

Residential Area Augmented Reality Acoustics (RAARA)

B. Blank-Landeshammer,
A. Buruzs, G. Drexler-Schmid,
C. Reichl, A. Sporr, M. Wagner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

1/2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Brigitte Blank-Landeshammer, Adam Buruzs, Gerwin Drexler-Schmid, Christoph Reichl,
Andreas Sporr, Moritz Wagner
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Wien, 2023

Residential Area Augmented Reality Acoustics (RAARA)

Brigitte Blank-Landeshammer, Adam Buruzs, Gerwin Drexler-Schmid, Christoph Reichl,
Andreas Sporr, Moritz Wagner
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Wien, März 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract.....	10
3	Ausgangslage.....	12
4	Projekthalt.....	14
5	Ergebnisse	17
6	Schlussfolgerungen	28
7	Ausblick und Empfehlungen	29
8	Verzeichnisse.....	30

1 Kurzfassung

Lärm verursacht Stress und löst damit Reaktionen wie Herz-Kreislaufkrankungen, Schlaf- und Konzentrationsstörungen bis hin zu psychischen Krankheiten aus und hat Einfluss auf das soziale Verhalten (Aggressionen). Gerade in urbanen Gebieten sind Menschen sehr stark von Lärmbelastigungen betroffen. Hierbei sind neben dem Verkehrs- und Gewerbelärm vor allem Geräte zum Heizen oder Kühlen von großer Bedeutung. Klimaanlage, Wärmepumpenaußeneinheiten (Quelle) oder auch lärmende Schaltschränke führen immer wieder zu Konflikten zwischen Betreiber:innen und Anrainer:innen. Generell hat die Lärmbelastigung in den letzten Jahren wieder zugenommen. Bereits 40% der Österreicher:innen fühlen sich davon betroffen. Unter dem Gesichtspunkt des stetigen Ausbaus von **erneuerbaren Energien** für **Wärme** und des in Zukunft stark wachsenden Bedarfs an **Klimageräten**, werden einerseits vor allem Luft-Wärmepumpen als auch Klimaanlage im urbanen Gebiet stark zunehmen. Heutzutage werden deren Schallemissionen meist aus einer einzigen Zahl bestimmt, dem ortsunabhängigen Schalleistungspegel, und mittels einfacher mathematischer Methoden in einen ortsabhängigen Schalldruckpegel umgerechnet. Hierbei werden weder die Frequenzabhängigkeit, Richtungsabhängigkeit, Betriebszustand noch der Einfluss der Umgebung berücksichtigt. Es ist daher dringend erforderlich, einen intuitiveren, einfacheren aber gleichzeitig auch präziseren Zugang zur Schallthematik zu erschließen, um Städte einerseits mit 100% erneuerbarer Wärme und Kälte zu versorgen und gleichzeitig den Lärmpegel zu senken. Dieser Zugang erfolgt über **Augmented Reality (AR)** und stellt einen bis dato einzigartigen Ansatz dar.

Ziel des Projektes RAARA – Residential Area Augmented Reality Acoustics ist es, Schallemissionen von Lärmquellen vor deren Installation mittels „Augmented Reality“ vor Ort in Echtzeit **sichtbar und hörbar** zu machen, und zwar abhängig von Frequenz, Richtung, Betriebszustand und Umgebung. Lärmquellen wie, z.B. Rückkühler, Verdampfer, Lüfter, etc. in/am/um Gebäude, sowie lärmdämmende Maßnahmen sollen vor der Installation der Geräte VOR ORT virtuell platziert werden können. Deren Schallemissionen werden dabei in Echtzeit visuell an den Umgebungsoberflächen dargestellt beziehungsweise akustisch wahrnehmbar gemacht. Für die Berechnungen wird dabei die automatisch erkannte Umgebung schallphysikalisch berücksichtigt. Mit der im Projekt entwickelten einzigartigen Methodik können verschiedene Aufstellungsorte, unter Berücksichtigung lärmdämmender Maßnahmen und noch nicht gebaute Fassaden getestet, und damit der Lärmpegel der zukünftig aufzustellenden Heiz- und Kühlgeräte virtuell optimiert werden, noch bevor die Geräte bestellt sind.

Die **Projektergebnisse** umfassen **Methoden** zur:

- Umrechnung von Lärmquellenmessungen in passende **Schallprofile**
- **Automatisch schallphysikalisch Erfassung der Umgebung** (Nah- und Fernbereich)
- Möglichkeit zur Positionierung zusätzlicher **virtueller Wände** mit wählbaren **Materialeigenschaften**
- **Einbindung externer Geometrien** via GPS and GIS
- **Berechnung der Schallausbreitung** anhand der Schallprofile und der Umgebungsdaten
- **Interaktive visuelle und akustische Darstellung** der Berechnungen mittels AR (virtuelle Lärmquelle mit virtuellem Schall in realen Umgebungen)

Im Laufe des Projekts wurde sowohl der Smartphone Prototyp als auch eine Version für die Microsoft HoloLens entwickelt. Beide Anwendungen weisen die gleiche Funktionalität auf, lediglich die Darstellung der Objekte und das User Interface unterscheiden sich.

Die Anwendung ermöglicht die automatische Erkennung der Umgebung und die Erstellung einer virtuellen Umgebung, dessen Elemente skaliert, verschoben und gedreht werden können, um die Realität widerzuspiegeln. Benutzer:innen können manuelle Wände hinzufügen und die Umgebung mit verschiedenen Materialien versehen. Auf dem Boden können mehrere Wärmepumpen platziert werden, um die richtungsabhängige Schallleistung des Geräts mit Balkendiagrammen und farbcodierten Würfeln anzuzeigen. Die Visualisierung des Schalldrucks im Raum erfolgt durch Platzierung von Kugeln an verschiedenen Positionen im Raum. Die Anwendung bietet auch die Möglichkeit, Messpunkte hinzuzufügen, um eine vereinfachte Schallsimulation durchzuführen, die vom Abstand zwischen Schallquelle und Messpunkt abhängt. Eine Verbindung mit dem Internet ermöglicht durch Kommunikation mit einer Serverapplikation eine anspruchsvollere Schallsimulation, welche auf Grund der hohen Präzision der Ergebnisse für die finale Auslegung der Wärmepumpensysteme genutzt werden kann.

Für die automatische Umgebungserkennung werden in der unmittelbaren Umgebung der nutzenden Person mithilfe einer Software-Bibliothek horizontale und vertikale ebene Flächen erkannt und dargestellt. Da diese Methode höchstens eine Erkennung von Objekten in einem Umkreis von etwa 5 bis maximal 12 Metern ermöglicht, musste für die Erkennung weiter entfernter Objekte – beispielsweise Gebäudefassaden – ein Bilderkennungsalgorithmus entwickelt werden.

Im Rahmen des Projektes RAARA wurden die wesentlichen Grundlagen geschaffen, Schallereignisse virtueller Schallquellen in realer Umgebung mittels fortschrittlicher Methoden zu berechnen und mittels Augmented Reality zu visualisieren. Darüber hinaus wurde eine erste Application entwickelt, um die betrachteten Möglichkeiten einem breiten Publikum zu demonstrieren und die Awareness bezogen auf die Schallthematik insbesondere bei Wärmepumpen signifikant zu erhöhen.

Da der Prototyp die grundlegende Funktionalität der angedachten Anwendung beweisen konnte, ist geplant, dieses Programm in weiteren Projekten zu verfeinern. Das Interesse des Fachpublikums ist sehr groß und in zahlreichen Gesprächen auf Konferenzen und Messen wurden die nächsten Schritte erörtert. So fokussiert der neue IEA HPT Annex 63 „Placement Impact on Heat Pump Acoustics“ – „Auswirkungen der Platzierung von Wärmepumpen auf die Schallemissionen“ unter anderem auf die Internationalisierung und Erweiterung verfügbarer virtueller Tools zur Berechnung und Visualisierung von Schalldruckpegeln von Wärmepumpen. Dieses internationale Projekt wird auch durch ein nationales österreichisches Konsortium unterstützt.

2 Abstract

Noise causes stress and thus triggers reactions such as cardiovascular diseases, sleep and concentration disorders to mental illnesses and has an influence on social behaviour (aggression). Especially in urban areas, people are very much affected by noise pollution. In addition to traffic and commercial noise, devices for heating or cooling are of great importance. Air conditioning systems, outdoor heat pump units (source) or noisy control cabinets repeatedly lead to conflicts between operators and residents. In general, noise pollution has increased again in recent years. Already 40% of Austrians feel affected by it. From the point of view of the steady expansion of **renewable energies** for **heat** and the rapidly growing demand for **air conditioning units** in the future, air heat pumps and air conditioning systems in urban areas in particular will increase sharply. Nowadays, their sound emissions are usually determined from a single number, the location-independent sound power level, and converted into a location-dependent sound pressure level using simple mathematical methods. Neither the frequency dependence, directional dependence, operating state nor the influence of the environment are taken into account. There is therefore an urgent need to develop a more intuitive, simpler but at the same time more precise approach to sound in order to provide cities with 100% renewable heating and cooling while reducing noise levels. This access is via **augmented reality (AR)** and represents a unique approach to date.

