldmann, C.: Ein psychoakustisches Prognosemodell für die Geräuschqualität lufttechnischer Geräte mit niedrigem Schallleistungspegel. PhD Thesis, Universität Siegen, Shaker Verlag, 2018

[7] Dietrich, P., Schneider, M.: Aeroacoustic Simulations of an Axial Fan with Modelled Turbulent Inflow Conditions. FAN 2022 Konferenz Beitrag, Senlis, 2022