



1. Studienarbeit:

Modell für die Schallprognose einer Wärmepumpe

vom 01.03.2018 bis 31.05.2018

bei der Kratschmayer Kälte-Klima-Lüftung GmbH

Jonas Schmid

2. Fachsemester SENCE

Matrikelnummer: 801154

Carl-Julius-Weber-Str.10

74635 Kupferzell

E-Mail: Jony-Schm@web.de

Betreuer im Unternehmen: B.Eng. Christopher Hammel

(Assistent der Projektleitung Softwareentwicklung, Kratschmayer Kälte-Klima-Lüftung
GmbH, Hohebuch)

Betreuer an der Hochschule: Prof.Dr.-Ing. Martin Müller

(Hochschule Ulm, Institut für Energie- und Antriebstechnik)

Zusammenfassung

Neben der Effizienz bei der Entwicklung der Wärme- bzw. Kältebereitstellung ist aufgrund der immer steigenden Geräuschbelastung auch die Schallemission zu einem wichtigen Aspekt geworden. Die Anzahl an installierten Wärmepumpen steigt die letzten Jahre, laut Bundesverband für Wärmepumpen, kontinuierlich an. Nachdem 2016 ein Absatzrekordjahr verzeichnet wurde, kam es 2017 zu einer weiteren Steigerung, wobei erstmals die Grenze von 70.000 übertroffen wurde. Daher ist die Verringerung der verursachten Geräusche und Schwingungen ein wichtiges Ziel, damit die Belästigungen durch Lärm und Schwingungseinwirkungen minimiert werden. Das Vermeiden der Umweltbeeinträchtigung durch Schallemission ist eine essentielle Voraussetzung für die weitere Verbreitung dieser zukunftsweisenden Heiz- und Kühlsysteme.

Um diese Umweltbeeinträchtigungen durch eine Wärmepumpe vorhersagen zu können, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Schallemission und -immissionen für Wärmepumpen.

Vorab werden die Grundlagen der Akustik erläutert, die zum Verständnis des Modells notwendig sind.

Ist dem atmosphärischen Ruhedruck $p_{statisch}$ ein Wechseldruckfeld p überlagert, nimmt das menschliche Gehör Schall wahr. Dieses Wechseldruckfeld geht von einer Schallquelle aus, welche ihre umgebende Luft in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen breiten sich aufgrund der Kompressibilitäts- und Masseneigenschaften von Luft aus, wobei das resultierende Wechseldruckfeld im Allgemeinen orts- und zeitabhängig ist.

Da der Wertebereich des wahrnehmbaren Schalldrucks p sechs Zehnerpotenzen umfasst, wird im Allgemeinen eine logarithmische Darstellung gewählt, die sogenannte Pegeldarstellung. Der Schalldruckpegel L_p , wird wie folgt berechnet: $L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right)$. Der Schalldruckpegel L_p wird in der Einheit Dezibel dB angegeben. Eine Änderung des Schalldruckpegels um 10 dB wird vom Menschen als eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Lautstärke wahrgenommen. Als Bezugsdruck p_0 dient die Hörschwelle $p_0 = 20 \mu Pa$ bei einer Frequenz von $f = 1000 Hz$.

Der Schalleistungspegel L_W ist eine schallquellenspezifische, abstands- und richtungsunabhängige Größe. Anhand des Schalleistungspegels können Geräte miteinander verglichen werden. Sie beschreibt die von einer Quelle pro Zeiteinheit abgegebene Schallenergie. Da die abgestrahlte Schalleistung nicht messtechnisch erfasst werden kann, wird dieser Wert aus Schalldruckmessungen in einem definierten Abstand zur Schallquelle rechnerisch ermittelt.

Damit sich Schall ausbreiten kann, wird ein Medium benötigt. Dabei wird unterschieden in Körper- bzw. Flüssigkeitsschall (A) und in Luftschall (B). Bei der Körperschallübertragung werden die mechanischen Schwingungen in das feste bzw. flüssige Medium eingeleitet, darin übertragen und schließlich an einer anderen Stelle teilweise als Luftschall abgestrahlt. Der Luftschall breitet sich wellenartig aus und wird vom menschlichen Ohr unterschiedlich wahrgenommen. Es kommt, im Vergleich zum Körperschall, zu einer direkten Geräuschübertragung.

Die Pegeladdition von Quellen gleicher Schallintensität bzw. gleichem Schalldruckpegels werden folgendermaßen zusammengefasst: $L_{tot} = L_i + 10 \cdot \log n$. Wobei n der Anzahl der Teilschalle entsprechen.

