

TEXTE

151/2024

Abschlussbericht

Ermittlung der Relation zwischen Belästigung und Belastung durch Lärm von Luftwärmepumpen und Klimageräten

von:

Sarah Benz, Dirk Schreckenberger
ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung, Hagen

Bianca Vassallo, Markus Braun, Christian Eulitz
Möhler + Partner Ingenieure AG, München

Thomas Penzel, Martin Glos, Leonie Alt, Katharina Lederer
Advanced Sleep Research GmbH, Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 151/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3718 43 134 0

FB001429

Abschlussbericht

Ermittlung der Relation zwischen Belästigung und Belastung durch Lärm von Luftwärmepumpen und Klimageräten

von

Sarah Benz, Dirk Schreckenberger
ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt-
und Sozialforschung, Hagen

Bianca Vassallo, Markus Braun, Christian Eulitz
Möhler + Partner Ingenieure AG, München

Thomas Penzel, Martin Glos, Leonie Alt, Katharina
Lederer

Advanced Sleep Research GmbH, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung
Sennbrink 46
58093 Hagen

Möhler + Partner Ingenieure AG
Landaubogen 10
81373 München

Advanced Sleep Research GmbH
Luisenstraße 54 – 55
10117 Berlin

Abschlussdatum:

Oktober 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 Lärminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen
Christian Fabris

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Ermittlung der Relation zwischen Belästigung und Belastung durch Lärm von Luftwärmepumpen und Klimageräten

Im Zuge der Energiewende werden zunehmend Luftwärmepumpen (LWP) in Wohngebieten installiert, was zu einer veränderten Lärmbelastung in ehemals ruhigen Wohngebieten führt. Ziel dieses Projekts war es, die Auswirkungen des Lärms von LWP auf den Schlaf, die Tagesfunktionen und die Stimmung zu untersuchen. Es wurden zwei Laborstudien durchgeführt; eine nächtliche Schlafstudie und ein Tagesexperiment mit 40 gesunden, erwachsenen Versuchspersonen.

In der Schlafstudie mit Polysomnographie (PSG) wurden die Versuchspersonen drei Nächte lang drei verschiedenen Lärmbedingungen ausgesetzt: 1) LWP-Lärm mit simulierten geschlossenen oder 2) gekippten Fenstern sowie 3) ruhige Ausgangsbedingungen. In der Tagesstudie wurden die Versuchspersonen während des Lesens von Texten LWP-Lärm ausgesetzt und ihre Reaktionen wurden mit einer ruhigen Ausgangsbedingung verglichen. In der Schlafstudie wurden geringe, aber statistisch signifikante Auswirkungen von LWP-Lärm zwischen den beiden Lärmbedingungen mit simulierten geschlossenen und gekippten Fenstern beobachtet, mit erhöhten lärmassozierten Arousals bei gekippten Fenstern. Die Ergebnisse der Tagesstudie zeigten, dass LWP-Lärm zu erhöhter Lärmbelästigung, Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text und Stimmungsstörungen führte. Es wurde ein Sequenzeffekt festgestellt, d. h. es wurden mehr negative Auswirkungen beobachtet, wenn der Lärmzustand auf den ruhigen Zustand folgte, was auf einen kurzfristigen „Change-Effekt“ bei der Reaktion auf Lärm hindeutet.

Diese Untersuchung unterstreicht die Notwendigkeit, sich mit der zunehmenden Präsenz von LWPs in Wohngebieten und den damit verbundenen Lärmproblemen zu befassen. Zukünftige Studien sollten die Durchführung von Feldforschung in Betracht ziehen, um die Auswirkungen von LWP-Lärm in realen Umgebungen besser zu verstehen und Lösungen zu entwickeln, um die Kompatibilität von nachhaltigen Energiesystemen mit gesunden Nachbarschaftsbedingungen zu gewährleisten.

Abstract: Determination of the relation between annoyance and exposure to noise from air source heat pumps and air conditioners

Air-source heat pumps (AHPs) are increasingly being installed in residential areas due to energy transition efforts, resulting in changes in noise exposure in former quiet neighbourhoods. This project aimed to investigate the noise impact of AHPs on sleep and daytime functioning and mood. Two laboratory studies were conducted, comprising a night-time sleep study and a daytime experiment, involving 40 healthy, adult subjects.

In the sleep study using polysomnography (PSG), subjects spend 3 nights exposed to 3 different noise conditions: 1) AHP noise with simulated closed or 2) tilted windows, along with a 3) quiet baseline condition. In the daytime study, subjects were exposed to AHP noise while reading texts, and their responses were compared to a quiet baseline condition. In the sleep study, small but statistically significant effects of AHP noise were observed between the two noise conditions with simulated closed and tilted windows, indicating increased noise-related arousals with tilted windows. The results of the daytime study indicated that AHP noise led to increased annoyance, difficulties in concentrating on the text, and mood disturbances. A sequence effect was noted, with more negative effects observed when the noise condition followed the quiet condition, suggesting a short-term 'change effect' in response to noise.

This research highlights the need to address the growing presence of AHPs in residential areas and their associated noise issues. Future studies should consider conducting field research to better understand the effects of AHP noise in real-life settings and develop solutions to ensure the compatibility of sustainable energy systems with healthy neighbourhood conditions.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	17
1 Einleitung.....	22
2 Studienmethodik.....	24
2.1 Ablauf	24
2.2 Abschätzung des Stichprobenumfangs	27
2.3 Rekrutierung von Versuchspersonen.....	28
2.4 Instrumente	29
2.4.1 Aufzeichnung der Schlafstruktur - Polysomnographie.....	29
2.4.2 Auswerteparameter der Polysomnographie	30
2.4.3 Fragebögen in der Schlafstudie	31
2.4.4 Fragebögen der Tagesstudie.....	31
2.5 Beschreibung der Stichprobe.....	31
2.6 Akustische Stimuli	32
2.6.1 Geräuschszenarien.....	33
2.6.1.1 Schlafstudie.....	33
2.6.1.2 Tagesstudie	34
2.6.2 Wahl der Wiedergabepegel.....	34
2.7 Statistische Auswertung.....	35
3 Ergebnisse.....	37
3.1 Die Wirkung von Luftwärmepumpengeräuschen in der Nacht.....	37
3.1.1 Zwischengruppenvergleiche zwischen den Untersuchungs Nächten	37
3.1.2 Vergleich Anzahl lärmassoziierter Arousals zwischen den Lärmbedingungen.....	37
3.1.3 Auswertung der Fragebögen zum Schlaf.....	39
3.1.3.1 Schläfrigkeit und Schlafqualität	39
3.1.3.1 Selbstberichtete Schlafstörungen	40
3.2 Die Wirkung von Luftwärmepumpengeräuschen bei Tag.....	41
3.2.1 Wahrnehmung von Lärm in den beiden Studienbedingungen und die Auswirkungen auf die selbst eingeschätzte Leseleistung.....	41

3.2.2	Lärmbelästigung, Konzentration und Stimmung während der Versuchsbedingungen der Tagesstudie.....	43
3.2.3	Vergleich der Baselinebedingung und der Lärmbedingung hinsichtlich Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text, Stimmung und Blutdruck mittels Kovarianzanalyse	46
3.2.3.1	Ergebnisse der Kovarianzanalyse für Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text und Stimmung.....	46
3.2.3.2	Lärmbelästigung.....	47
3.2.3.3	Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text.....	49
3.2.3.4	Stimmung.....	51
3.2.3.5	Blutdruck und Herzfrequenz.....	52
3.2.4	Wahrnehmung der Geräuscheigenschaften von Luftwärmepumpengeräuschen	58
3.2.5	Zusammenhang zwischen Geräuscheigenschaften und abhängigen Variablen Lärmbelästigung, Konzentrationsschwierigkeiten auf Text, Stimmung.....	59
3.2.6	Finale Beurteilung der Texte.....	61
4	Diskussion und Schlussfolgerung.....	62
4.1	Wirkungen der Luftwärmepumpengeräusche im Wachzustand und im Schlaf.....	62
4.2	Methodische Überlegungen und Limitationen der Studie	63
4.3	Offene Forschungsfragen und Ausblick.....	65
5	Quellenverzeichnis.....	67
A.1	Screening Fragebogen.....	70
A.2	In der Schlafstudie verwendete Fragebögen.....	72
A.3	Fragebogen für die Tagesstudie.....	79
A.4	Audiometrie.....	88
A.5	Aufzeichnung des Audiomaterials.....	89
A.6	Fotodokumentation der Audioaufnahme	91
A.7	Auswahl einer Luftwärmepumpe für die Geräuschszenarien	94
A.8	Simulation der Außen-Innen-Übertragung.....	95
A.8.1	Lärmbedingung „Geschlossenes Fenster“	95
A.8.2	Lärmbedingung „Gekipptes Fenster“	96
A.8.3	Extrapolation fehlender Werte.....	97
A.9	Messaufbau und Durchführung.....	99
A.9.1	Auswahl der Räumlichkeiten	99
A.9.2	Gemessene Ruheschallpegel	99
A.9.3	Geräuschdarbietung.....	100

A.9.4	Akustische Qualitätskontrolle.....	105
A.10	Messergebnisse	108
A.11	Einrichtung der Untersuchungsraum.....	111
A.12	Spektrale Eigenschaften des für die Lautsprecherabdeckungen verwendeten Gewebes ..	112
A.13	Faktorenanalysen zu den Items des Tagesfragebogens.....	113
A.13.1	Stimmung	113
A.13.2	Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren.....	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer zeitlicher Ablauf der drei Untersuchungs Nächte.....	25
Abbildung 2:	Design der beiden Versuchsbedingungen in der Tagesstudie	26
Abbildung 3:	Zeitlicher Verlauf der Geräuschkonzepte für die Untersuchungs Nächte.....	34
Abbildung 4:	Zeitlicher Verlauf des Geräuschkonzepts für die Tagesuntersuchung	34
Abbildung 5:	Arousals im Zusammenhang mit Lärmereignissen (lärmassoziierte Arousal) für Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) und Bedingung 3 (Fenster geschlossen).....	38
Abbildung 6:	Spontane Arousals im Zusammenhang mit Lärmereignissen (lärmassoziierte Arousal), getrennt für Männer und Frauen, für die Lärmbedingung (Fenster gekippt) 2 und Bedingung 3 (Fenster geschlossen).....	38
Abbildung 7:	Werte der Karolinska-Schlaftragskala (KSS) vor dem Schlaf (Abend) und nach dem Schlaf (Morgen) für die Lärmexpositionsbedingung 1 (Ruhennacht), Bedingung 2 (Fenster gekippt), und Bedingung 3 (Fenster geschlossen).....	39
Abbildung 8:	Korrelation von Pittsburgh Schlaftragsindex (PSQI) mit dem Alter	40
Abbildung 9:	Haupteffekt der Bedingung auf Lärmtragsung	47
Abbildung 10:	Interaktionseffekt von Alter und Bedingung auf die Lärmtragsung	47
Abbildung 11:	Interaktionseffekt von Alter, Geschlecht und Bedingung auf die Lärmtragsung.....	48
Abbildung 12:	Lärmtragsung in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Bedingungen	49
Abbildung 13:	Haupteffekt der Bedingung auf Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text.....	49
Abbildung 14:	Interaktionseffekt von Bedingung und Alter auf die Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren.....	50
Abbildung 15:	Interaktionseffekt von Bedingung und Reihenfolge der Bedingungen auf die Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren.....	51
Abbildung 16:	Haupteffekt der Bedingung für die Stimmung.....	52
Abbildung 17:	Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und der Reihenfolge der Darbietung der Bedingungen (Baseline und Lärm) auf den systolischen Blutdruck.....	54
Abbildung 18:	Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Reihenfolge der Darbietung der Bedingungen (Baseline und Lärm) auf den diastolischen Blutdruck.....	54