The aim of the **RAARA – Residential Area Augmented Reality Acoustics** project is to **make sound emissions from noise sources visible and audible** on site in real time before their installation by means of "augmented reality", depending on frequency, direction, operating status and environment. Noise sources such as, e.g. dry coolers, evaporators, fans, etc. in/on/around buildings, as well as noise insulation measures should be able to be placed virtually ON SITE before the devices are installed. Their sound emissions are visually displayed in real time on the surrounding surfaces or made acoustically perceptible. For the calculations, the automatically detected environment is taken into account acoustically. With the unique methodology developed in the project, various installation sites can be tested, taking into account noise-insulating measures and facades that have not yet been built, and thus the noise level of the heating and cooling devices to be installed in the future can be virtually optimized even before the devices have been ordered.

Project results include **methods** for:

- Conversion of noise source measurements into suitable **sound profiles**
- **Automatic sound physical detection of the environment** (near and far range)
- Ability to position additional **virtual walls** with selectable **material properties**
- **Integration of external geometries** via GPS and GIS
- **Calculation of sound propagation** based on sound profiles and environmental data
- **Interactive visual and acoustic representation** of calculations using AR (virtual noise source with virtual sound in real environments)

In the course of the project, both the smartphone prototype and a version for the Microsoft HoloLens were developed. Both applications have the same functionality, only the representation of the objects and the user interface differ.

The application allows automatic discovery of the environment and the creation of a virtual environment whose elements can be scaled, moved and rotated to reflect reality. Users can add manual walls and add different materials to the environment. Several heat pumps can be placed on the floor to indicate the directional sound power of the unit with bar graphs and color-coded cubes. The visualization of the sound pressure in the room is done by placing spheres at different positions in the room. The application also offers the possibility to add measuring points to perform a simplified sound simulation that depends on the distance between the sound source and the measuring point. A connection to the Internet enables a more sophisticated sound simulation through communication with a server application, which can be used for the final design of the heat pump systems due to the high precision of the results.

For automatic environment detection, horizontal and vertical flat surfaces are detected and displayed in the immediate vicinity of the user using a software library. Since this method allows at most the detection of objects within a radius of about 5 to a maximum of 12 meters, an image recognition algorithm had to be developed for the detection of more distant objects – such as building facades.

Within the framework of the RAARA project, the essential foundations were created to calculate sound events of virtual sound sources in a real environment using advanced methods and to visualize them using augmented reality. In addition, a first application was developed to demonstrate the possibilities considered to a broad audience and to significantly increase awareness of the noise issue, especially for heat pumps.

Since the prototype was able to prove the basic functionality of the envisaged application, it is planned to refine this program in further projects. The interest of the audience is very high and the next steps were discussed in numerous discussions at conferences and trade fairs.

The new IEA HPT Annex 63 "Placement Impact on Heat Pump Acoustics" focuses, among other topics, on the internationalization and expansion of available virtual tools for the calculation and visualization of sound pressure levels of heat pumps. This international project is also supported by a national Austrian consortium.

3 Ausgangslage

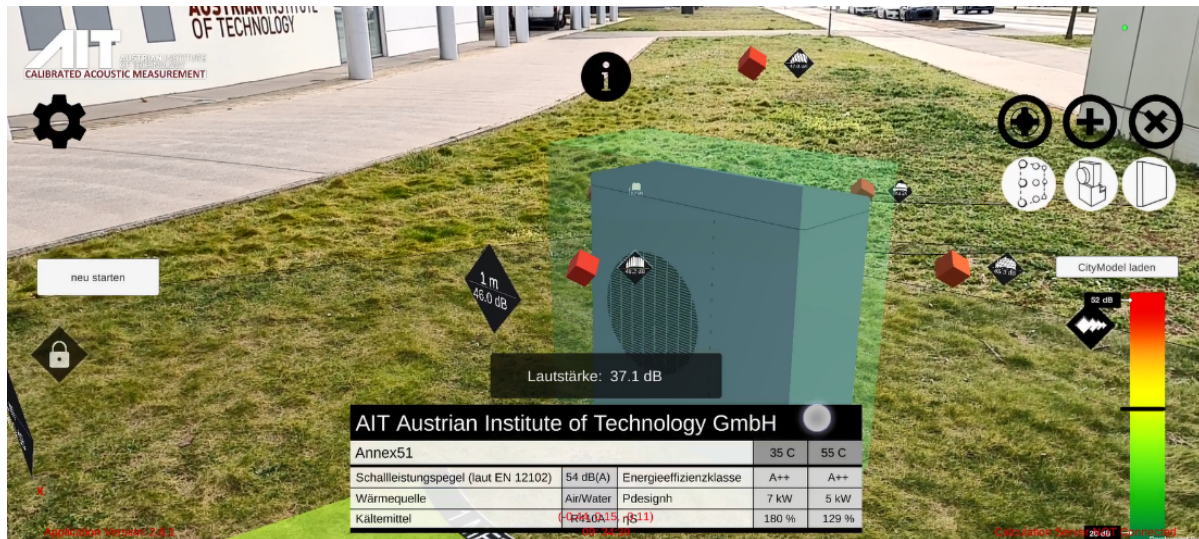
Wärmepumpen werden in den kommenden Jahren voraussichtlich stark an Bedeutung gewinnen, da diese energieeffizienter arbeiten als bisherige Heiztechnologien [1]. In Anbetracht der stetig steigenden Energiepreise, dem globalen Fokus auf die Nutzung erneuerbarer Energie und dem Ziel CO₂-Emissionen zu senken, stellen Wärmepumpen eine attraktivere Option als das Heizen mit fossilen Brennstoffen oder elektrischen Widerstandsheizungen dar [2][3][4].

Zum jetzigen Zeitpunkt machen Luft-Wärmepumpen den Großteil der in Verwendung befindlichen Geräte aus [5]. Diese weisen zwar eine niedrigere Leistungseffizienz als Erd- oder Wasserquelle Wärmepumpen auf, bieten allerdings die Vorteile, dass Anschaffung und Montage günstiger sind und sie als Wärmequelle nur Luft benötigen. Infolgedessen können sie fast überall verwendet werden, und auch nachträglich an Gebäuden in städtischen Gebieten angebracht werden. Besonders bei Luft-Wärmepumpen muss auf die Lautstärke dieser geachtet werden, da sie auf Grund der verbauten Ventilatoren einen hohen Schalldruckpegel erzeugen [6]. Besonders in dicht besiedelten urbanen Gebieten kann dies problematisch sein, wenn Geräte nahe von Wohnräumen aufgestellt werden. Langfristige erhöhte Lärmbelastung kann bei Menschen eine Vielzahl von Symptomen hervorrufen, etwa Schlafstörungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, psychische Störungen und viele mehr [7][8].

Derzeit stehen zur Berechnung von Schalldruckpegeln an Orten von Interesse (zum Beispiel Grundstücksgrenzen, Fenstern der Nachbar:innen, etc.) aus den von Hersteller:innen kommunizierten Schalleistungspegeln der Maschinen in erster Linie einfache Tools zur Verfügung, die auf dem Abstand zwischen Quelle und Beobachter:in basieren. Die Frequenzinformation und Richtungsabhängigkeit der Schallquelle findet dabei nur in Korrekturfaktoren Berücksichtigung (z.B. Aufschlag bei Tonalität). Solche Berechnungstools sind zum Beispiel auf Webseite des österreichischen Wärmepumpenverbandes verfügbar [10].

Die in diesem Projekt entwickelte Anwendung soll diesen Auslegungsprozess erleichtern und mithilfe einer Computersimulation, welche Informationen über die reale Umgebung und die geplanten Wärmepumpen-Modelle verarbeitet, in Echtzeit den Schalldruckpegel an unterschiedlichen Positionen im Raum zeigen. Als Teil des Projekts werden sowohl eine Smartphone-Applikation für Android- und iOS-Geräte als auch eine Anwendung für die Verwendung auf der *Microsoft HoloLens 2* erstellt. Alle diese Optionen bieten die Möglichkeit, AR-Anwendungen zu nutzen, was ein maximales Maß an Nutzer:innenfreundlichkeit gewährleisten soll. Während der Laufzeit des Programms erkennt das Gerät automatisch die Umgebung im Nahbereich von etwa drei bis fünf Metern um die nutzende Person. Werden Wände fehlerhaft oder nicht erkannt, existiert die Möglichkeit, diese manuell anzupassen oder einzufügen. Um maximale Präzision bei der späteren Berechnung zu gewährleisten, werden Wand-Baustoffe automatisch erkannt oder ebenfalls manuell eingegeben. Aus einer Datenbank von Wärmepumpen-Modellen kann das Gewünschte ausgewählt und, wie in Abbildung 1 gezeigt, am geplanten Einsatzort platziert werden. Sobald diese Arbeitsschritte abgeschlossen sind, werden die Informationen an einen Server geschickt, welcher die Simulation durchführt und die Ergebnisse retourniert. Den Nutzenden wird sowohl visuell, mittels Farbgradienten am Display, als auch akustisch, durch Wiedergabe von Audiodateien mit angepasster Lautstärke, der ermittelte Schalldruckpegel an deren Standort und in der Umgebung dargestellt.

Abbildung 1: Wärmepumpenmodell mit dazugehörigen technischen Daten und gemessenen, richtungsabhängigen Schalldaten platziert im Außenbereich.