Die Herleitung des Pegeladditionsverfahrens Quellen unterschiedlichen Pegels ist nachfolgend dargestellt: $L_{tot} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}$ n ist die Anzahl der inkohärenten Teilschalle und L_i sind die Teilpegel. In Abbildung 7 ist die Pegelkorrektur über der Differenz der Teilschalle abgetragen. Die Pegeladdition ist grundlegend für die Beschreibung der Wärmepumpe als Ersatzschallquelle.

Im Rahmen einer akustischen Analyse der Hauptgeräuschquellen einer Wärmepumpe und der Betrachtung von externen Messdaten wird belegt, dass Ventilator und Verdichter die beiden größten Geräuschquellen einer Wärmepumpe sind. Als Ventilatoren werden hauptsächlich Axialventilatoren in Wärmepumpen eingesetzt. Im Bereich der Zuströmung angeordneten Komponenten können tonale Zusatzgeräusche von bis zu 10 dB auftreten. Auch druckseitige Störungen wie z.B. Schutzgitter- können Zusatzgeräusche von mehreren dB verursachen.

Bei Verdichtern sind der Körperschall und die Abstrahlung von tieffrequenter Luftschall das hauptsächliche Problem. Je nach Modell der Wärmepumpe werden entweder halbhermetische Scroll- oder Hubkolbenverdichter eingesetzt. Diese unterscheiden sich nicht nur in ihren Leistungsdaten, sondern auch in Bezug auf ihre

akustischen Eigenschaften. Scrollverdichter erzeugen, durch die ineinandergreifenden Spiralen, ein Schleifgeräusch. Ein Hubkolbenverdichter erzeugt eine starke Pulsation, welche sich über die Peripherie und das Wärmepumpengehäuse ausbreitet.

Andere Geräuschquellen, wie bspw. die Abstrahlung durch das Wärmepumpengehäuse, werden in diesem Fall nicht betrachtet. Zudem wird sich auf die Luftschallübertragung beschränkt. Die Ausbreitung über Körperschall, welche bei Wärmepumpen vorkommt, wird nicht betrachtet.

Um die Schallemission einer Wärmepumpe zu ermitteln, wird diese aus akustischer Sicht auf die zwei, bereits erwähnten, Teilschallquellen - Ventilator und Verdichter - reduziert. Je nach Leistung der Wärmepumpe überwiegt der Anteil der Ventilatoren oder Verdichtern, die zur Schallemission der Wärmepumpe beitragen, wobei eine größere Leistung, mit einem größeren der Anteil an Verdichtern korreliert. Ab einer Leistung von ca. 20 kW ist der Verdichter die dominante Quelle.

Als erstes wird der quellenspezifische, ortsunabhängige Schalleistungswert der Wärmepumpe ermittelt. Eine Wärmepumpe besitzt je nach Leistung eine gewisse Anzahl an Ventilatoren bzw. Verdichtern. Mithilfe des Superpositionsprinzips werden zuerst die Schallquellen gleicher Intensität zu einer Ersatzschallquelle zusammengefasst. Dies geschieht über die Pegeladdition zweier Quellen gleicher Intensität bzw. gleichen Schalldruckpegels. D.h. es ergibt sich *eine* Ersatzschallquelle für die Ventilatoren und *eine* für die Verdichter. Die ermittelte Schallabstrahlung der einzelnen Teilschallquellen wird anschließend zu einer kugelförmigen Ersatzschallquelle addiert. Dabei wird die Formel für die Schallpegeladdition inkohärenter Quellen angewendet. Diese kugelförmige Ersatzschallquelle repräsentiert demnach die gesamte Wärmepumpe, mit dem über das Superpositionsprinzip ermittelten Schalleistungspegel.

Der Zusammenhang zwischen den objektiven Größen Schalldruck bzw. Schalldruckpegel und der subjektiven Größe Lautstärke ist in Wirklichkeit sehr komplex. Die Entwicklung einer Messtechnik, die alle Ohreigenschaften berücksichtigt wäre nur mit sehr großem Aufwand zu realisieren. Deswegen wird national wie international mit einem frequenzbewerteten Schalldruckpegel gearbeitet, der die Grundtatsachen der Ohrempfindlichkeit zumindest ansatzweise berücksichtigt. Dieser sogenannte „A-bewertete Schallpegel“ enthält alle Frequenzanteile des Hörbereichs.