Abbildung 19:	Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Alter auf den diastolischen Blutdruck.....	55
Abbildung 20:	Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2), Geschlecht und Alter auf den diastolischen Blutdruck	56
Abbildung 21:	Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Reihenfolge der Bedingungen (Baseline und Geräusche) auf die Herzfrequenz.....	57
Abbildung 22:	Interaktion zwischen Alter und Messzeitpunkt (T0, T1, T2) auf die Herzfrequenz.	57
Abbildung 23:	Wahrgenommene Eigenschaften der Luftwärmepumpengeräusche.....	58
Abbildung 24:	Bewertung des LWP-Geräuscheszenario anhand von 13 Geräuscheigenschaften ..	59
Abbildung 25:	Korrelationen zwischen Geräuscheigenschaften und den drei Hauptvariablen Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text und Stimmung.....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vom VINESH verwendete Datensätze zur Untersuchung von Wirkungen des Verkehrslärms auf den Schlaf (Tabelle 1 im VINESH Abschlussbericht, Griefahn et al. 2007, modifiziert)	27
Tabelle 2:	Angestrebte Stichprobengröße geschichtet nach Alter und Geschlecht	29
Tabelle 3:	Schlafvariablen (Mittelwert $M \pm$ Standardabweichung SD) nach Lärmbedingungen und Friedman-Test p -Werte	37
Tabelle 4:	Schlafstörungsvariablen nach Lärmbedingungen und Friedman-Test p -Werte	40
Tabelle 5:	Wahrnehmung von Lärm in den beiden Bedingungen der Tagesstudie	42
Tabelle 6:	Beschreibung der Geräuschwahrnehmung während der Untersuchungsbedingungen.....	42
Tabelle 7:	Durchschnittliche Geräuschwahrnehmung während des Lesens und die Auswirkung auf die selbstberichtete Leseleistung.....	43
Tabelle 8:	Durchschnittliche Lärmbelästigung, Konzentration und Stimmung während der beiden Versuchsbedingungen der Tagesstudie	44
Tabelle 9:	Ergebnisse der Faktorenanalyse mit drei bedeutsamen Hauptkonzepten	45
Tabelle 10:	Durchschnittliche Lärmbelästigung, Schwierigkeit bei der Konzentration auf den Text und Stimmung in beiden Versuchsbedingungen getrennt nach Alter, Geschlecht und Reihenfolge der Darbietung.....	45
Tabelle 11:	Kovarianzanalyse für Lärmbelästigung, Schwierigkeit bei der Konzentration mit dem Text und Stimmung	46
Tabelle 12:	Kovarianzanalyse für Blutdruck und Herzfrequenz: Haupteffekte und Interaktionen mit Messzeitpunkt.....	53
Tabelle 13:	Korrelationen zwischen Geräuscheigenschaften und drei Hauptvariablen Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit dem Text und Stimmung	60
Tabelle 14:	Finale Beurteilung der griechischen Texte der Tagesstudie.....	61

Abkürzungsverzeichnis

AASM	American Academy of Sleep Medicine
ASR	Advanced Sleep Research GmbH
ASTS	Aktuelle Stimmungs-Skala (<i>Current Mood Scale</i>)
BMI	Body Mass Index
dB	Dezibel
dB(A)	A-bewertete Dezibel
EKG	Elektrokardiogramm
EEG	Elektroenzephalogramm
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
ESS	Epworth-Test zur Tagesschläfrigkeit (<i>Epworth Sleepiness Scale</i>)
Hz	Hertz
ISI	Insomnie Schweregrad Index (<i>Insomnia Severity Index</i>)
kHz	Kilohertz
KSS	Karolinska Schläfrigkeitsskala
kW	Kilowatt
L_{Aeq}	A-bewerteter Dauerschallpegel
L_{AF}	Schalldruckpegel mit „A“-Frequenzbewertung und „Fast“-Zeitbewertung
L_{AFTeq}	Taktmaximal-Mittelungspegel
L_{AF5m}	Taktmaximalpegel während einer Taktzeit von 5s
LWP	Luftwärmepumpe
PSG	Polysomnographie
PSQI	Schlafqualitäts-Fragebogen (<i>Pittsburgh Sleep Quality Index</i>)
RIP	Induktionsplethysmographie
R_w	bewertetes Schalldämmmaß
REM	Rapid eye movement, „rasche Augenbewegung“
SD	Standardabweichung (<i>standard deviation</i>)
SE	Schlafeffizienz (<i>sleep efficiency</i>)
SE	Standardfehler (<i>standard error</i>)
SEL	Schallexpositionspegel (<i>Sound exposure level</i>)
SF-A	Schlaffragebogen A (<i>Sleep Questionnaire A</i>)
SOL	Einschlaflatenz (<i>Sleep onset latency</i>)
TIB	Zeit im Bett (<i>time in bed</i>)
TST	Gesamtschlafzeit (<i>total sleep time</i>)
UBA	Umweltbundesamt
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)

Zusammenfassung

Im Zuge der Energie- und Wärmewende wurden und werden zunehmend Luftwärmepumpen (LWP) im unmittelbaren Wohnumfeld installiert und betrieben. Aufgrund des technologischen Wandels sind diese Anlagen nicht mehr nur dem gewerblichen und industriellen Bereich (z.B. zur Beheizung und Kühlung von Bürogebäuden, Einzelhandelsbetrieben oder Produktionsstätten) vorbehalten, sondern finden sich vermehrt in der unmittelbaren Umgebung von Ein- und Mehrfamilienhäusern. Damit hat sich die Lärmbelastungssituation in ehemals ruhigen Wohngebieten bereits verändert. Vor allem in den ehemals ruhigeren Abend- und Nachtzeiten brummen nun LWP und Klimageräte. Beschwerden und Klagen über die Lärmbelastung durch diese stationären Quellen haben in den letzten Jahren zugenommen.

Die verbindlichen Richtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) werden durch die Geräusche von LWPs oder Klimaanlage jedoch in der Regel nicht überschritten. Dennoch fühlen sich die Betroffenen durch den Lärm belästigt und beklagen sich häufig über das mutmaßlich unzureichende Schutzniveau dieser Vorschriften (Eulitz et al. 2020).

In diesem Projekt wurden die Auswirkungen des Lärms von LWP untersucht. Um diese Auswirkungen während des Tages und in der Nacht zu untersuchen, wurden zwei Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. In einer polysomnographischen Studie wurde der Schlaf unter verschiedenen Lärmbedingungen untersucht, um die nächtlichen Auswirkungen zu ermitteln; in einem psychologischen Experiment wurden die Auswirkungen am Tag auf Lärmbelästigung, Konzentration und Stimmung untersucht.

Die Kernthesen lauten, dass nächtlicher LWP-Lärm einen Einfluss auf die Mikro- und Makrostruktur des Schlafes hat und dass es einen zeitlichen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Veränderungen im Lärmprofil und Störungen der Schlafstruktur gibt. Für die Auswirkungen im Wachzustand wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Lärmexposition während des Lesens eines Textes einen negativen Einfluss auf die Stimmung, die Konzentration beim Lesen eines Textes und die Lärmbelästigung im Vergleich zu einer ruhigen Bedingung haben. Darüber hinaus wurde angenommen, dass sich die Lärmbelastung bei der Messung des Blutdrucks und der Herzfrequenz im Vergleich zum Ausgangszustand bemerkbar macht.

Studienaufbau

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Laborstudien konzipiert: eine nächtliche Schlafstudie und eine Tagesstudie, in der die Auswirkungen von LWP-Lärm auf den Schlaf und die Konzentration am Tag, die Stimmung und die Belästigung durch Lärm untersucht wurden.

Die Studien wurden von September 2020 bis November 2021 durchgeführt und fanden im Schlaflabor der Advanced Sleep Research GmbH (ASR) in Berlin statt. Für die nächtliche Schlafstudie wurden zwei Schlafräume vorbereitet und mit einem entsprechenden Setup für die akustische Messung und Wiedergabe ausgestattet. Insgesamt nahmen 40 Versuchspersonen - 21 Frauen und 19 Männer - an den beiden Laborstudien teil. In der Schlafstudie wurde jede Versuchsperson in drei Studienächten untersucht, während sie drei verschiedenen Lärmbedingungen ausgesetzt war. Die Versuchspersonen kamen drei Wochen lang (z. B. drei Mal montags) einmal pro Woche für eine Nacht ins Labor.

Die nächtliche Schlafstudie hatte folgende drei Bedingungen:

- Lärmbedingung 1: Ruhenacht, Baseline

- ▶ Lärmbedingung 2: Nacht mit LWP-Lärm bei (simuliertem) teilweise geöffnetem Fenster (Kippstellung)
- ▶ Lärmbedingung 3: Nacht mit LWP-Lärm bei (simuliertem) geschlossenem Fenster

Die Untersuchung am Tag fand einmal nach der 3. (letzten) Studiennacht statt und bestand aus zwei Versuchsbedingungen, die jeweils 15 Minuten dauerten:

- ▶ Lärmbedingung: LWP-Lärm bei (simuliertem) teilweise geöffnetem Fenster (Kippstellung)
- ▶ Baselinebedingung: Stille

Jede Versuchsperson nahm an beiden Versuchsbedingungen teil.

Während der beiden Lärmbedingungen am Tag wurden die Versuchspersonen gebeten, Texte zu lesen. Dabei wurde die Methode der *imaginierten Alltagssituation* gewählt: Die Versuchspersonen wurden angewiesen, die Texte zu lesen und sich dabei vorzustellen, dass sie die Aufgabe zu Hause erledigen. Nach jeder Versuchsbedingung wurden die physiologischen Parameter der Versuchspersonen wie Pulsfrequenz, systolischer Blutdruck und diastolischer Blutdruck gemessen. Anschließend wurden die Versuchspersonen gebeten, einen Fragebogen auszufüllen.

Beide experimentellen Laborstudien wurden als Doppelblindstudien durchgeführt, d.h. sowohl die Versuchsleiter*in als auch die Versuchspersonen wurden nicht über die Reihenfolge der Geräuscharbietungen oder darüber informiert, welche Testbedingung in der jeweiligen Nacht- oder Tagessituation durchgeführt wurde.

Stichprobe und Instrumente

Zur Rekrutierung der Versuchspersonen wurde eine Datenbank mit gesunden Personen herangezogen. Zu den Einschlusskriterien gehörten u. a. ein Alter zwischen 18 und 65 Jahren, keine Schlafstörungen und eine Hör- und Sehfähigkeit im Normbereich. Darüber hinaus galten als Ausschlusskriterien: keine aktuelle Teilnahme an klinischen pharmakologischen Studien, Drogen- oder Alkoholmissbrauch, akute oder chronische behandlungsbedürftige Krankheiten oder neurologische und psychiatrische Erkrankungen sowie die Einnahme von Medikamenten, die den Schlaf-Wach-Rhythmus beeinflussen.