Die Erkennung der Umgebung ist ein sehr wichtiger Schritt, da die Flächen und Objekte mit dazugehörigen, exakten geometrischen Eigenschaften, grundsätzliche Inputs für die Schallausbreitungs- und Reflexionsberechnung sind. In heutigen Smart-Geräten gibt es zwei Arten von Sensoren, die für die Umgebungserkennung benutzt werden können. Erstens können mit der Kamera Fotos und Videos in verschiedene Positionen aufgenommen, und Stereo Vision Algorithmen verwendet werden, um anhand dieser, die Umgebung in 3D zu rekonstruieren. Zweitens sind in den neuesten high-end Smart Phones Time-of-Flight (ToF) Sensoren eingebaut, welche die Umgebung abtasten, und sofort eine 3D Tiefenbild erstellen können. Zum Zeitpunkt, zu dem die Technologieauswahl für die Umgebungserkennung getroffen wurde (in 2021), waren Mobilgeräte (Handys) mit ToF Sensoren eher eine Rarität, und wurden alleinig in der höchsten Preisklasse verkauft. Andererseits funktionieren aktuelle ToF Sensoren nur für kleinere Distanzen zuverlässig. Weiters kann Sonnenlicht sich störend für die ToF Funktion auswirken, was eine Outdoor-Anwendung erschwert. Im Vergleich dazu funktioniert Stereo-Vision ohne Probleme auf großen Distanzen, in starkem Sonnenlicht, Reflektionen stellen kein Problem dar, und sind mit jedem günstigen Smartphone (fast alle Smartphones haben Kamera und Accelerometer) anwendbar. Folglich wurde entschieden, für die 3D Umgebungserkennung die Stereo Vision Methoden zu verwenden.

4 Projektinhalt

Übergeordnetes Ziel von RAARA ist es, die kosten- und zeitintensive akustische Bewertung von Lärmbelastigungen bereits während früher Bauphasen zu automatisieren. Dabei wurden Methoden entwickelt, die es wesentlich erleichtern, Lärmemissionen im urbanen Gebiet zu minimieren beziehungsweise einfacher und intuitiver planen zu können. Mit Hilfe der Methoden wurde Folgendes möglich:

- Die räumlichen Gegebenheiten zu erfassen, d. h. Wände, Bäume, Hecken, Zäune, etc., dies erfolgt automatisch durch eine Kombination eines Mobilfunkgeräts zur Erfassung der unmittelbaren Umgebung und einem Zugriff auf CityGML- und anderen GIS-Datenbanken für Objekte in mittlerer und größerer Entfernung.
- Mittels Augmented Reality (Mobilgerät) eine Lärmquelle virtuell in realer Umgebung zu platzieren.
- Die geometrischen Umgebungsdaten an einen Server zu senden, um die Schallausbreitung bzw. den Schallpegel präzise in kurzer Zeit zu berechnen.
- Daten für einzelne Punkte im Raum zu speichern, um den lokalen Schalldruckpegel in einem weiteren Schritt mittels Augmented Reality sichtbar zu machen. Das heißt, der Schalldruckpegel kann mithilfe manuell platzierbarer, virtueller Objekte in der Umgebung visuell dargestellt werden.
- Die Grundlage geschaffen, das schallemittierende Gerät mit den berechneten Effekten hörbar zu machen.
- Schallphysikalische Eigenschaften den Umgebungsobjekten über vorhandene Datenbanken (CityGML, GIS) zuzuordnen. Weiters können Oberflächen manuell Materialeigenschaften zugewiesen werden. Diese Eigenschaften (beispielsweise der frequenzabhängige Schallabsorptionskoeffizient) fließen in die Simulation und somit die berechneten Ergebnisse ein.

Ausgehend von diesen Anforderungen wurde im Laufe des Projekts eine Prototyp-Applikation entwickelt, um das Konzept zu testen und präsentieren.

Akustische Signale wurden mittels akustischen Doms (55 Mikrofone werden um die Schallquelle herum platziert und frequenz-, orts- und zeitaufgelöste Signale werden aufgezeichnet) sowie Schallintensitätssondenmessung in einer Klimakammer unter definierten Umgebungsbedingungen gemessen und analysiert. Daraus lassen sich die erforderlichen Eingangsdaten für die akustischen Berechnungsmethoden (frequenz aufgelöste Schalleistungspegel auf fünf Flächen) berechnen. Um eine ausreichende Charakterisierung von Schallquellen unter Berücksichtigung von Frequenzinhalt, Richtungsabhängigkeit und transienten Geräuschen zu ermöglichen, ist ein gesteigerter experimenteller Aufwand nötig. Es wurden unterschiedliche Lärmquellen (u.a. eine Normschallquelle, ein Dodekaederlautsprecher und einzelne Wärmepumpen) mit 55 kalibrierten und exakt angeordneten Mikrofonen frequenz- und richtungsaufgelöst aufgenommen. Diese Messungen dienen als essenzielle Basis für die Nutzung komplexerer Berechnungsmethoden, statt auf Punktschallquellen und kugelförmige Schallausbreitungsmethoden zurückgreifen zu müssen. Sofern Schallquellen ohne frequenz- und richtungsaufgelöste Schalldaten bereitgestellt werden, wird jedoch weiterhin auf vereinfachte Berechnungsverfahren zurückgegriffen.

Die **Ergebnisse aus den 55-Kanal-Messungen** müssen in einer Art und Weise **aufbereitet werden**, sodass sie ein für die **Übergabe an die Berechnungsalgorithmen** geeignetes Format besitzen.

Im einfachsten Fall wird die Schallquelle dabei als **Monopolquelle** angenommen, sodass ein einziger Schalleistungspegel (gegebenenfalls für unterschiedliche Betriebsbedingungen) berechnet und übergeben werden kann. Die dazugehörige Berechnung kalkuliert aus den zeitabhängigen Domdaten zunächst den zeitabhängigen Schalleistungspegel für die einzelnen Terzbänder. Daraus kann durch eine Energiemittelung der Mittelwert berechnet werden. Die Summation über die einzelnen Terzbänder ergibt dann den Schalleistungspegel für den definierten Betriebspunkt. Diese Werte können auch aus einer im Rahmen der Akkreditierungsmessungen durchgeführten Messung mit einer Intensitätssonde erhalten werden. Dazu wird üblicherweise der zeitliche und örtliche Mittelwert über 5 rechteckige Umrandungsflächen, die im geeigneten Abstand überstrichen werden, experimentell ermittelt. Die Mittelung über die fünf Flächen ergibt im Anschluss den Schalleistungspegel, wobei meist auch die Terzbandanteile verfügbar sind. Für die fünf bei der Intensitätssondenmessung gewählten Richtungen liegt somit auch eine richtungsabhängige Information vor, bei der Nutzung des Domes sind noch weitaus mehr Richtungen (im Beispiel des gezeigten Messaufbaus sind dies 12) verfügbar. **Daraus können Schallquellen höherer Ordnung für die Schallausbreitungsberechnung extrahiert werden.**

Nachdem die Daten in einem geeigneten Format zur Verfügung stehen, können diese direkt an die Berechnungsalgorithmen übergeben werden. Im ersten Schritt wurden Methoden entwickelt, die die gerichtete Schallausbreitung im Außenbereich behandelt. Dabei werden die Absorption und Reflexion von Schall noch nicht betrachtet. Die hier beschriebenen Methoden befassen sich mit der Schallausbreitungsberechnung im Freien. Dabei werden Korrekturen für die Ausbreitungsberechnung basierend auf der Richtcharakteristik der Quellen mittels der BEM-Methode **auf Basis von Mono- und Dipolquellen** bestimmt.

Die **Methoden zur Erkennung von Oberflächenmaterialien** umfassen die Identifikation von Materialität mittels Computer Vision (RGB-Bilder und Deep Learning, reine Texturanalyse, Reflektivitätsmessung mittels ToF Kamera), die Identifikation von Materialität basierend auf Schall und Vibration (Klopfen und Lauschen, Klopfen und Fühlen, Vibrationsinteraktion) und die Identifikation von Materialität basierend auf haptischen oder thermischen Eigenschaften (Temperatur-Messung, Druck und Kompressibilität). Im Projekt wurde **Computer Vision** als Verfahren gewählt.

Methoden zur Umgebungserkennung umfassen die sensorbasierte Datenerfassung, die Tiefenberechnung von Stereo-Bildern und die semantische Segmentierung. Im Projekt wurde die Erkennung der unmittelbaren Umgebung über den Plane Manager in Unity's AR Foundation API und eine erweiterte Umgebungserkennung mittels Bilderkennung umgesetzt. Insbesondere die maximale Entfernung erkennbarer Objekte wird als Herausforderung gesehen.