Um die Schallemission einer Wärmepumpe in Abhängigkeit einer gewissen Entfernung zu ermitteln, muss die Schallausbreitung in der Umgebung der Wärmepumpe zusätzlich modelliert werden. Als Beurteilungsgröße dient hier der Schalldruckpegel, welcher mit zunehmender Entfernung vom Emissionsort abnimmt. Am Emissionsort wird dieser auch als Beurteilungspegel bezeichnet. Die von der Wärmepumpe emittierten Schallwellen werden als Luftschall bezeichnet. Die Ausbreitung des Luftschalls kann durch verschiedene Faktoren gedämpft oder verstärkt werden. Maßgeblich hierfür ist unter anderem die Aufstellungssituation des Gerätes. Hier wird in drei Kategorien unterschieden. Steht die Wärmepumpe auf dem freien Feld, d.h. ist die nächste Fassade mehr als 3m entfernt, beträgt der Aufschlag +3 db(A). Ein Aufschlag von +6 db(A) kommt zustande wenn der Abstand zur nächstliegenden Wand/ Fassade weniger als 3m beträgt. Bei der dritten Kategorie werden +9 db(A) aufgeschlagen. Dies ist der Fall, wenn in einer Fassadenecke steht, zwischen zwei Gebäuden oder unter einem Vordach.

Des Weiteren wird ein Zuschlag für die Ton- und Informationshaltigkeit des, durch die Wärmepumpe erzeugten Geräusches, mit ein berechnet. Es wird in drei Kategorien unterschieden: nicht hörbar, hörbar und stark hörbar. Dieser Wert unterliegt einer subjektiven Beurteilung, welche normalerweise von einem Schallgutachtern abgegeben werden muss.

Zusätzlich wird der Benutzer des Programms nach dem, zu untersuchenden Radius um die Wärmepumpe herum, gefragt. Meteorologische Faktoren, wie Temperatur und Windverhältnisse, wie auch die Beschaffenheit des Bodens, bei dem in schallharte und –weiche Untergründe unterschieden wird, werden in diesem Modell nicht miteinbezogen.

Unter Einberechnung der aufgezählten Faktoren, die sich aus der Umgebung einer Wärmepumpe ergeben, kann ein Beurteilungspegel nach der TA-Lärm angegeben werden. Stellt man den Beurteilungspegel in Abhängigkeit von der Entfernung dar, zeigt sich, dass dieser mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Durch die Technische Anleitung (TA) -Lärm von 1998 aus dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) sind Schallimmissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden definiert. Diese hängen von dem Aufstellgebiet, bspw. Gewerbegebiet oder Wohngebiet etc., ab.

In dieser Arbeit wird der modellierte Schallemissionsrechner anhand eines Beispiels angewendet und dessen Ergebnisse dargestellt. Das Ergebnis der Schallprognose ist genauer als die bisherige Angabe, erreicht jedoch eine noch nicht ausreichende Genauigkeit für die Angabe eines exakten Schallemissionswertes. Gründe hierfür sind sowohl der zeitliche und finanzielle Rahmen der Studienarbeit als auch die eingeschränkten Möglichkeiten bezogen auf die Messtechnik. Deshalb wurde das Modell auf rein theoretischer Basis erstellt, was eine starke Vereinfachung des Modells mit sich bringt, wohingegen eine exakte Modellierung der Schallentstehung einer Wärmepumpe sehr komplex ist. Zudem ist die Genauigkeit der Eingangsdaten die in das Modell einfließen maßgeblich für die Genauigkeit des Ergebnisses. In dem Modell werden Daten der Hersteller der Ventilatoren bzw. Verdichter verwendet. Diese Daten sind Messdaten im nicht eingebauten Zustand in der Wärmepumpe. Da sich jedoch die Schallmessdaten der Komponenten im eingebauten Zustand ändern, kommt es hier zu einer Ungenauigkeit.

Bei der Schallpegeladdition werden die Abstände zwischen den einzelnen Komponenten nicht beachtet. D.h. Verstärkungen oder Abschwächungen innerhalb des Wärmepumpengehäuses werden nicht in die Modellierung involviert. Zusätzlich wird die Abstrahlung des Wärmepumpengehäuses, nicht betrachtet. Über eine Referenzmessung eines exemplarischen Wärmepumpentyps, hätte die Abstrahlung des Gehäuses ungefähr ermittelt werden können.

Dennoch kann das Modell für die Schallprognose von Wärmepumpen verwendet werden und damit vorab eine Beurteilung der Lärmbelastung durch die Wärmepumpe abgegeben werden. Zudem ist das Programm beliebig erweiterbar und kann somit als Rahmen für weitere Softwareentwicklungen im Bereich der Schallprognose dienen.