Um den Einfluss von LWP-Lärm auf Schlaf- und Wachparameter (Lärmbelästigung, Konzentration, Stimmung) zu untersuchen, wurden verschiedene physiologische und psychologische Messungen durchgeführt. Die Messung der Schlafstruktur wurde mittels Polysomnographie (PSG) über acht Stunden gemäß den internationalen Standards der American Academy of Sleep Medicine (AASM) durchgeführt (Berry et al. 2020). Zu den polysomnographischen Messungen gehörten u.a. Kanäle des Elektroenzephalogramms (EEG) und des Elektrokardiogramms (EKG). Folgende Parameter wurden ermittelt: Zeit im Bett (TIB), Gesamtschlafzeit (TST), Schlaffeffizienz (SE), Einschlafzeit (SOL), Summe der Zeit in den einzelnen Schlafstadien (N1, N2, N3, R) und der Wachzeit (zeitliche Auflösung 0,5 Minuten), die Anzahl der Arousals und weitere physiologische schlaf- und aktivitätsbezogene Parameter. Arousals wurden als lärmassoziiert definiert, wenn sie innerhalb eines Zeitfensters von 90 Sekunden nach einem Geräuscheignis auftraten (Geräusche resultierten aus unterschiedlichen Betriebszuständen, tonalen Komponenten oder kurzen Impulsgeräuschen der LWP).

Selbstberichtete Schlafparameter wurden mit standardisierten Schlaffragebögen erfasst, die am Abend vor dem Schlafengehen und am Morgen ausgeteilt wurden, um die Schlafqualität, die Schläfrigkeit und die lärmbedingten Schlafstörungen zu messen.

Während der Tagesstudie wurde die Wahrnehmung der dargebotenen Geräusche bewertet, indem gefragt wurde, ob und wie die Versuchspersonen die Geräuschmerkmale wahrnahmen. Außerdem wurden Fragen zum Textverständnis (Lesen, Motivation), zur Stimmung und zur Konzentration gestellt. Die Bedingungen der Wohnsituation der Versuchspersonen in Bezug auf Gebäudetyp, Fenstertyp, Lüftungsverhalten, Schlafqualität und den Einfluss der Covid-19-Pandemie wurden erfragt, um Auswirkungen zu berücksichtigen, die sich aus der Wohnsituation der Versuchspersonen ergeben.

Akustischer Aufbau und Stimuli

Der von einer Luftwärmepumpe (LWP) abgestrahlte Schall setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: Während im Dauerbetrieb ein breitbandiger geräuschvoller Schall im Vordergrund steht, können auch tonale Komponenten oder kurze Impulsgeräusche auftreten. Die Stimuli für die Studie wurden aus Messungen an verschiedenen LWP in realen Umgebungen generiert. Aus dem so gewonnenen Audiomaterial wurden zwei Geräuschszenarien zusammengestellt: Eines für die Präsentation während der Schlafstudie und eines für die Tagesstudie. Das Geräuschszenario für die Schlafstudie umfasste 60 Minuten, die sowohl verschiedene Betriebszustände als auch eine Ruhephase beinhalteten. Die Geräuschpegel wurden entsprechend dem realen Betrieb ausgewählt. Unterschiedliche Lärmpegel ergaben sich aus den verschiedenen Betriebszuständen und simulierten Fensterpositionen (gekippt und geschlossen). Dieser Geräuschzyklus wurde jede Nacht acht Mal dargeboten und bildete das Geräuschszenario. Für die Untersuchung am Tag wurde ein kürzeres Geräuschszenario von ca. 15 Minuten erstellt.

Die Geräuschdarbietung erfolgte in beiden Laborstudien über Lautsprecher, die in den Untersuchungsräumen aufgestellt waren. Daher musste die Geräuschübertragung von außen nach innen simuliert werden. Dazu wurde zunächst der Mittelungspegel (maximaler Mittelungspegel L_{AFTeq} des ungefilterten Signals) des einstündigen Geräuschszenarios (einschließlich aller Ruhephasen) in ca. 0,5 m Entfernung vom Lautsprecher auf 45 dB eingestellt, um die Geräuschsituation einer möglichen ungünstigsten vollen Nachtstunde „vor dem (simulierten) Fenster“ darzustellen. Anschließend wurde der Lärm spektral gefiltert, um den Übergang durch das geschlossene oder gekippte Fenster zu simulieren.

Ergebnisse

Gruppenvergleiche zwischen den Studienächten ergaben keine Unterschiede in den Schlafparametern für die drei Lärmbedingungen („Baseline“, „Fenster gekippt“ und „Fenster geschlossen“). Der Vergleich der Anzahl der Arousals während der beiden Lärmbedingungen („Fenster gekippt“ und „Fenster geschlossen“) ergab jedoch, dass die Gesamtzahl der Arousals (Summe der spontanen, respiratorischen und motorischen Arousals) im Zusammenhang mit den Lärmereignissen unter der Bedingung „Fenster gekippt“ höher war als unter der Bedingung „Fenster geschlossen“. Das Gleiche gilt für die Anzahl der spontanen Arousals in Verbindung mit Geräuschereignissen. Der Unterschied in der Anzahl der lärmassoziierten spontanen Arousals zwischen der Lärmbedingung 2 und der Lärmbedingung 3 war geschlechtsspezifisch, was auf eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Geschlecht und Lärmbedingung hindeutet: Männer wiesen in der Lärmbedingung 3 niedrigere Mittelwerte der lärmassoziierten spontanen Arousals auf, die jedoch nicht signifikant waren, während bei Frauen eine signifikante Veränderung beobachtet wurde. Die lärmassoziierten spontanen Arousals waren außerdem positiv mit der Schläfrigkeit (gemessen mit der Epworth Sleepiness Scale) korreliert, was bedeutet, dass mehr spontane Arousals mit einer größeren Tagesschläfrigkeit verbunden waren.

Die Auswertung der Schlafragebögen ergab keine Unterschiede in der Schläfrigkeit zwischen den drei Lärmbedingungen. Es wurde jedoch festgestellt, dass die mittlere Differenz zwischen der abendlichen Schläfrigkeit vor der PSG und der Schläfrigkeit am Morgen nach der PSG bei der Lärmbedingung mit dem simulierten „gekippten Fenster“ negativ war, d. h. die durchschnittliche Schläfrigkeit war am Morgen höher als am Abend zuvor. Bei den beiden anderen Lärmbedingungen war die Beziehung umgekehrt.

In der psychologischen Tagesstudie wurde tagsüber die Wirkung von LWP-Lärm im Vergleich zu einer ruhigen Ausgangsbedingung beim Lesen eines Textes untersucht. Die meisten Versuchspersonen nahmen das LWP-Geräusch in der Geräuschbedingung wahr. Von den 33 Versuchspersonen, die das Geräusch wahrnahmen, gaben 11 Personen an, dass das Geräusch wie eine „Klimaanlage“ oder ein „Belüftungssystem“ klinge.

Mit einer Kovarianzanalyse wurden mögliche Unterschiede in Bezug auf *Lärmbelästigung*, *Konzentrationsschwierigkeiten bei Text*, *Stimmung*, Blutdruck und Herzfrequenz zwischen der Ausgangsbedingung und der Lärmbedingung analysiert. In der Analyse wurden die Auswirkungen der Kovariaten *Lärmempfindlichkeit*, *Alter*, *Geschlecht* und *Reihenfolge der Präsentation der Bedingungen* kontrolliert. Haupteffekte wurden für die *Lärmbelästigung* durch LWP-Lärm, *Konzentrationsschwierigkeiten auf den Text* sowie für die *Stimmung* gefunden. Blutdruck und Herzfrequenz unterschieden sich nicht signifikant zwischen den beiden Bedingungen.

Ein Interaktionseffekt wurde für die Reihenfolge der Bedingungen in Wechselwirkung mit den Bedingungen für *Lärmbelästigung* und *Konzentrationsschwierigkeiten auf den Text* gefunden. Die Richtung der *Lärmbelästigung* war zwischen den Bedingungen gleich; in beiden Reihenfolgen war die *Lärmbelästigung* in der Lärmbedingung im Vergleich zur Ausgangsbedingung höher. In der Baselinebedingung berichteten die Versuchspersonen im Durchschnitt fast keine *Lärmbelästigung*, unabhängig von der Reihenfolge der Bedingungen. Der Grad der *Belästigung* in der Lärmbedingung unterschied sich jedoch und war in der Lärmbedingung deutlich ausgeprägter, wenn die Lärmbedingung auf die Baselinebedingung folgte. Die vorherige Bedingung schien als Referenzbedingung zu dienen, in diesem Fall die ruhige Umgebung. Weiterhin ließen sich Auswirkungen der Reihenfolge der Versuchsbedingungen auf die *Konzentrationsschwierigkeiten auf den Text* feststellen. Die Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren, war in der Lärmbedingung am höchsten, wenn diese Bedingung auf die Baselinebedingung folgte. Geringere Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text, aber immer noch höher im Vergleich zur Baselinebedingung, wurden in der Lärmbedingung berichtet, wenn diese Bedingung der Baselinebedingung vorausging. In der Reihenfolge der Bedingungen *Baseline - Lärm* war das Ausmaß der Konzentrationsschwierigkeiten jedoch in beiden Bedingungen gleich hoch, das heißt, die Konzentration war in der Baselinebedingung ohne Geräuschexposition nicht besser. Sowohl für die *Lärmbelästigung* als auch für die *Konzentrationsschwierigkeiten* zeigen sich in der Lärmbedingung stärkere negative Effekte, wenn diese auf die Baselinebedingung folgte.

Diskussion

In der Schlafstudie schliefen die Versuchspersonen drei Nächte in einem Laborschlafräum. In einer Nacht wurden sie dem LWP-Lärm ausgesetzt, der durch ein (simuliertes) geschlossenes Fenster zu hören war; in einer Nacht wurde ein gekipptes Fenster für die LWP-Lärmexposition simuliert. Zum Vergleich war die dritte Bedingung „ruhig“ (Basisnacht) ohne LWP-Lärmexposition. Die Expositionsbedingungen wurden in den drei Nächten permutiert. Für die Bedingung „Fenster gekippt“ betrug der durchschnittliche LWP $L_{Aeq,1h}$ 30,4 dB(A) mit Spitzenschallpegeln bis zu 41 dB(A) am Ohr der schlafenden Versuchsperson, und für die

Bedingung „Fenster geschlossen“ betrug der LWP $L_{Aeq,1h}$ 21 dB(A) mit Spitzenschallpegeln bis zu 30 dB(A). In der Studie am Tag wurden die Versuchspersonen 15 Minuten lang den LWP-Schallpegeln der Bedingung „Fenster gekippt“ ausgesetzt, im Vergleich zu 15 Minuten Stille (keine Lärmexposition).

Die Ergebnisse der Schlafstudie deuten auf geringe Auswirkungen von LWP-Lärm während des Schlafs hin. Nur geringe, aber statistisch signifikante Auswirkungen wurden für lärmassoziierte Arousals festgestellt. In der „lautesten“ Lärmbedingung wurde eine höhere Anzahl an Arousals festgestellt, d. h. in der Nacht mit dem Lärmszenario „Fenster gekippt“ verglichen mit dem Szenario „Fenster geschlossen“. Obwohl der Einfluss des LWP-Lärms auf lärmassoziierte Arousals zeigt, dass der Organismus auf betriebsbedingte Veränderungen des LWP-Lärms während der Nacht reagiert, impliziert dieses Ergebnis nicht grundsätzlich eine schädliche, pathologische Wirkung des LWP-Lärms.