Die grundlegende **Berechnungsmethode** kann in folgende Teile zerlegt werden:

- Analyse der Geometrie mit Extraktion höhenabhängiger 2D-Umrisse der Gebäude und einer Voranalyse für mögliche Reflexionen zwischen vertikalen Flächen
- Direkte Pfade mit Berechnung der atmosphärischen Dämpfung und falls Beugungseffekte vorhanden sind, die Berechnung der Beugung und weiters die Berechnung der Bodendämpfung

- Reflexionen mittels 2D–Spiegelmethode mit Bestimmung der Pfade in 2D, Rückverfolgung der Pfade in 3D, Bestimmung des Höhenprofils und Berechnung der vertikalen Beugung, der Bodendämpfung und der Retrodiffraktion
- Seitliche Beugungseffekte, die nur berechnet werden, wenn der direkte Pfad unterbrochen ist. Dabei erfolgt die Bestimmung der Pfade und Berechnung der Bodendämpfung
- Zusammenführen der einzelnen Komponenten

Derzeit erfolgt die Berechnung auf einem externen Server, sodass Daten von der Applikation geschickt, die Berechnung durchgeführt und die Daten wieder empfangen, verarbeitet und visualisiert werden müssen. Es wird als Herausforderung angesehen, diesen Prozess direkt in der App durchzuführen, um alle mit der externen serverbasierten Berechnung einhergehenden Probleme zu vermeiden (Rechenzeit, Konnektivität, Sicherheit, gleichzeitige Verfügbarkeit).

5 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse des Projektes zusammengestellt. Zunächst werden die ausgewählten Lärmquellen und dann die Messmethodik beschrieben. Es folgt die Dokumentation über ausgewählte Hardware, Software, Schnittstellen und Formate und die richtungsabhängige Schallmessung und Schallberechnung. Dabei werden auch exemplarische Messergebnisse gezeigt. Im Anschluss wird über die Umgebungs- und Oberflächenerkennung und den App Prototyp berichtet. Den Abschluss bildet die Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“ und der Beitrag des Projektes zu den Gesamtzielen des Programms.

Ausgewählte Lärmquellen

Als Lärmquellen wurde eine Referenzschallquelle, ein Dodekaeder-Messsystem sowie die Viessmann Vitocal 200-A ausgewählt. Zusätzlich waren Messdaten mit dem akustischen Dom von Messungen im Rahmen des FFG-Projekts „SilentAirHP“ und des IEA HPT Annex 51 „Acoustic Signatures of Heat Pumps“ des IEA HPT Annex 51 als Referenz verfügbar.

Messmethodik

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des akustischen Doms. In Abbildung 3 ist ein Dodekaeder-Referenz-Lautsprecher in diesem Dom platziert. Abbildung 4 schließlich zeigt eine Visualisierung des akustischen Doms mit Mikrofonnummern, eine genaue Zuordnung der Mikrofone zu den Flächen des Doms ist für die Berechnung des Schallleistungspegels wesentlich.

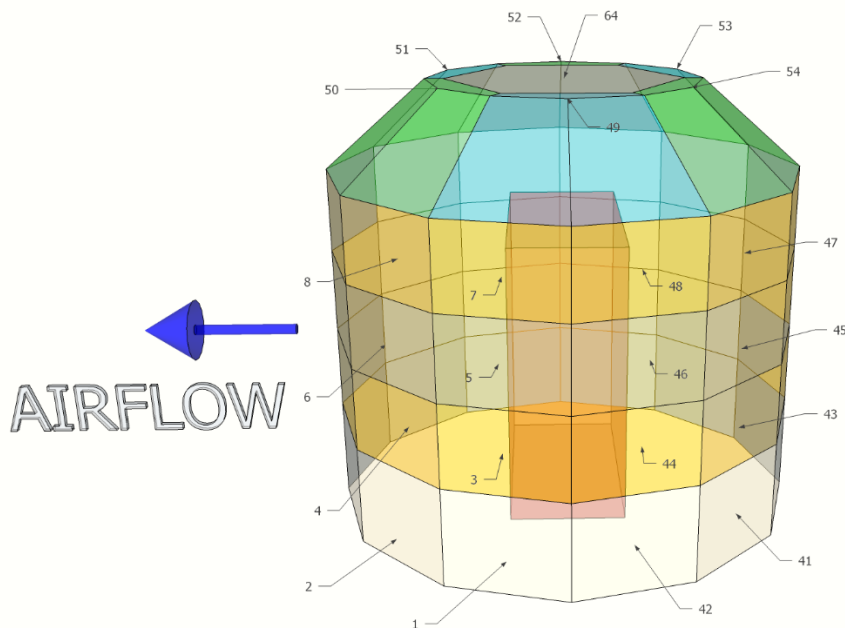
Abbildung 2: Aufbau des akustischen Doms mit 55 Mikrofonen in der Außenkammer des Klimakammersystems in der AIT TechBase.



Abbildung 3: Dodekaederlautsprecher als Referenzschallquelle im Zentrum des akustischen Doms in der Außenkammer des Klimakammersystems in der AIT TechBase.



Abbildung 4: Mikrofonnummern dargestellt in der Visualisierung des Aufbaus des akustischen Doms. Der Pfeil zeigt die Richtung der Strömung der Luft-Wärmepumpe an



Dokumentation über ausgewählte Hardware, Software, Schnittstellen und Formate

Es wurde zuerst der Entwicklungsstatus von derzeit verfügbaren Augmented Reality (AR) Brillen sowie deren Vor- sowie Nachteile ermittelt. Ein weiteres wichtiges Thema in diesem Projekt sind die klaren Definitionen der zu nutzenden Software und der Schnittstellen sowie der Dateiformate.

Ein **Überblick** über derzeit am Markt befindliche **AR-Brillen** wurde erarbeitet. Dabei werden sowohl kommerziell bereits vertriebene Modelle als auch Prototypen näher betrachtet. Unabhängig ihrer Entwicklungsstadien werden sie im ersten Schritt auf Basis der verbauten Hardware bzw. ihrer (vom Hersteller versprochenen) Funktionen analysiert. Dabei muss vor allem zwischen bereits am Markt befindlichen und dementsprechend testbaren Modellen und Prototypen unterschieden werden, da bei letzteren die versprochenen Funktionen nicht verifiziert werden können. Nach der Analyse der Funktionen wurden die einzelnen Brillen gegenübergestellt, um die für den angedachten Anwendungsfall geeignetste zu identifizieren.

Danach wurden **unterschiedliche Softwareumgebungen** und Programmiersprachen analysiert. Hierbei spielen sowohl die Benutzer:innenfreundlichkeit als auch die Nutzungsmöglichkeiten für den angedachten Anwendungsfall entscheidende Rollen. Die genutzte Programmiersprache muss sowohl für lokale Tests als auch für die Nutzung auf Mobilgeräten geeignet sein, um zusätzlichen Portierungsaufwand zu verringern. Ebenfalls muss auf die im ersten Teil gewählte AR-Brille eingegangen werden, um den Portierungsaufwand auf diese zu minimieren.

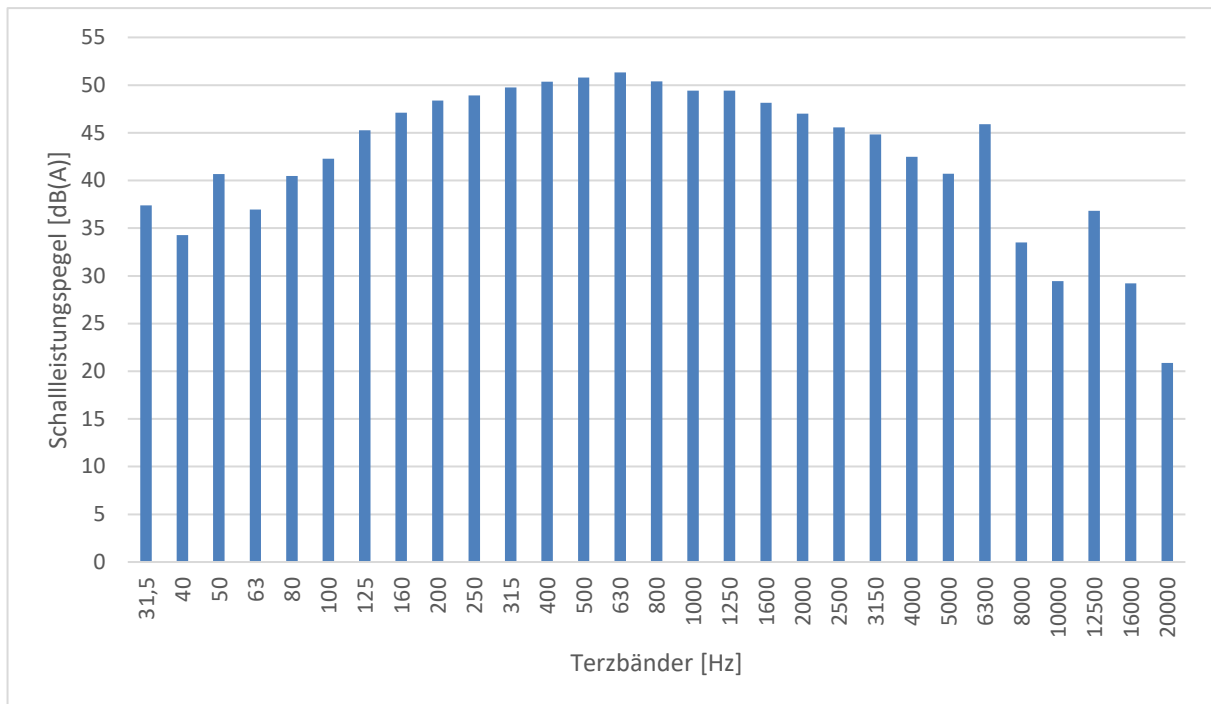
Abschließend lag der Fokus auf der **Schnittstellendefinition** zwischen unterschiedlichen Programmteilen. Da das in diesem Projekt bearbeitete Thema sowohl methodisch als auch programmiertechnisch aufwändig ist, ist eine saubere Definition der Schnittstellen und Dateiformate essenziell, um eine effiziente Abarbeitung zu garantieren. Dabei müssen sowohl die Kopplungen mit eigenständig programmierten Algorithmen, wie der Umgebungs- und Oberflächenerkennung, als auch jene mit Datenbanken, wie z.B. CityGML, und jenen auf externen Servern laufenden Programmen, wie der Schallberechnung, betrachtet und definiert werden.