Die Tagesstudie zeigte Unterschiede zwischen der Lärmbedingung und der Baselinebedingung für die wichtigsten Untersuchungsparameter (*Belästigung, Konzentrationsschwierigkeiten auf den Text und Stimmung*). Bei der Wirkung des LWP-Lärms auf die Lärmbelastigung und die Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren, wurde ein Sequenzeffekt festgestellt. Für beide Ergebnisse wurden mehr negative Effekte gemessen, wenn die Präsentation eines Lärmszenarios nach dem ruhigen Szenario stattfand. Es scheint plausibel, dass dies auf einer kurzfristigen Ebene auf den so genannten „Change“-Effekt bei Reaktionen auf Lärm hinweist, d. h. auf eine übermäßige Reaktion auf Lärm, insbesondere wenn sich die Exposition zum Schlechteren verändert (Brown & van Kamp, 2009a, b).

In der Untersuchung wurde darauf geachtet, andere Faktoren, die einen Einfluss auf den Schlaf haben könnten, den Möglichkeiten entsprechend, auszuschließen. Da die Versuchspersonen alle als schlafgesund eingestuft wurden, ist es nicht möglich anzugeben, ob bei zuvor kranken oder schlafgestörten Personen eine stärkere Lärmwirkung auftritt. Daher können keine Schlussfolgerungen über die Auswirkungen von LWP-Lärm auf vulnerable Gruppen, z. B. Personen mit Schlafstörungen, gezogen werden.

Im Schlafstudien-Design wurden die Studienächte in drei aufeinander folgenden Wochen jeweils einmal pro Woche am gleichen Tag durchgeführt. Es wurden keine Gewöhnungsnächte durchgeführt. In der Schlafforschung sind beide Designs üblich, sowohl Untersuchungsnächte in einem wöchentlichen Rhythmus als auch in aufeinanderfolgenden Nächten durchzuführen. Die Studiendesigns bisheriger Schlafstudien im Bereich der Lärmwirkungsforschung mit Polysomnographie sahen häufig konsekutive Nächte vor (z.B. Basner et al. 2011; Griefahn et al. 2007). Daher ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse diesbezüglich etwas erschwert. Die in dieser Studie untersuchten Lärmquellenarten unterscheiden sich in Bezug auf Häufigkeit, Dauer und Geräuschcharakteristik deutlich von anderen Studien. Insbesondere die Verkehrslärmquellen weisen unterschiedliche Eigenschaften auf (z. B. in der Tonalität).

Die für beide Studien ausgewählten akustischen Lärmszenarien entsprachen den typischen Geräuschen von im Feld installierten LWPs einschließlich typischer Betriebszustände. In den generierten Lärmszenarien wurde die Anzahl der Änderungen der Betriebszustände im Vergleich zu einem typischen Betriebszyklus erhöht. Dadurch sollten die Wahrscheinlichkeit, potenzielle Auswirkungen zu provozieren, gesteigert werden, da ein normaler LWP-Zyklus nur eine begrenzte Anzahl von Zustandsänderungen während der Nacht aufweist. Die Lautstärkeeinstellungen wurden so gewählt, dass sie einer realistischen Situation entsprechen und sich an der TA Lärm orientieren. Im Feld treten auch abweichende LWP-Szenarien auf. Der Schwerpunkt der Studie lag jedoch auf der Provokation potenzieller Effekte, die sich aus der Exposition gegenüber üblichen LWP bei Tag und bei Nacht ergeben.

Sowohl die Schlafstudie als auch die Tagesstudie liefern Hinweise auf Effekte in einer Laborumgebung. Die Ergebnisse können jedoch aus verschiedenen Gründen nicht direkt auf eine Feldsituation übertragen werden, im Wesentlichen aufgrund der fehlenden ökologischen Validität. Feldstudien würde es ermöglichen, die Expositionssituation und ihre Auswirkungen unter realen Bedingungen zu erfassen, um mögliche Auswirkungen bei Personen zu identifizieren, die über einen längeren Zeitraum mit LWP-Geräuschen leben. Schließlich wird man sich der Herausforderung stellen müssen, die Zunahme von LWP in der Wohnumgebung mit den daraus resultierenden Lärmproblemen in Einklang zu bringen und die Vereinbarkeit des Wachstums nachhaltiger Energiesysteme mit gesunden Nachbarschaftsverhältnissen sicherzustellen.

Summary

Due to the energy and heat transition, air-source heat pumps (AHP) have recently been and will be increasingly installed and operated in the immediate residential environment. Because of technological change, these systems are no longer reserved for commercial and industrial areas (e.g., for heating and cooling office buildings, retail establishments, or production facilities) and are increasingly present in the immediate vicinity of single- and multi-family homes. Therefore, the noise exposure situation in previously quiet residential areas has already changed.

Especially in formerly quieter times in the evening and at night-times, AHPs and air conditioners (AC) are now humming. Complaints and lawsuits about the noise exposure of those stationary sources have increased in recent years.

However, the binding guideline values of Technical Instructions on Noise Protection (TA Lärm) are usually not exceeded by the noise of AHPs or AC. Still, those affected are annoyed by the noise and often complain about the allegedly insufficient level of protection provided by these regulations (Eulitz et al. 2020).

This project investigated the noise impact of the noise from AHP. To examine these effects during the day and at night, two laboratory studies were conducted under controlled conditions. Sleep under different noise conditions was examined in a polysomnographic¹ study to determine the nocturnal effects; daytime effects on annoyance, concentration, and mood were studied in a psychological experiment.

The key hypotheses stated that nocturnal AHP noise has an influence on the micro- and macro-structure of sleep and that there is a temporal relationship between the occurrence of changes in the noise pattern and disturbances of the sleep structure. For the effects in the waking state, it was hypothesised that exposure to noise while reading a text would have a negative influence on mood, concentration while reading a text, and noise annoyance compared to a quiet condition. Furthermore, it was hypothesised that noise exposure would be evident in measurements of blood pressure and heart rate compared to the baseline condition.

Study design

Two studies were designed with a night-time sleep study and a daytime study investigating the effects of AHP noise on sleep and daytime concentration, mood, and annoyance.

The studies were conducted from September 2020 to November 2021 and took place in the sleep laboratory of Advanced Sleep Research GmbH (ASR) in Berlin. For the night-time sleep study, two sleeping rooms were prepared and equipped with an appropriate setup for acoustic measurement and playback. In total, 40 subjects – 21 women and 19 men - participated in both laboratory studies. For the sleep study each subject was examined in three study nights while exposed to three different sound conditions. Subjects came to the lab once a week for one night for three weeks in a row (e.g. three Mondays).

For the night-time sleep study, the three study night conditions were:

- ▶ Noise condition 1: Quiet night, Baseline
- ▶ Noise condition 2: Night with AHP noise with (simulated) window partially opened (tilt position)
- ▶ Noise condition 3: Night with AHP noise with (simulated) window closed

¹ Procedure for measuring physiological functions during sleep

The daytime examination took place once after the 3rd (last) study night and consisted of two experimental conditions, each lasting 15 minutes:

- ▶ Noise condition: AHP noise with (simulated) window partially opened (tilt position)
- ▶ Baseline condition: Quiet

Each subject participated in both experimental conditions.

During the two daytime noise conditions subjects were asked to read texts. The approach of an *imaginative everyday situation* was applied: Subjects were instructed to read the texts while imagining being at home performing the task. After each experimental condition, the subjects' physiological parameters such as pulse rate, systolic blood pressure, and diastolic blood pressure were measured. Subsequently, the subjects were asked to complete a questionnaire.

Both experimental studies were conducted as double-blind studies, i.e., the investigator as well as the subjects were not informed about the order of noise presentations or which test condition was conducted in each night or daytime test situation.

Sample and Instruments

A database of healthy individuals was used to recruit the subjects. Inclusion criteria included the age range 18-65 years, no sleep disturbances, normal functionality of hearing and eye-sight among others. In addition, exclusion criteria applied were no current participation in clinical pharmacological studies, drug or alcohol abuse, acute or chronic illnesses requiring treatment or neurologic and psychiatric diseases, and medication use that affect the sleep-wake rhythm.

Different physiological and psychological measures were applied to investigate the influence of AHP noise on sleep and waketime parameters (noise annoyance, concentration, mood). Measurement of sleep structure was performed by polysomnography (PSG) over eight hours according to the international standards of the American Academy of Sleep Medicine (AASM) (Berry et al. 2020). Polysomnographic measures included, for instance, channels of electroencephalogram (EEG), and electrocardiogram (ECG). The following parameters were determined: time in bed (TIB); total sleep time (TST); sleep efficiency (SE); sleep onset latency (SOL); the sum of the time spent in the individual sleep stages (N1, N2, N3, R) and time being awake (temporal resolution 0.5 minutes); the number of arousals and other physiological sleep and activity-related parameters. Arousals were defined as noise associated if they occurred within a time window of 90 sec after a sound event (sound resulted from different operating states, tonal components or short impulse noise of the AHP).

Self-reported sleep parameters were assessed using standardized sleep questionnaires handed in the evening before sleep and in the morning to assess sleep quality, sleepiness, and sleep disturbance linked to noise.

During the daytime study, perception of presented sounds was assessed by asking if and how subjects perceived the sound characteristics. Further, questions regarding text comprehension (reading, motivation), mood, and concentration were assessed. Conditions of subject's living situation regarding building type, window type, ventilation behaviour, sleep quality, and the influence of the Covid-19 pandemic were inquired to consider effects arising from the subject's home situation.

Acoustic set-up and stimuli

The sound emitted by an air-source heat pump (AHP) is made up of various components: While in continuous operation a broadband noise-like sound is in the foreground, tonal components or short impulse noise can also occur. The stimuli for the study were generated from measurements on various AHP in real environments. Two sound scenarios were then compiled from the audio material obtained from this system: One for the presentation during the sleep study and one for the daytime study. The noise scenario for the sleep study comprised 60 minutes, which included different operating states as well as a silence period. Noise levels were selected according to realistic operations. Different noise levels resulted from the different operating states and simulated window positions (tilted and closed). This noise cycle was presented eight times each night and formed the noise condition. For the daytime study, a shorter noise scenario of approx. 15 minutes was created.

The sound presentation in both laboratory studies was done via loudspeakers that were set up in the study rooms, which is why the noise transmission from outside to the inside had to be simulated. For this purpose, the average level (maximum average level L_{AFTeq} of the unfiltered signal) of the one-hour noise scenario (including all quiet periods) was first set to 45 dB at approx. 0.5 m from the loudspeaker, in order to represent the noise situation of a possible worst full night hour 'in front of the (simulated) window'. Subsequently, the noise was spectrally filtered to simulate the transition through the closed or tilted window.

Results

Between-group comparisons between study nights did not reveal any differences in sleep parameters for the three noise conditions ('baseline', 'window tilted', and 'window closed'). However, comparing the number of arousals during the two noise conditions ('window tilted' and 'window closed') revealed that a higher total number of arousals (sum of spontaneous, respiratory, and motoric arousals) associated with noise events occurred in the 'window tilted' condition than in the condition 'window closed'. The same was found for the number of spontaneous arousals associated with noise events. The difference of number of spontaneous arousals associated with noise between noise condition 2 and noise condition 3 was sex-specific indicating an interaction between the factors sex and noise condition: men exhibit lower mean values of spontaneous arousals associated with noise events during noise condition 3 but without significance whereas a significant change was observed among women. Noise-related spontaneous arousals were further positively correlated with sleepiness (measured with the Epworth Sleepiness Scale), meaning that more spontaneous arousals were related to greater daytime sleepiness.

The analysis of the sleep questionnaires revealed no differences in sleepiness between the three noise conditions. However, it was found that the mean difference between the evening sleepiness before PSG and the sleepiness in the morning after PSG was negative for noise condition with the simulated 'window tilted'; i.e. the average sleepiness was higher in the morning in comparison to the evening before. For the other two noise conditions the relationship was reversed.

In the psychological experiment at daytime the effect of AHP noise in comparison to a quiet baseline condition while reading a text was investigated. Most subjects noticed the AHP noise in the noise condition. Of the 33 subjects perceiving the noise, 11 subjects indicated the noise to sound like 'air conditioning' or 'ventilation systems'.

Analysis of covariance was executed to analyse potential differences in noise annoyance, difficulties in concentration on text, mood, blood pressure and heart rate between the baseline condition and the noise condition. In the analysis the effect of the covariates noise sensitivity, age, sex and order of presentation of the conditions were controlled. Main effects were found for noise annoyance due to AHP noise, difficulties in concentration on the text as well as for mood. Blood pressure and heart rate did not significantly differ between the two conditions.

An interaction effect was found for the order of the conditions in interaction with the conditions for noise annoyance and difficulties in concentration on the text. The direction of noise annoyance was equal between the conditions; in both orders, the annoyance was higher in the noise condition in comparison to the baseline. In the baseline condition subjects reported on average almost no noise annoyance regardless of the order of the conditions. However, the level of annoyance in the noise condition differed and was significantly higher in the noise condition when the noise condition follows the baseline condition. The previous condition seemed to serve as a reference condition, in this case the quiet surrounding. Similarly, effects of the order of experimental conditions can be reported for difficulties in concentration on the text. Difficulties in concentrating on the text was highest in the noise condition when this condition followed the baseline condition. Less difficulties in the concentration on the text but still higher compared to difficulties in the baseline condition was reported in the noise condition when this condition preceded the baseline scenario. However, in the order of conditions *baseline – noise* the level of difficulties with concentration was equally high in both conditions reflecting no advantage in concentration during the baseline condition. That is, both for the noise annoyance and the difficulties of concentrating on the text, the noise condition elicited stronger negative effects when it followed the baseline condition.

Discussion

In the sleep study, the subjects slept three nights in a laboratory sleeping room. In one night, they were exposed to AHP noise as heard through a (simulated) closed window; one night a tilted window was simulated for AHP noise exposure. For comparison, the third condition was 'quiet' (baseline night) without AHP noise exposure. The exposition conditions were permuted across the three nights. For the situation 'windows tilted' the average AHP $L_{Aeq,1h}$ was 30.4 dB(A) with peak noise levels up to 41 dB(A) at the ear of the sleeping subject, and for the situation 'windows closed' the AHP $L_{Aeq,1h}$ was 21 dB(A) with peak noise level up to 30 dB(A). In the daytime study the subjects were exposed for a duration of 15 minutes to the AHP sound levels of the 'windows tilted' scenario in comparison to 15 minutes of silence (no noise exposure).

Results from the sleep study indicate small effects of AHP noise during sleep. Only small but statistically significant effects were shown for noise-associated arousals. In the 'loudest' noise condition a higher number of arousals were found, i.e., at night with the 'windows tilted' noise scenario compared to the 'window closed' scenario. However, although the influence of the AHP noise on noise-related arousals show that the organism reacts to operation-related changes in the AHP sound during the night, this result does not necessarily imply a harmful, pathological effect of AHP sound.

The daytime study showed differences between the noise condition and the baseline condition for the main examination parameters (annoyance, difficulties in concentration on text, and mood). In the effect of AHP noise on noise annoyance and difficulties to concentrate on the text, a sequence effect was noticed. For both outcomes, annoyance and the ability to concentrate and focus on the text, more negative effects were measured when the presentation of a noise

scenario took place after the quiet scenario. It seems plausible that on a short-term level this indicates the so-called change effect in responses to noise, i.e. an excess in response to noise particularly when the exposure changes to the worse (Brown & van Kamp, 2009a, b).

Further, other factors that may have an influence on sleep were excluded. As the study subjects were all categorised as sleep healthy, it is not possible to indicate whether a stronger noise effect occurs in previously ill or sleep-impaired persons. Therefore, no conclusions can be drawn about the effects of AHP noise on vulnerable groups, e.g., people with sleep disorders.

In the sleep study design study nights were conducted once a week on the same day in the subsequent three weeks. No habituation nights were realized. In sleep research, both designs are common to conduct examination nights in a weekly rhythm as well as in consecutive nights. However, study designs of previous sleep studies in the field of noise impact research using polysomnography often scheduled consecutive nights (e.g., Basner et al. 2011; Griefahn et al. 2007). Therefore, the comparability of results is slightly aggravated. The noise source types investigated in this study differ significantly from other studies in terms of frequency, duration and noise characteristics. Especially transportation noise sources show different characteristics (e.g., in tonality).

The acoustic noise scenarios selected for both studies correspond to typical sounds from AHPs installed in the field including typical states. In the generated noise scenarios, the number of changes of operation states was raised compared to a typical operation cycle. This was done to increase the chance of provoking potential effects as a normal AHP cycle only has a limited number of state changes during the night. Loudness settings were chosen to resemble a realistic situation and in accordance to TA Lärm. After all, deviating AHP scenarios exist. The focus of the study was to provoke potential effects resulting from the exposure to common AHPs by day and by night.

Both the sleep study and the daytime study give evidence for effects in a laboratory setting. Yet, the results cannot be directly transferred to a field situation for several reasons, mainly because of the lack in ecological validity. A field study would allow to map the exposure situation as well as its effects under real conditions to identify potential effects in persons living with AHP sounds for a longer period of time. Finally, the increase in AHPs in the residential environment with the resulting noise issues will have to be addressed. New solutions must be thought of for the compatibility of growth in sustainable energy systems with healthy neighbourhood conditions.

1 Einleitung

Im Rahmen der Energie- und Wärmewende verfolgt die Bundesregierung das Ziel, konventionelle Heizungsanlagen durch energieeffiziente Systeme zu ersetzen. Daher werden in letzter Zeit vor allem Luftwärmepumpen (im Folgenden LWP genannt) vermehrt installiert und in der unmittelbaren Wohnumgebung betrieben.

LWP und Klimageräte sind stationäre Anlagen, deren Betrieb zu Lärmemissionen in der Nachbarschaft führt. Die Errichtung dieser Anlagen unterliegt grundsätzlich keinem Genehmigungsverfahren. Die Betroffenen sind daher nicht durch behördliche Genehmigungen oder Kontrollen geschützt und müssen oft zivilrechtlich gegen den Betreiber wegen Lärmbelästigung vorgehen. Hinzu kommt, dass die lärmrelevanten Anlagenteile der LWP und Klimageräte oft im Freien aufgestellt und betrieben werden. Dadurch kann ihr Lärm ungedämpft auf die Nachbarschaft einwirken.

Aufgrund des technologischen Wandels sind diese Anlagen nicht mehr nur dem Gewerbe- und Industriebereich vorbehalten (z.B. zur Beheizung und Kühlung von Bürogebäuden, Einzelhandelsbetrieben oder Produktionsstätten). Anlagen mit einer Nennwärme- oder -kühlleistung von bis zu 12 Kilowatt finden sich zunehmend in unmittelbarer Nähe von Ein- und Mehrfamilienhäusern. Bei den LWP wird diese Entwicklung durch die staatliche Förderung und die Verpflichtung zum Energiesparen weiter vorangetrieben. Bei den Klimageräten sind die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, die großflächige Verglasung von Gebäuden, die klimatischen Veränderungen und die Qualitätsanforderungen ursächlich für eine zunehmende Verbreitung dieser Geräte. Die Lärmbelastungssituation in ehemals ruhigen Wohngebieten hat sich daher bereits verändert. Vor allem in den bisher ruhigen Abend- und Nachtzeiten brummen nun LWP und Klimageräte. Beschwerden und Klagen über den Lärm von stationären Quellen haben in den letzten Jahren zugenommen. LWP und Klimageräte emittieren spezifische Geräuschemissionen, insbesondere hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs und der Frequenzzusammensetzung des Dauergeräusches sowie der transienten Betriebszustände (An- und Abfahren, Abtauen, Reinigungsbetrieb). Die Ermittlung und Beurteilung der Geräusche von LWP und Klimageräten erfolgt in Deutschland derzeit nach der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) in der Fassung von 1998 (TA Lärm, 1998). In bisher ruhigen Wohngebieten werden die verbindlichen Richtwerte der TA Lärm durch den Lärm von AHP oder AC jedoch meist nicht überschritten. Dennoch fühlen sich die Betroffenen durch den Lärm belästigt und beschweren sich häufig über das angeblich unzureichende Schutzniveau dieser Regelungen (Eulitz et al. 2020).

In diesem Projekt wurde die Relevanz der Lärmbelastung durch den charakteristischen Lärm von ACs und AHPs untersucht. Zuletzt gab es mehr Beschwerden über den Lärm von AHPs als von ACs. Daher wurde bei der Konzeption der Studie aus Effizienzgründen der Fokus auf die Untersuchung der Auswirkungen von LWP gelegt. Um die Auswirkungen von LWP am Tag und in der Nacht zu untersuchen, wurden zwei Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Zur Untersuchung der nächtlichen Auswirkungen wurde der Schlaf unter verschiedenen Lärmbedingungen in einer polysomnographischen Studie untersucht.

Die Hypothesen, die in der Schlafstudie getestet wurden, sind:

Nächtlicher LWP-Lärm verändert die Makro- und Mikrostruktur des Schlafes.

Es besteht ein zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Veränderungen im Geräuschemuster und Störungen der Schlafstruktur.

Die Auswirkungen am Tag wurden in einem psychologischen Experiment untersucht.

In der Tagesstudie wurde der Einfluss von LWP-Lärm auf alltägliche Aktivitäten wie das Lesen eines Textes untersucht. Dazu lasen die Versuchspersonen einen Text aus der griechischen Mythologie unter zwei jeweils 15-minütigen Bedingungen: einer ruhigen Bedingung (Baseline) und einer Lärmbedingung (15-minütiges LWP-Lärmszenario, „gekipptes Fenster“). Es wird davon ausgegangen, dass der LWP-Lärm als Umweltstressor (Glass & Singer 1972) das Potenzial hat, alltägliche Aktivitäten zu stören, d.h. die Konzentration auf und das Verstehen des Textes zu beeinträchtigen. Weiterhin kann es exponierte Personen belasten und zu Folgeerscheinungen wie verschlechterter, gestresster Stimmung und Lärmbelastigung führen. Diese Annahme führte zu den folgenden Hypothesen:

1. Die Versuchspersonen berichten über größere Schwierigkeiten, sich während der Lärmbedingung auf den Text zu konzentrieren, verglichen mit der Baselinebedingung.
2. Die Versuchspersonen berichten über eine schlechtere Stimmung und mehr Stress nach dem Lesen des Textes unter der Lärmbedingung als nach dem Lesen des Textes unter der Baselinebedingung.
3. Die Versuchspersonen berichten, dass sie sich nach dem Lesen des Textes unter der Lärmbedingung stärker vom Lärm belästigt fühlen als unter der Baselinebedingung.
4. Die Versuchspersonen haben nach der Lärmbedingung einen höheren physiologischen Stress, der sich durch einen höheren Blutdruck (systolischer und diastolischer Druck) als nach der Baselinebedingung zeigt.
5. Die Versuchspersonen haben nach der Lärmbedingung einen höheren physiologischen Stress, der durch eine höhere Herzfrequenz als nach der Baselinebedingung angezeigt wird.