Ein letzter Schritt beschäftigte sich mit dem **Import** von **CAD Daten**. Dies ist sowohl für das Einlesen von Planungsobjekten notwendig, welche weder mittels Umgebungserkennung identifiziert noch in CityGML hinterlegt sind, als auch für den korrekten Import von CityGML Daten. Eine einheitliche Definition dient einerseits der Verringerung des Programmieraufwandes andererseits auch dem deutlich verringerten Bugfixings.

Richtungsabhängige Schallmessung und Schallberechnung

Eine kommerzielle Wärmepumpe wurde bei unterschiedlichen Temperaturen mit dem akustischen Dom vermessen, um Quelldaten für die Schallausbreitungsberechnung zu extrahieren. Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein A-gewichtetes Terzbandspektrum.

Abbildung 5: A-gewichteter Schallleistungspegel einer kommerziell erhältlichen Wärmepumpe bei einer Temperatur von 2°C und einer relativen Luftfeuchte von 84%



Die Messungen der Wärmepumpe wurden bei vier Betriebstemperaturen zwischen -10°C und 12°C durchgeführt. Der Schallleistungspegel steigt mit sinkender Umgebungstemperatur bei dieser Wärmepumpe um insgesamt 8.9 dBA an. Die Auswertungen wurden auch für jeweils 12 Mikrofone in 2 Höhen detailliert: Die Werte variieren dabei einer Höhe von 1.48 m von 46.6 dBA bis 48.1 dBA (Unterschied 1.5 dB). In einer Höhe von 0.68 m schwanken sie von 44.8 dB bis 48.4 dB (Unterschied 3.6 dB).

Als Beispiel ist die Auswertung eines Datensatzes einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Abbildung 6 dargestellt. Eine Aufteilung in die unterschiedlichen Frequenzanteile findet sich abschließend in Abbildung 7.

Abbildung 6: Beispiel einer Schalleistungspegelauswertung einer Messung einer Wärmepumpe. Dargestellt ist der A-gewichtete Schalleistungspegel in dBA. Die x-Achse ist die Angabe der laufenden Sekunden nach Messbeginn.

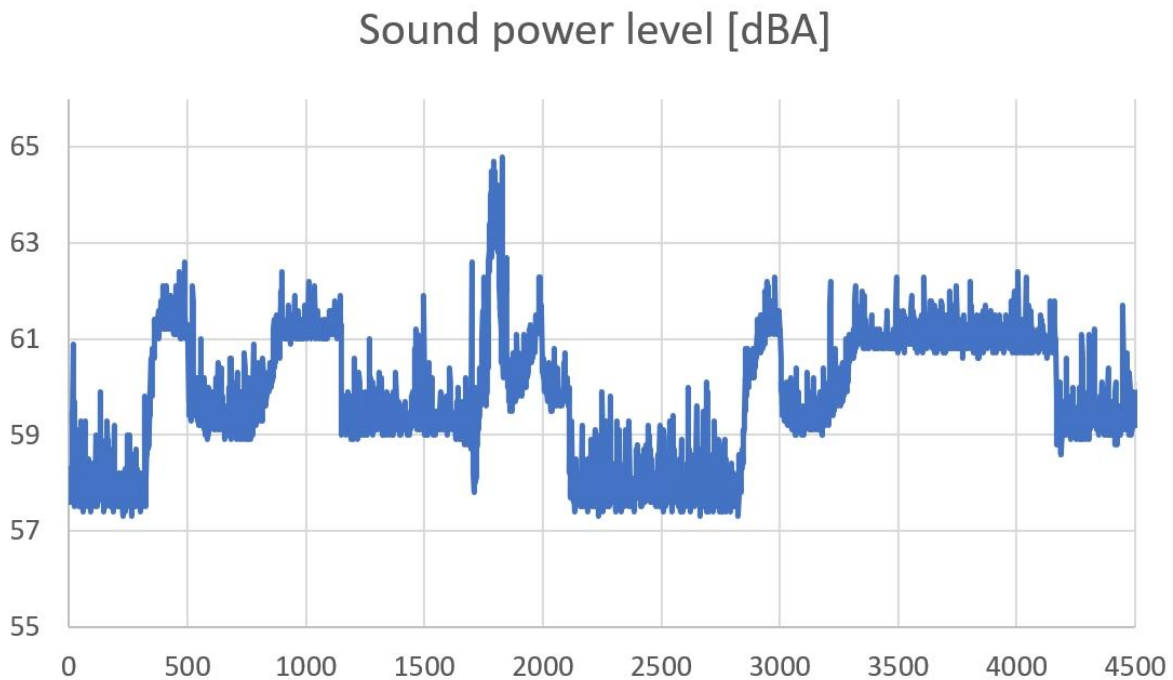
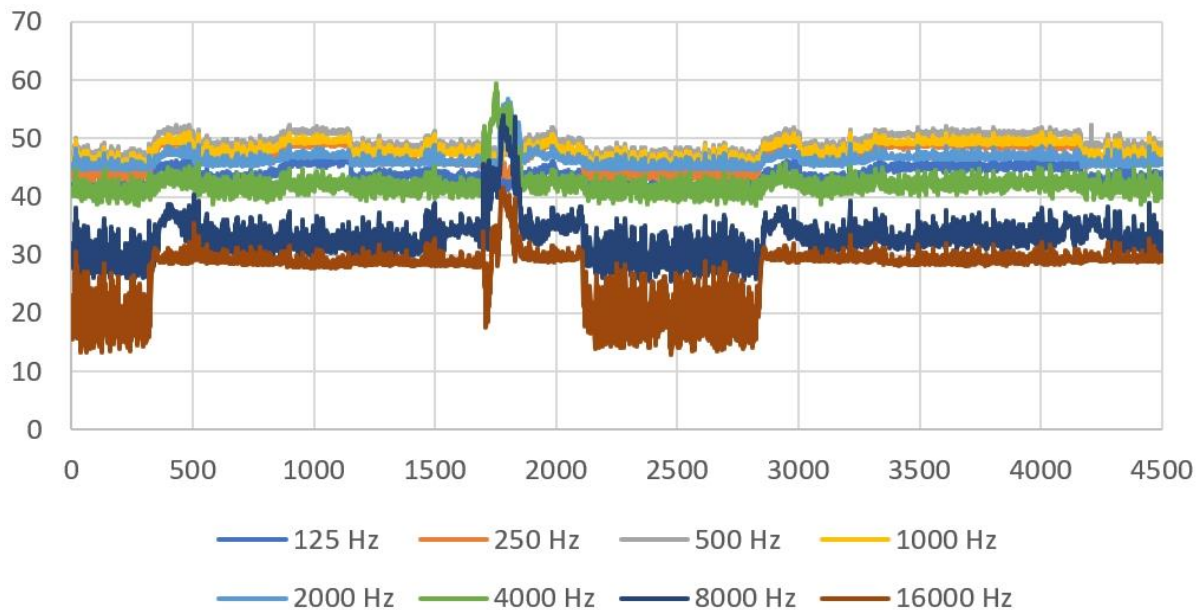


Abbildung 7: Darstellung der Frequenzanteile des Schalleistungspegel in dB(A) einer beispielhaften Messung



Der Algorithmus der Schallberechnung basiert auf dem aktuellen Standard für die strategische Lärmkartierung, der ÖAL 28, welche die nationale Implementierung der EU Direktive 2002/49/EG darstellt. Die Implementierung erfolgte in Matlab, wobei gewisse Funktionen, welche sehr oft aufgerufen werden, in C++ oder Fortran geschrieben und über Matlab eingebunden wurden.

Die Berechnung in der ÖAL besteht im Prinzip aus drei Teilen: direkter Pfad inklusive Beugung und Bodenterm, seitliche Beugung an vertikalen Kanten und Reflexionen an vertikalen Hindernissen. Diese Teile wurden im Wesentlichen in die Ausbreitungsrechnung von RAARA integriert.

Da die Berechnung nur für kürzere Entfernungen angewendet wird und möglichst schnell erfolgen soll, wurden nur die homogene Ausbreitungsbedingung implementiert, da die ausbreitungsgünstige Bedingung wesentlich rechenintensiver ist und vor allem auf große Entfernungen im Bereich von jenseits 100 m Unterschiede produziert. Weiters wird der Boden nur durch eine Ebene dargestellt, ebenfalls um die Berechnung zu beschleunigen. Die Spiegelquellenmethode wurde in 2D implementiert, weswegen Reflexionen nur an vertikalen Hindernissen berechnet werden können. Die ÖAL erlaubt hier eine Abweichung um bis zu 15°.

Die einzelnen Teile (Beugung an horizontalen Kanten, Reflexionen und Beugung an vertikalen Hindernissen, Bodenterm) wurden anhand der Qualitätssicherungsvorschrift ISO/TR 17534-4:2020 gegen 14 der 28 Beispiele validiert. Die übrigen Beispiele beinhalten verschiedene Bodenprofile und sind aufgrund der Vereinfachung des Bodens daher nicht geeignet.