Der vorliegende Bericht stellt den Versuchsaufbau und -ablauf vor, berichtet die Ergebnisse der Untersuchungen und ordnet diese ein.

2 Studienmethodik

Zwei Laborstudien wurden konzipiert, mit einer nächtlichen Schlafstudie und einer Tagesstudie im Wachzustand, in der die Auswirkungen von LWP-Lärm auf den Schlaf und die Konzentration, Aufmerksamkeit und Lärmbelästigung am Tag untersucht wurden.

2.1 Ablauf

Die Studien wurden von September 2020 bis November 2021 durchgeführt. Ursprünglich waren die Labortests für das Frühjahr 2020 geplant. Dies wurde aufgrund der COVID-19-Pandemie verschoben, da Lockdown-Maßnahmen den Zeitplan für die Forschung unterbrachen. Die Studien fanden im Schlaflabor der Advanced Sleep Research GmbH (ASR) in Berlin statt. Für die Schlafstudie wurden zwei Schlafräume vorbereitet und mit einem entsprechenden Setup zur akustischen Messung und Wiedergabe ausgestattet. Insgesamt nahmen 40 Personen an beiden Laborstudien teil.

Die Schlafuntersuchung fand in drei Nächten im Wochenrhythmus statt, d.h. eine Versuchsperson schlief z.B. an drei aufeinanderfolgenden Montagen im Schlaflabor. In jeder Nacht war die Versuchsperson unterschiedlichen Lärmbedingungen ausgesetzt waren. Jeder Besuch bestand aus den folgenden Abläufen:

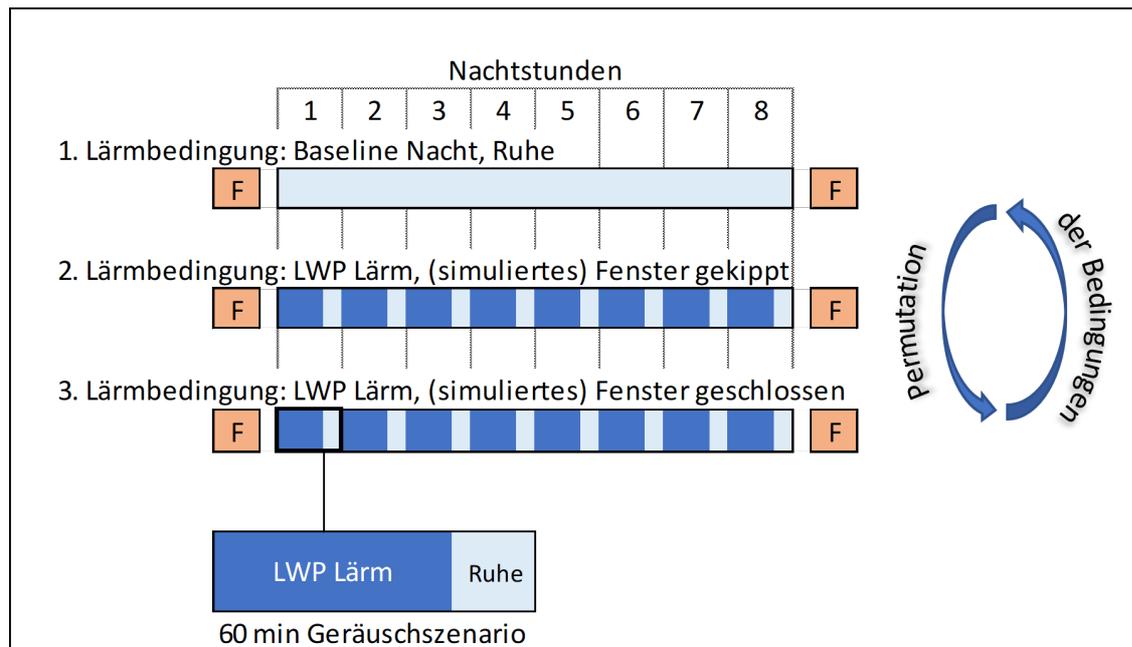
- ▶ Eintreffen im Schlaflabor von ASR am Abend um ca. 19:00 Uhr.
- ▶ Ausfüllen von Fragebögen am Abend.
- ▶ Vorbereitung auf die Schlafmessung (Polysomnographie, PSG).
- ▶ Durchführung der PSG über acht Stunden mit einer der drei Lärmbedingungen nach Randomisierung.
- ▶ Ausfüllen von Fragebögen am Morgen.

Für die drei Untersuchungs Nächte wurden drei Lärmbedingungen vorbereitet (Vgl. Abbildung 1):

- ▶ Lärmexpositionsbedingung 1: Ruhenacht (Baseline, Keine Geräusche)
- ▶ Lärmexpositionsbedingung 2: Lärmnacht mit (simulierter) gekippter Fensterposition
- ▶ Lärmexpositionsbedingung 3: Lärmnacht mit (simulierten) geschlossenen Fenstern.

Die Versuchspersonen wurden zufällig einer Reihenfolge der Szenarien zugewiesen. Jedes Lärmszenario umfasste 60 Minuten, das in den Nächten mit LWP-Lärmbedingung acht Mal abgespielt wurde (Bedingung 2 und 3).

Abbildung 1: Schematischer zeitlicher Ablauf der drei Untersuchungs Nächte



Anmerkung. F= Fragebogen. Nachtzeit ca. von 22:00 – 23:00 Uhr bis 06:00 – 07:00 Uhr, abhängig von der Schlafenszeit der Versuchsperson.

Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

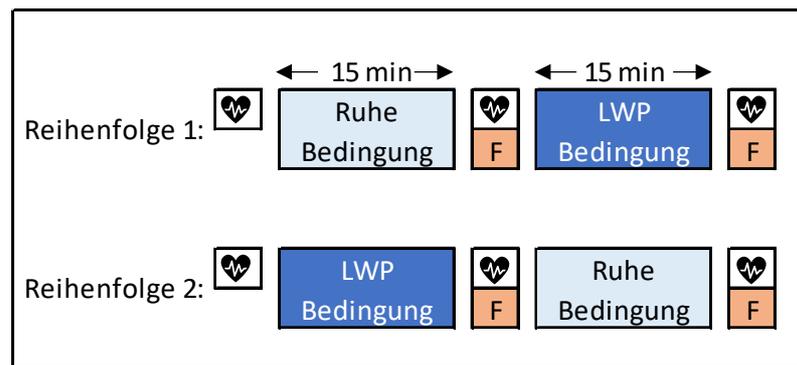
Abbildung 2 veranschaulicht den Aufbau der Tagesstudie. Pro Versuchsperson wurden zwei Geräuschszenarien präsentiert, während derer sie Texte lesen sollten. Die zwei Lärmbedingungen waren:

- Lärmbedingung: LWP-Geräusche bei (simuliert) gekippter Fensterstellung
- Baselinebedingung: Ruhe

Jede Bedingung dauerte 15 Minuten. Nach jeder Bedingung wurden die Pulsfrequenz, der systolische Blutdruck und der diastolische Blutdruck der Versuchsperson mit einem automatischen Messgerät mit Oberarmmanschette (*boso medicus uno*, BOSCH + SOHN GmbH u. Co. KG, Jungingen) gemessen. Danach wurden die Versuchspersonen gebeten, einen Fragebogen auszufüllen (siehe Anhang A.3). Nach Abschluss beider Versuchsbedingungen wurde ein Abschlussfragebogen ausgefüllt. Die Versuchspersonen wurden zufällig einer Reihenfolge der Bedingungen zugeordnet.

Die experimentelle Tagesstudie wurde in dem Schlaflaborraum durchgeführt, in dem die Versuchsperson die Nächte in der Schlafstudie verbracht hatte. Sie wurde auf den Tag nach der dritten Studiennacht angesetzt. In Ausnahmefällen konnte sie auch auf einen anderen Termin gelegt werden, wenn die Versuchsperson nicht direkt nach der dritten Studiennacht zur Verfügung stand.

Abbildung 2: Design der beiden Versuchsbedingungen in der Tagesstudie



Anmerkung. Reihenfolge 1: 1. Baseline 2. Geräuschbedingung, Reihenfolge 2: 1. Geräuschbedingung 2. Baselinebedingung. Experimentelle Bedingungen: Baseline Bedingung = keine Geräusche, Ruhe. Geräuschbedingung =

Wärmepumpengeräusche bei gekippter Fensterstellung. = Blutdruck- und Herzfrequenz-Messung, F=Fragebogen. Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Es wurde der Ansatz einer *imaginierten* Alltagssituation gewählt. Das heißt, die Versuchspersonen wurden angewiesen, die Texte zu lesen und sich dabei vorzustellen, dass sie die Aufgabe zu Hause ausführen (detaillierte Anleitung siehe Anhang A.3). Eine Aufgabe mit einer instruierten Alltagssituation entspricht dem Ansatz anderer Autor*innen, die mit Instruktionen versucht haben, die Versuchspersonen aus der Laborsituation herauszuholen (z.B. Feldmann & Carolus, 2019). In der zitierten Studie wurden Kontexteffekte beim Hören von LWP-Geräuschen festgestellt, wenn sich die Versuchspersonen eine Alltagssituation vorstellten.

In jeder der beiden Bedingungen lasen die Versuchspersonen unterschiedliche Texte, die sich im Stil ähnelten. Hierfür wurden zwei griechische Sagen aus demselben Übersetzungsband ausgewählt. Der zweite Text wurde nach der Prüfung der dritten Versuchsperson gewechselt, da sich die Lesezeit für eine Versuchsperson als zu kurz erwiesen hatte.

In der Tagesstudie saß die Versuchsperson auf einem Stuhl mit Blick auf die Lautsprecheranlage, so dass sie den Geräuschen ausgesetzt war. Die zu lesenden Texte wurden auf einem lüfterlosen Tablet präsentiert. Die Fragebögen wurden ebenfalls auf dem Tablet beantwortet. Es wurden Anweisungen gegeben, wann man sich an die Versuchsleitung wenden sollte.

Beide Laborstudien wurden als Doppelblindstudie durchgeführt, d.h. sowohl die Versuchsleitung als auch die Versuchspersonen wurden nicht darüber informiert, in welcher Reihenfolge die Geräuschdarbietungen stattfanden oder welche Versuchsbedingung in jeder Nacht oder Testbedingung der Tagesstudie durchgeführt wurde. Die Zuweisung erfolgte pseudo-randomisiert.

In der Rekrutierungsphase der Studie wurde der eigentliche Zweck der Studie verschleiert. Die Präsentation der Geräusche während der Studienächte wurde vor Beginn der Studie nicht erwähnt, um zu vermeiden, dass Erwartungen geweckt werden, die die zu messenden Reaktionen beeinflussen. Die Studie wurde als „Klimastudie“ kommuniziert, die den Einfluss des Raumklimas auf den Schlaf untersucht. Die Versuchspersonen wurden erst nach der Durchführung der Studie über den eigentlichen Gegenstand der Studie informiert. Der Ethikantrag bezüglich der Rekrutierung, des Studienablaufs, der Messinstrumente, der Fragebögen und des Datenmanagements wurde am 01. November 2019 bei der lokalen Ethikkommission der Charité-Universitätsmedizin Berlin, Campus Mitte, eingereicht. Am 14. Februar 2020 erfolgte die Genehmigung, dokumentiert unter dem Aktenzeichen EA1/020/20.

2.2 Abschätzung des Stichprobenumfangs

In Labor- und Feldstudien, die die Auswirkungen von Lärm auf die physiologisch gemessene Schlafqualität untersuchen, werden unterschiedliche Stichprobengrößen zwischen 16 und 112 Personen (in der NORAH-Studie bis zu etwa 180 Personen; Müller et al. 2015) realisiert. Dies geht aus der Darstellung der vom Virtuellen Institut der Helmholtz-Gemeinschaft VINESH zusammengestellten und neu ausgewerteten Datensätze „Verkehrslärm - Auswirkungen auf Schlaf und Leistungsfähigkeit“ hervor (Tabelle 1, Griefahn et al. 2007).

Tabelle 1: Vom VINESH verwendete Datensätze zur Untersuchung von Wirkungen des Verkehrslärms auf den Schlaf (Tabelle 1 im VINESH Abschlussbericht, Griefahn et al. 2007, modifiziert)

	N Versuchspersonen	Verkehrsquellenart: Anzahl der Lärmnächte					N Ruhenächte	Gesamt-N der Nächte
		Flug	Straße	Schiene	Flug + Straße	Flug + Straße + Schiene		
DLR + IfADo (Ruhenächte)	24	-	-	-	-	-	312	312
DLR (Fluglärm)	112	1008	-	-	-	-	448	1456
IfADo (Flug/Straße/Schiene)	24	72	72	72	-	-	96	312
IfADo (Straße, Schiene, TF)	16	-	48	48	-	-	48	144
IfADo (Straße/Schiene Zeit)	24	-	72	72	-	-	72	216
DLR (Flug/Straße/Schiene)	72	-	-	-	-	576	216	792
DLR Feldstudie Fluglärm	64			-	576	-	-	576
Σ Labor + Feld	336	1656	192	192	576	576	1256	3808

Anmerkung. Ruhenacht = keine Lärmexposition.

Für die NORAH-Studie über die Auswirkungen von Fluglärm auf den Schlaf haben die Autor*innen Schätzungen der erforderlichen Stichprobengrößen auf der Grundlage von Monte-Carlo-Simulationen vorgenommen. Ziel war, die Auswirkungen von Fluglärm auf die physiologisch gemessene Schlafqualität (einschließlich der Veränderung der Schlafstadien) mit ausreichender statistischer Aussagekraft und einer Genauigkeit von 95 % Konfidenzintervallen untersuchen zu können. Diese Schätzungen wurden später verallgemeinert auf Feldstudien zu den Auswirkungen von Fluglärm auf den Schlaf veröffentlicht (Basner & Brink 2013). Basner und Brink (2013) zeigen, dass die statistische Aussagekraft sowohl von der Anzahl der Versuchspersonen als auch von der Anzahl der Lärmereignisse abhängt. Sie empfehlen eine Mindeststichprobe von 40 Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Anzahl der Ereignisse.

Nach Basner und Brink (2013) würde auch eine Stichprobengröße von 30 Versuchspersonen zu einer noch akzeptablen statistischen Power führen; bei einer Größe von 10 oder 20 Versuchspersonen ist die erreichbare statistische Power zu gering und nicht mehr akzeptabel.

Die Berechnung von logistischen Mischmodellen, die für Expositions-Wirkungs-Funktionen zu lärminduzierten Aufwachreaktionen erforderlich sind, ist aufgrund der Messwiederholung und Verteilung der Zielvariablen „Aufwachreaktion“ nur numerisch möglich. Daher ist die Bestimmung der erforderlichen Stichprobengröße nur mittels Simulationen (Monte-Carlo- oder Bootstrap-Simulation) möglich, wie sie von Basner und Brink (2013) durchgeführt wurden. Den Autor*innen dieses Vorhabens ist keine polysomnographische Schlafstudie in Bezug auf LWP-Lärm oder Lärm aus ähnlichen Quellen bekannt. In Anlehnung an den Vorschlag von Basner und Brink (2013) für eine Mindeststichprobengröße für fluglärmbezogene Schlafstudien wurde für die Schlafstudie in diesem Forschungsprojekt die Stichprobengröße auf 40 Versuchspersonen festgelegt.

Die Stichprobengröße wurde dementsprechend auch für die zu untersuchenden physiologischen Effekte während des Tages angewendet. Für die subjektiven Daten wurde eine geringere geforderte Mindeststichprobengröße angenommen, da mit den vorgesehenen Ratingskalen und vergleichenden Bewertungen eine differenziertere Quantifizierung (als Weckreaktion ja/nein) erreicht werden kann. Gleichzeitig kann aufgrund der zu erwartenden höheren Effektstärken eine höhere statistische Power erzielt werden als bei physiologischen Variablen (mit Korrelationskoeffizienten zwischen Lärmbelästigung und Lärmpegel von ca. $r > 0,30$). Beide Laborstudien, d.h. die physiologischen und psychologischen Effektmessungen für Schlaf- und Wachzustände, wurden mit denselben Versuchspersonen durchgeführt.

2.3 Rekrutierung von Versuchspersonen

Die Rekrutierung der Versuchspersonen erfolgte durch ASR. Für die Rekrutierung der Versuchspersonen wurde eine Datenbank gesunder Personen bei ASR verwendet.

Die Einschlusskriterien waren:

- ▶ männlich oder weiblich
- ▶ Alter 18-65 Jahre
- ▶ keine Schlafstörungen
- ▶ normale Funktionsfähigkeit von Gehör und Augenlicht
- ▶ Fähigkeit, Umfang und Bedeutung der Studie zu verstehen

Kriterien für den Ausschluss von Personen von der Teilnahme waren:

- ▶ Teilnahme an klinischen Pharmakologiestudien vier Wochen vor Beginn der Untersuchung
- ▶ Drogen- oder Alkoholmissbrauch
- ▶ Akute oder chronische Erkrankungen, die eine Behandlung erfordern
- ▶ Einnahme von Hypnotika oder Medikamenten, die den Schlaf-Wach-Rhythmus beeinflussen
- ▶ Neurologische oder psychiatrische Erkrankungen

Die folgenden Instrumente wurden für das Screening der Versuchspersonen verwendet (siehe Anhang A.1):

- ▶ Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS; Johns, 1991), eine Beurteilung der Tagesschläfrigkeit.
- ▶ Insomnia Severity Index (ISI; Morin, Belleville, Belanger & Ivers, 2011), ein kurzes Instrument zur Bewertung des Ausmaßes der Schlaflosigkeitssymptome, die sowohl während der Nacht als auch tagsüber auftreten.
- ▶ Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI; Buysse et al., 1991), ein Selbstauskunftsfragebogen zur Bewertung der Schlafqualität.
- ▶ Ein Fragebogen zur Bewertung des Hörvermögens und der Empfindlichkeit gegenüber Umweltbelastungen.
- ▶ Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index (BMI).

Tabelle 2 veranschaulicht die vorgesehene Verteilung der Studienstichprobe in Bezug auf Alter und Geschlecht.

Tabelle 2: Angestrebte Stichprobengröße geschichtet nach Alter und Geschlecht

Alter / Geschlecht	weiblich	männlich	Gesamt
18 – 35 Jahre	6-7	6-7	12-14
> 35 – 50 Jahre	6-7	6-7	12-14
> 50 – 65 Jahre	6-7	6-7	12-14
Σ	20	20	40

2.4 Instrumente

2.4.1 Aufzeichnung der Schlafstruktur - Polysomnographie

Die computergestützte digitale Messung der Schlafstruktur wurde mittels Polysomnographie (PSG) über acht Stunden nach den internationalen Standards der amerikanischen Fachgesellschaft *American Academy of Sleep Medicine* (AASM; Berry et al. 2020) mit dem Aufzeichnungssystem *MiniScreen Pro* (Löwenstein Medical, Bad Ems) durchgeführt. In Vorbereitung der Messung erfolgte eine sorgfältige Platzierung der Messfühler und Sensoren durch geschultes und zertifiziertes Personal. Diese beinhalteten die Erfassung von:

- ▶ sechs Ableitpunkten des Elektroenzephalogramms (EEG: F4-M1, C4-M1, O2-M1, F3-M2, C3-M2, O1-M2)
- ▶ linkes und rechtes Elektrookulogramm (EOG)
- ▶ Elektromyogramm (EMG), Kinn,
- ▶ EMG, linkes und rechtes Bein,
- ▶ ein Elektrokardiogramm (EKG),

- ▶ Jeweils Atembewegungen des Thorax- und des Abdomens mittels Induktionsplethysmographie (RIP),
- ▶ Atemfluss mittels nasaler Staudruckkanüle,
- ▶ Sauerstoffsättigung des arteriellen Blutes mittels Pulsoxymetrie,
- ▶ Schnarchen mit Kehlkopfmikrofon,
- ▶ Körperposition (links, rechts, Bauch, Rücken, aufrecht) mittels 3D-Lagesensor.

Vor dem Ausschalten des Lichts wurde eine Biokalibrierung zur Signalvalidierung durchgeführt (Augenbewegung, Zähneknirschen, Atmung, Schnarchen, Beinbewegung).

2.4.2 Auswerteparameter der Polysomnographie

Die computergestützte manuell-visuelle Bestimmung der Schlafstruktur einschließlich Bestimmung der Arousal wurde durch eine Schlafexpertin (Somnologin) nach den Richtlinien der AASM (Berry et al., 2020) durchgeführt.

Es wurden daraus folgende Parameter bestimmt:

- ▶ Zeit im Bett (*time in bed*, TIB): Die TIB ist die zum Schlafen zur Verfügung stehende Zeitspanne zwischen dem Ausschalten des Lichts am Abend und dem Einschalten des Lichts am Morgen (zeitliche Auflösung: 0,5 Minuten).
- ▶ Gesamtschlafzeit (*total sleep time*, TST): TST ist die summierte Zeit, die schlafend in einem der Schlafstadien N1, N2, N3 oder R innerhalb der TIB verbracht wird (zeitliche Auflösung: 0,5 Minuten).
- ▶ Schlaffeffizienz (*sleep efficiency*, SE): Die SE ist das Ergebnis aus $[(TST / TIB) * 100\%]$.
- ▶ Einschlaflatenz (*sleep onset latency*, SOL): SOL ist die Zeitspanne zwischen dem Ausschalten des Lichts und dem ersten Auftreten eines Schlafstadiums (zeitliche Auflösung: 0,5 Minuten).
- ▶ Die Summe der in den einzelnen Schlafstadien (N1, N2, N3, R) und Wach verbrachten Zeit (zeitliche Auflösung 0,5 Minuten); darüber hinaus als Prozentangabe bezogen auf die TIB
 - N1 und N2, diese bezeichnen *Non-Rapid-Eye-Movement* (Nicht-REM) Leichtschlafstadien.
 - N3 bezeichnet Nicht-REM-Tiefschlafstadien.
 - REM bezeichnet *Rapid-Eye-Movement* (REM)-Schlafstadien.
- ▶ Die Anzahl der durch eine zentralnervöse Aktivierung bedingten kurzfristigen EEG-Frequenzbeschleunigungen (Arousal) (Berry et al. 2020). Arousals wurden als lärmassoziiert definiert, wenn sie innerhalb eines Zeitfensters von 90 Sekunden nach dem Lärmereignis auftreten (Geräusche, die aus verschiedenen Betriebszuständen, tonalen Komponenten oder kurzen Impulsgeräuschen der AHP resultieren).
- ▶ Häufigkeit von Mustern gestörter Atmung
- ▶ Herzfrequenz
- ▶ Körperlage im Schlaf

- ▶ Schnarchen
- ▶ Beinbewegungen
- ▶ Sauerstoffsättigungszustand

2.4.3 Fragebögen in der Schlafstudie

Die folgenden standardisierten Fragebögen wurden am Abend vor dem Schlafengehen ausgefüllt (Skalen siehe Anhang 0):

- ▶ Karolinska Schläfrigkeits-Skala (KSS) (Akerstedt & Gilberg, 1990),
- ▶ Aktuelle Stimmungs-Skala (ASTS) (Dalbert, 1992)

Die folgenden standardisierten Fragebögen wurden am Morgen nach dem Schlafen ausgeteilt:

- ▶ KSS (Akerstedt & Gilberg, 1990),
- ▶ ASTS (Dalbert, 1992)
- ▶ Schlafragebogen A (SF-A) (Görtelmeyer, 1981)
- ▶ Morgenbefragung „Klima“, Seite 1

2.4.4 Fragebögen der Tagesstudie

Der in der Tagesstudie eingesetzte Fragebogen wurde aus Fragebögen zusammengestellt, die die Autor*innen bereits in anderen Studien erfolgreich eingesetzt haben (siehe Anhang A.379).