Es wurde auch die Möglichkeit von Mehrfachreflexionen implementiert. Eine hohe Anzahl von möglichen Reflexionen erhöht allerdings die Rechenzeit sehr stark. Weiters besteht auch die Möglichkeit, Fresnelzonen zu berechnen, um Reflexionen nahe an vertikalen Kanten abzuschwächen. Für Reflexionen höherer Ordnung existieren auch keine validierten Beispiele, ebenso nicht für die Verwendung der Fresnelzonen, welche nicht Teil der ÖAL 28 sind. Diese Teile konnten daher nicht validiert werden.

Die ÖAL 28 hat auch einige Einschränkungen, welche die Ergebnisse beeinflussen können. Einerseits werden laterale Beugepfade nur bei vollständiger Blockade des direkten Pfades berechnet. Allerdings beeinflussen, ähnlich horizontalen Kanten, auch vertikale Kanten, welche sich nahe am Pfad befinden, das Schallfeld. Außerdem können auch reflektierte Pfade laterale Beugungseffekte beinhalten. Beides wird in der ÖAL 28 nicht berücksichtigt. Aus der Trennung zwischen lateraler Beugung um Hindernisse herum und „vertikaler“ Beugung über Hindernisse ergibt sich die Einschränkung, dass keine kombinierten Beugungspfade in schrägen Ebenen modelliert werden können. Diese können z.B. bei Situationen auftreten, wo eine niedrige Wand an eine höhere anschließt. Weiters gibt es auch keine Möglichkeit, überhängende Strukturen zu berücksichtigen. Dadurch ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte für zukünftige Verbesserungen.

Für die gerichtete Schallausbreitungsberechnung wurden neben der Verwendung von Monopolen auch Dipole eingesetzt. Daher wurde die Theorie und numerische Umsetzung der Bestimmung von Multipolquellen aus Schallmessungen von Wärmepumpen detailliert. Wesentlich dabei ist die Fourier-Transformation und Bestimmung der Kovarianz, die Hauptkomponentenanalyse und die Bestimmung der Multipolquelle.

Umgebungs- und Oberflächenerkennung und App Prototyp

Im Laufe des Projekts wurde sowohl der Smartphone Prototyp als auch eine Version für die Microsoft HoloLens entwickelt. Beide Anwendungen weisen die gleiche Funktionalität auf, lediglich die Darstellung der Objekte und das User Interface unterscheiden sich. Durch das Wegfallen des Handybildschirmes, mit dem direkt interagiert werden kann, müssen Menüs und andere Fenster, welche während der Nutzung angezeigt werden, als 3D Objekte im virtuellen Raum dargestellt werden.

Zurzeit ist es möglich, die Umgebung im Nahbereich automatisch zu erkennen und als Gitternetz darzustellen (siehe

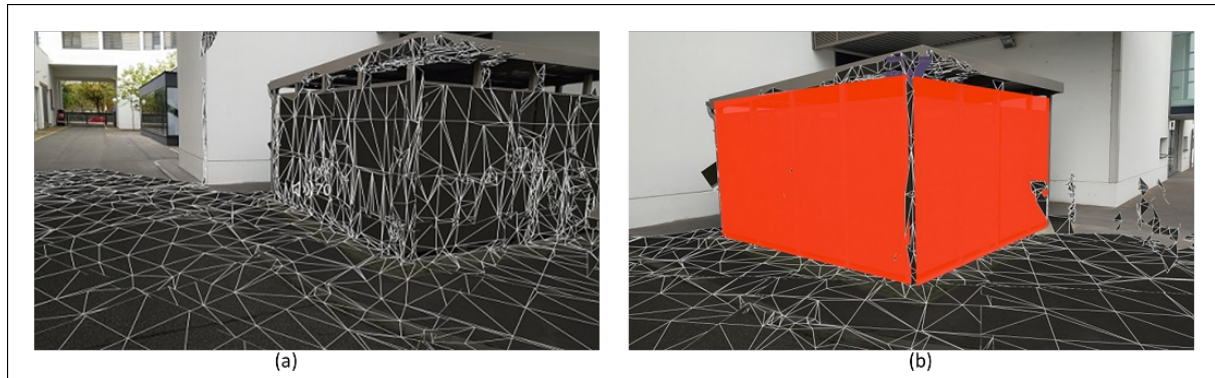


Abbildung 8a). Dieses Netz kann automatisch zu Ebenen umgewandelt werden (siehe

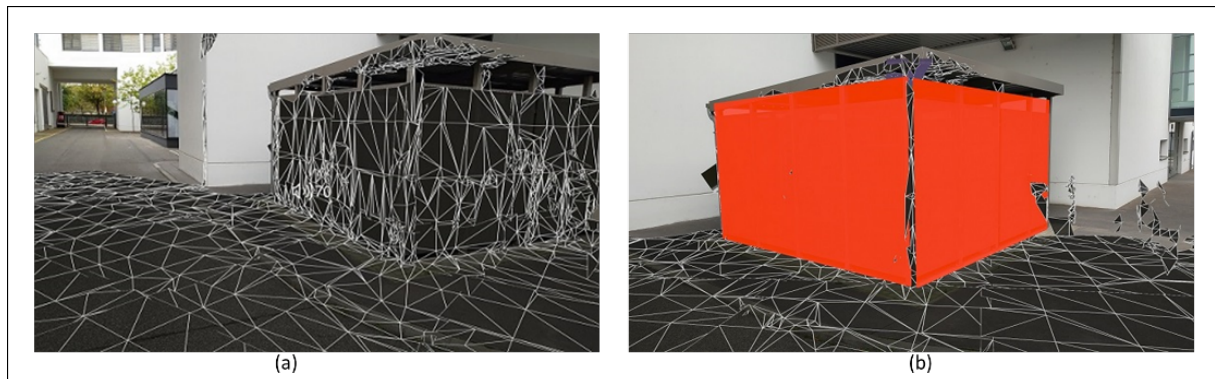


Abbildung 8b), die skaliert, verschoben und gedreht werden können. Manuelle Wände können jederzeit hinzugefügt werden (siehe auch Abbildung 11). Die erstellte Umgebung kann mit Materialien versehen werden, und aus einem Materialmenü kann die gewünschte Wandbauform ausgewählt werden. Auf dem Boden können beliebig viele Wärmepumpen platziert werden, die mithilfe von Balkendiagrammen und farblich codierten Würfeln die richtungsabhängige Schalleistung des Geräts anzeigen. Um den Schalldruck im Raum zu visualisieren, können Kugeln im Raum platziert werden, die den Schalldruckpegel an dieser Position darstellen. Es gibt auch eine Methode, um mehrere Messpunkte hinzuzufügen. Sobald mindestens eine Wärmepumpe und eine Gruppe von Messpunkten platziert sind, kann eine vereinfachte Schallsimulation durchgeführt werden, die vom Abstand zwischen Schallquelle und Messpunkt abhängig ist. Für eine anspruchsvollere Schallsimulation kann eine Verbindung mit dem Internet hergestellt werden. Die Kommunikation mit dem Berechnungsserver erfolgt über eine JSON-Datei, die den momentanen Aufbau der Szene speichert. Die Antwort-Datei des Servers enthält die Schalldruckwerte für alle Frequenzbänder für jeden angeforderten Punkt im Raum. Dieser Algorithmus führt eine realitätsnahe Simulation durch, in welche die Beschaffenheit der Umgebung (Geometrien und Materialein) mit einfließen. Diese Berechnung

wäre für ein Smartphone zu rechenaufwändig, durch die Durchführung auf einem Server kann das Problem allerdings gelöst werden.

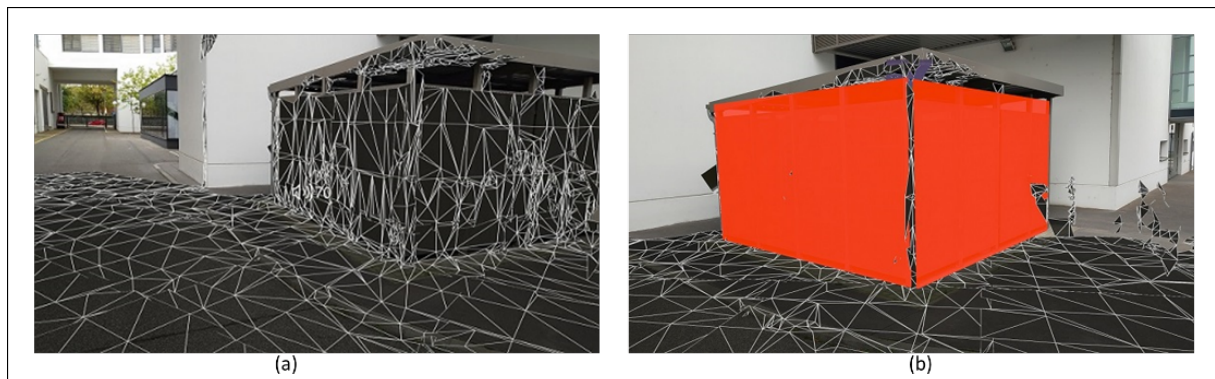


Abbildung 8: Das Ergebnis der Oberflächenerkennung während Nutzung der App.

(a) Zeigt das dreidimensionale Netz, welches über alle Oberflächen gelegt ist.

(b) Die „SurfaceMeshesToPlanes“-Funktion wurde aufgerufen und Ebenen, welche die Wände repräsentieren, sind eingefügt.

Die visuellen Informationen werden mit Messungen der IMU des Geräts kombiniert, um die Lage der Kamera im Verhältnis zur Welt abzuschätzen. Für die Erkennung weiter entfernter Objekte, wie Gebäudefassaden, wird eine Bilderkennung eingesetzt (siehe Abbildung 9 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Hierfür wurde erfolgreich eine eigene Applikation entwickelt, die Flächen aus Stereo-Aufnahmen erkennt. Eine Implementierung dieses Systems in den Prototyp würde den maximalen Anwendungsbereich stark erweitern. Für die AR-Anwendung werden bestehende Frameworks wie *ARCore* und *ARKit* für Smartphones und das Mixed Reality Toolkit für die HoloLens verwendet. Diese basieren auf der Detektion von Feature-Punkten zur Erkennung von Kanten und Flächen. Oberflächen ohne Textur, oder welche, die bei suboptimalen Lichtverhältnissen betrachtet werden, können jedoch die Qualität der Oberflächenenerkennung beeinträchtigen. Durch das Auslesen von Tiefendaten mithilfe von ToF-Sensoren können Punkte und Flächen genauer erkannt werden, solche Sensoren sind allerdings nur bei einer geringen Auswahl von Smartphones vorhanden.

Abbildung 9: Deep Learning basierter RAFT-Stereo-Algorithmus in Action.

Zwei Stereo-Bilder vom AIT-Gebäude, welche mit Hilfe der, bei der Aufnahme gespeicherten, Bewegungssensorwerte analysiert werden. Darunter die berechnete Disparity Map und die daraus ermittelte Depth Map (Tiefen Bild). Das Bild wird auch mit PSPNET segmentiert, auf der Depth-Map werden infolgedessen nur Bereiche, welche zur Klasse *Gebäude*, *Wand* oder *Haus* gehören angezeigt.



left image



right image, translation = [2.259, -0.032, -0.012], axis rotation 1.547 degree

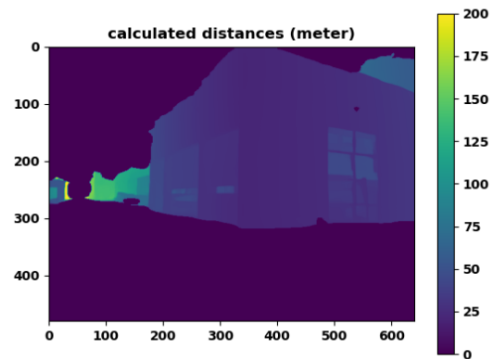
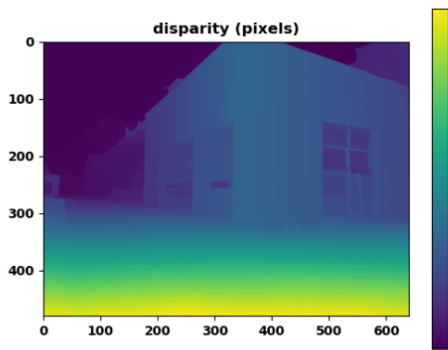
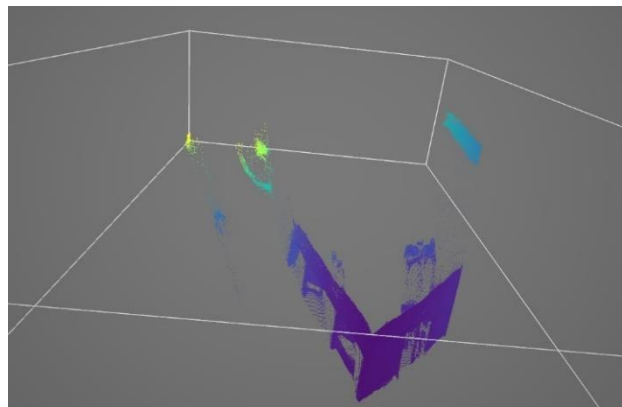
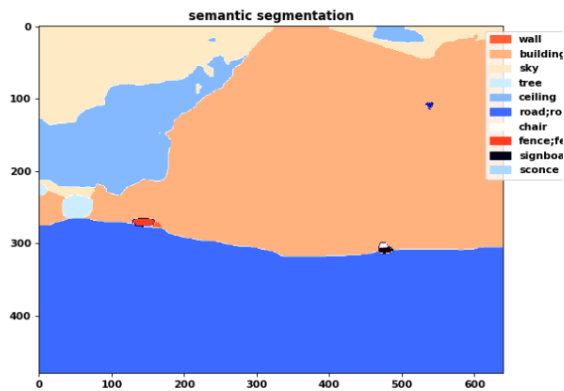


Abbildung 10: Stereo Record des AIT-Gebäudes, links: Semantische Segmentierung, rechts die ausgehend vom Tiefenbild berechnete 3D Punktwolke.



Die erarbeiteten Grundlagen wurden in einer App für Handys und Tablets implementiert. In Abbildung 11 ist eine virtuelle Wärmepumpe im Innenraum aufgestellt worden. Links kann man eine zusätzliche virtuelle Wand sehen. Rechts sind farblich kodierte Punkte mit Werten auf Rauten dargestellt. Die Rauten enthalten auch die Frequenzspektren des dort berechneten Schalldruckpegels. Abbildung 12 zeigt die Nutzung der App.

Abbildung 11: In der AR-Umgebung platzierte Wärmepumpe mit Darstellungspunkten für die Schallsimulation und virtueller Wand

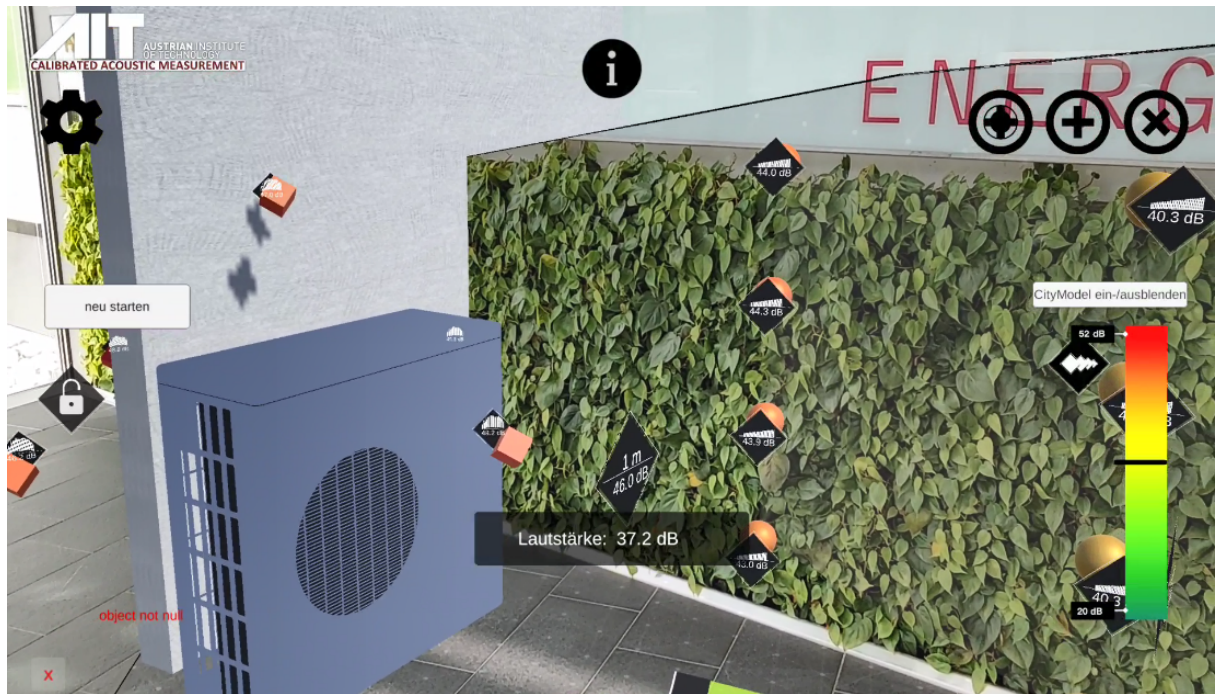


Abbildung 12: Augmented Reality Anwendung im Einsatz – die Nutzer:innen können die Wärmepumpe virtuell platzieren und am Tablett die Resultate visualisieren.



Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“ und Beitrag des Projektes zu den Gesamtzielen des Programms

Im Projekt RAARA - Residential Area Augmented Reality Acoustics wurden die wesentlichen Grundlagen geschaffen, Schallereignisse virtueller Schallquellen in realer Umgebung mittels fortschrittlicher Methoden zu berechnen und mittels Augmented Reality zu visualisieren. Darüber hinaus wurde eine erste Applikation entwickelt, um die betrachteten Möglichkeiten einem breiten Publikum zu demonstrieren und die Awareness, bezogen auf die Schallthematik, insbesondere bei Wärmepumpen, signifikant zu erhöhen. Da die akustischen Emissionen, insbesondere von Wärmepumpen, ein Show-Stopper in der Platzierung dieser Systeme und damit auch der Umsetzung von Plus-Energie-Quartieren sind, liefert die **Bereitstellung von digitalen Planungshilfen** mit Fokus auf **Verminderung und Vermeidung von unnötigen Lärmemissionen** einen wesentlichen Beitrag zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“. Weil schallemittierende Systeme mit Hilfe dieser Technologie korrekt platziert werden können, ergibt sich eine vermehrte Nutzbarkeit dieser Systeme. Damit wird die Etablierung eines nachhaltigen Energiesystems und die Reduktion der Klimawirkung unterstützt.

6 Schlussfolgerungen

Das AIT baute mit dem Projekt **RAARA** seine Position in den Bereichen Schallmessung (insbesondere von Wärmepumpen), Schallausbreitungsberechnung und Augmented Reality weiter aus und erweiterte seine Kompetenzen in einem essenziellen Forschungsbereich, um zukünftig die **Lärmbelastung** in urbanen Gebieten durch Lüfter-, Wärmepumpen und Rückkühler auf **intuitive** Weise zu **minimieren**.

Das erzeugte Wissen bietet Firmen die Möglichkeit, eigene Entwicklungen auf Basis des entwickelten AR-Schall-Paketes voranzutreiben. Dies stärkt die Rolle des AIT als attraktive:n Forschungspartner:in bzw. -dienstleister:in für national, aber auch global agierende Unternehmen. Das **AIT** wird die Projektergebnisse insbesondere dazu nutzen, Wärmepumpenhersteller:innen bei der schalltechnischen Optimierung ihrer Wärmepumpen zu unterstützen. Zusätzlich sind die Erkenntnisse auch für Produzent:innen stationärer Rückkühlgeräte sowie die Entwickler:innen und Hersteller:innen von Verdichtern sowie Ventilatoren von Relevanz. RAARA soll bei **AIT** eine Reihe weiterer Forschungsprojekte initiieren, sowie in langfristig zu profitablen Auftragsforschungsprojekten im Rahmen von Schallprofilerstellung von Lärmquellen und deren Implementierung in eine Schallprofilbibliothek führen.

Das Projekt hat unmittelbar positive Auswirkungen auf verschiedene Akteur:innen. Hersteller:innen von Software, Wärmepumpen- und Klimageräten sowie anderer lärmemittierender Geräte profitieren direkt von der Entwicklung der Anwendung. In mittlerer Frist können auch Planer:innen und Installateur:innen, Städteplaner:innen, Architekt:innen und Bauherr:innen von der Anwendung profitieren, nachdem sie zur Marktreife entwickelt wurde. Es ist zu beachten, dass diese Anwendung nicht nur in Österreich relevant ist, sondern auch in anderen Ländern der westlichen Welt, insbesondere in dicht besiedelten Wohngebieten, in denen Wärmepumpen aufgrund ihrer hohen Effizienz und Umweltfreundlichkeit immer beliebter werden.

Das Projekt hat somit das Potenzial, nicht nur einen positiven Beitrag zur Stadtentwicklung und Umweltschutz zu leisten, sondern auch zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen beizutragen. Zudem kann es einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung nationaler und internationaler Klima- und Energieziele leisten.

Die App wurde bei zuletzt bei der Chillventa in Nürnberg dem interessierten Fachpublikum präsentiert. Die Chillventa ist die Weltleitmesse der Kältetechnik und findet alle zwei Jahre in Nürnberg, Deutschland, statt. Sie ist eine der wichtigsten Veranstaltungen für alle Branchenteilnehmer:innen der Kälte-, Klima-, Lüftungs- und Wärmepumpentechnik weltweit.

Im Rahmen des IEA HPT Annex 63 wird die App gemeinsam mit anderen Tools zur akustisch optimalen Positionierung von Lärmquellen adaptiert und internationalisiert.

7 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund seiner Bedeutung für den gesamten Wärmepumpenmarkt ist geplant, mit dem österreichischen Wärmepumpenverband ein Branchenprojekt zu initiieren. Da derzeit nur – wie beschrieben – ein einziger Schalleistungspegel in den Datenbanken hinterlegt ist, liegt Interesse in der schrittweisen Erweiterung der Datensätze und frequenz- und richtungsabhängige Informationen, die in der App zur Berechnung benötigt werden. Damit wird z.B. eine Berücksichtigung der Absorptionseigenschaften von Wand- und Bodenmaterialien möglich, die ja frequenzabhängig sind.

Darüber hinaus wäre es vorteilhaft, zusätzliche Visualisierungsoptionen, wie zum Beispiel Texturen auf Wänden, Schachbrett zur Distanzbestimmung am Boden sowie Slider für Frequenzbänder zu implementieren.

TOF/Laser Sensoren werden mit der Zeit günstiger werden, sodass auch die Entwicklung neuer Smartphones und Tablets die Möglichkeit der App erweitert. Diese Sensoren sind derzeit nur in High-End Smartphones/Tablets integriert, werden aber in Zukunft auch Mittelklassegeräten zur Verfügung stehen. Die damit erzielbare Genauigkeit der 3D Punktwolken der Umgebungserkennung liegt über den Möglichkeiten der Stereo Vision und eine Adaptierung der derzeitigen Implementation sehr interessant.

Weiters ist geplant, die derzeit extern laufenden Berechnungsalgorithmen direkt am Endgerät durchzuführen. Dafür sind einige Herausforderungen (Rechenzeit, Code-Portierung von Matlab basierend auf optimierten Algorithmen auf C++/Java/Unity) zu meistern.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wärmepumpenmodell mit dazugehörigen technischen Daten und gemessenen, richtungsabhängigen Schalldaten platziert im Aussenbereich.	13
Abbildung 2: Aufbau des akustischen Doms mit 55 Mikrofonen in der Außenkammer des Klimakammersystems in der AIT TechBase.....	17
Abbildung 3: Dodekaederlautsprecher als Referenzschallquelle im Zentrum des akustischen Doms in der Außenkammer des Klimakammersystems in der AIT TechBase.....	18
Abbildung 4: Mikrofonnummern dargestellt in der Visualisierung des Aufbaus des akustischen Doms. Der Pfeil zeigt die Richtung der Strömung der Luft-Wärmepumpe an	18
Abbildung 5: A-gewichteter Schallleistungspegel einer kommerziell erhältlichen Wärmepumpe bei einer Temperatur von 2°C und einer relativen Luftfeuchte von 84%.....	20
Abbildung 6: Beispiel einer Schallleistungsauswertung einer Messung einer Wärmepumpe. Dargestellt ist der A-gewichtete Schalleistungspegel in dBA. Die x-Achse ist die Angabe der laufenden Sekunden nach Messbeginn.....	21
Abbildung 7: Darstellung der Frequenzanteile des Schallleistungspegel in dB(A) einer beispielhaften Messung	21
Abbildung 8: Das Ergebnis der Oberflächenerkennung während Nutzung der App.....	24
Abbildung 9: Deep Learning basierter RAFT-Stereo-Algorithmus in Action.	24
Abbildung 10: Stereo Record des AIT Gebäudes, links: Semantische Segmentierung, rechts die ausgehend vom Tiefenbild berechnete 3D Punktwolke.	25
Abbildung 11: In der AR-Umgebung platzierte Wärmepumpe mit Darstellungspunkten für die Schallsimulation und virtueller Wand	26
Abbildung 12: Augemented Reality Anwendung im Einsatz – die Nutzer:innen können die Wärmepumpe virtuell platzieren und am Tablett die Resultate visualisieren.	27

Literaturverzeichnis

- [1] Chua Kian J, Chou Siaw K, Yang WM: Advances in heat pump systems: A review. Elsevier, Applied energy 2010
- [2] International Energy Outlook. The U.S. Energy Information Administration, 2021 – online verfügbar unter <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (abgerufen am 24. Mai 2022; 16:20)
- [3] Wan Kevin KW, Li Danny HW, Liu Dalong, Lam Joseph C: Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. Elsevier, Building and Environment 2011
- [4] Constantinos A. Balaras, Kalliopi Droutsas, Elena Dascalaki, Simon Kontoyiannidis: Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings. Energy and Buildings 2005
- [5] Wu, Ruqun: Energy efficiency technologies--air source heat pump vs. ground source heat pump. Journal of sustainable development 2009
- [6] Fagot-Revurat E., Fournier F.: Identification of main noise sources in a heat pump. 2003
- [7] Goines Lisa, Hagler Louis: Noise pollution: a modern plague. South Med J 2007
- [8] Morillas Juan Miguel Barrigón, Gozalo Guillermo Rey, González David Montes, Moraga Pedro Atanasio, Vílchez-Gómez Rosendo: Noise pollution and urban planning. Springer, Current Pollution Reports 2018
- [9] IEA HPT Annex 63, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex63/>, (abgerufen am 09. März 2023; 02:36)
- [10] Schallrechner auf der Webseite des österreichischen Wärmepumpenverbandes, <https://www.waermepumpe-austria.at/schallrechner>, (abgerufen am 09. März 2023; 02:59)

Abkürzungsverzeichnis

RAARA	Residential Area Augmented Reality Acoustics
AIT	Austrian Institute of Technology
BMK	Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
AR	Augmented Reality
GIS	Geographic Information System
ToF	Time of Flight
GPS	Global Positioning System

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at