Die Wahrnehmung der dargebotenen Geräusche wurde anhand von Fragen bewertet, ob und wie die Versuchspersonen Geräuschkategorien wahrnehmen. Bei den Fragen handelt es sich um Adaptionen von Items, die in Studien zur Wirkung von Infraschall (Krahé et al. 2020), Schießlärm (Schreckenberg & Großarth 2021) und Windkraftanlagenlärm (Schmitter et al. 2022) verwendet wurden. Die Wahrnehmung von Geräuschmerkmalen in der Lärmbedingung wurde mit 23 Items, adaptiert von Feldmann und Carolus (2019), erfasst.

Textverständnis, Wahrnehmung und Motivation wurden mit Fragen bewertet, die aus einer Studie zur Bewertung von Umweltinformationen aus kognitionspsychologischer Sicht übernommen wurden (Schreckenberg et al. im Druck). Die Stimmung wurde anhand von Items bewertet, die aus der Studie von Krahé et al. (2020) über die Auswirkungen von Infraschall übernommen wurden.

Zur Kontrolle von Effekten, die sich aus der Wohnsituation der Versuchspersonen ergeben, wurden Fragen zur Wohnsituation in Bezug auf Gebäudetyp, Fenstertyp, Lüftungsverhalten, Schlafqualität und den Einfluss der Covid-19-Pandemie beantwortet.

2.5 Beschreibung der Stichprobe

Die erste Rekrutierung erfolgte im September 2020 und die Studie endete im November 2021. 42 Versuchspersonen wurden in die Studie aufgenommen. Nach den ersten polysomnographischen Messungen (PSG) brachen zwei Versuchspersonen die Teilnahme an der Studie aus persönlichen Gründen ab. 40 Versuchspersonen schlossen die zwei Laborstudien ab,

d. h. sie nahmen sowohl an der Tagesstudie als auch an der Schlafstudie teil. Die Stichprobenmerkmale dieser 40 Versuchspersonen sind:

- ▶ Geschlecht: 21 weiblich; 19 männlich
- ▶ Alter (Mittelwert M , Standardabweichung SD): $37,5 \pm 14,5$ Jahre
- ▶ Body-Mass-Index (BMI) (M, SD): $24,1 \pm 3,8 \text{ kg/m}^2$
- ▶ ESS (M, SD): $5,4 \pm 2,7$
- ▶ ISI (M, SD): $3,8 \pm 2,5$
- ▶ PSQI (M, SD): $5,2 \pm 3,9$
- ▶ Lärmempfindlichkeit (M, SD): $3,2 \pm 1,2$
- ▶ Empfindlichkeit gegenüber Umweltbelastungen (Summenwert; M, SD): $6,8 \pm 2,7$

Es gab keine Unterschiede zwischen Männern und Frauen in Bezug auf die Skalen ISI, ESS, PSQI und Lärmempfindlichkeit. Die Werte weisen darauf hin, dass die allgemeine Schlafqualität und die Lärmempfindlichkeit in einem normalen, nicht pathologischen Bereich liegen. Bei allen Versuchspersonen wurde mittels Audiometrie das Hörvermögen erfasst (Anhang A.4). Nach Kriterien der WHO (WHO, 1991) kann allen Versuchspersonen eine normale Hörfähigkeit attestiert werden.

2.6 Akustische Stimuli

Ziel der durchgeführten Studie war es, die Auswirkungen der Geräusche von Klimageräten und LWP auf den Schlaf zu untersuchen. Beide Geräte werden häufig in der sogenannten Splitaufstellung verbaut, d.h. sie bestehen aus einer Inneneinheit (meist im Keller) und einer Außeneinheit, die meist der Auslöser für Lärmkonflikte mit der Nachbarschaft sind. In den letzten Jahren werden vermehrt LWP in privaten Wohnhaushalten verbaut, während Klimageräte in Wohngebieten vergleichsweise selten anzutreffen sind. Daher wurde der Fokus für die Auswahl der akustischen Stimuli für die Laboruntersuchung auf die Geräusche von LWP gelegt. Die Geräuschemissionen von Außeneinheiten von Klimageräten und LWP sind recht ähnlich, da auch die wesentlichen Anlagen ähnlich aufgebaut sind (insbesondere Lüfter, Kompressor, Kondensator). Es ist daher zu erwarten, dass die im Rahmen der Studie gemessenen Effekte auch auf Klimageräte übertragbar sind.

Die von LWP abgestrahlten Geräusche setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: Während im Dauerbetrieb ein rauschhaftes Geräusch im Vordergrund steht, können insbesondere bei Lastwechseln oder beim An-/Abschalten des Geräts auch tonale oder impulshaltige Geräusche auftreten. Die Häufigkeit, mit der diese zusätzlichen Geräuschkomponenten vorkommen, ist je nach Gerätetyp, Witterung usw. unterschiedlich.

Die Stimuli für die Studien wurden aus Messungen an verschiedenen LWP im Realumfeld generiert. Aus den aufgezeichneten Geräten wurde eine möglichst repräsentative LWP ausgewählt. Aus dem gewonnenen Audiomaterial der ausgewählten Anlage wurden anschließend zwei Geräuschszenarien zusammengestellt: Eines für die Darbietung in der Schlafstudie und eines für die Tagesstudie. Das Vorgehen bei der Generierung der Stimuli ist in den Anhängen A.5, A.6, A.7 und A.8 näher erläutert.

2.6.1 Geräuschszenarien

Ein durchschnittlicher Schlafzyklus ist ca. 90 - 110 Minuten lang (Penzel 2007). Daher sollte das Geräuschszenario für die Schlafstudie insgesamt eine Dauer von einer Stunde umfassen. Dies fördert das Auftreten verschiedener Betriebszustände in verschiedenen Schlafphasen, um deren mögliche störende Auswirkungen zu untersuchen. Die Lärmpegel wurden entsprechend dem realistischen Betrieb gewählt. Unterschiedliche Lärmpegel ergeben sich aus den verschiedenen Betriebszuständen und simulierten Fensterpositionen (gekippt und geschlossen). Für die Tagesuntersuchung wurde zudem ein kürzerer Zusammenschnitt von ca. 15 min Länge erstellt.

Um ein möglichst realitätsnahes Geräuschszenario zu entwickeln, wurden dazu die verschiedenen Betriebszustände während des Betriebs kombiniert, ohne synthetische Geräusche zu verwenden. Gleichzeitig soll der zeitliche Ablauf der Geräuschszenarien es ermöglichen, während der Untersuchungsächte einen möglichen Einfluss auf die Schlafqualität zu ermitteln.

Neben der Geräuschabstrahlung der LWP hängt die Geräuschsituation im Schlafräum maßgeblich von der Fensterstellung ab: Während geschlossene Fenster eine Schalldämmung im Bereich zwischen 25 und >50 dB aufweisen können, liegt die Schalldämmung von (teil-) geöffneten Fenstern in Kippstellung nur bei ca. 12-15 dB. Da im Alltag beide Varianten verbreitet sind, wurden in den Untersuchungsächten beide Konditionen berücksichtigt. Zum Vergleich erfolgte als dritte Bedingung „Ruhe“, ohne die Einspielung von Geräuschen. Die Umsetzung der Außen-Innen-Übertragung in den verschiedenen Bedingungen wird in Anhang A.8 näher erläutert. Für die Tagesuntersuchung wurde auf die Kondition „geschlossenes Fenster“ verzichtet.

2.6.1.1 Schlafstudie

Das Geräuschszenario für die Schlafstudie sollte neben den Geräuschen der LWP auch Ruhezeiträume enthalten. Bei den Geräuschen des Ein-/Aus- bzw. Umschaltens handelt es sich um kurzzeitige Geräuschereignisse, die nur wenige Sekunden dauern. In der Zeit zwischen den Schaltmomenten fügen sich die Geräusche des Dauerbetriebs ein.

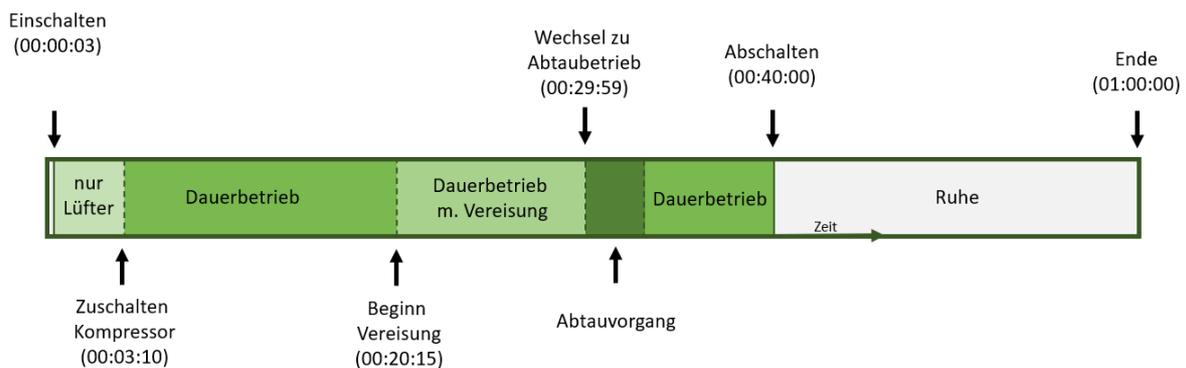
Der zeitliche Ablauf der Geräuschszenarien sollte es ermöglichen, während der Untersuchungsächte einen möglichen Einfluss auf die Schlafqualität zu ermitteln. Deshalb wurde aus den verschiedenen Betriebszuständen und Einzelereignissen ein Szenario entwickelt. Es setzt sich aus den unterschiedlichen Geräuschkomponenten (An-/Abschalten, Dauerbetrieb, Abtauvorgang usw.) zusammen und wurde in einer Untersuchungsnacht mehrfach dargeboten.

Für die Auswertung der Untersuchungsergebnisse sind insbesondere die Einzelereignisse relevant, da gerade bei Veränderungen der Geräuschsituation (z.B. Wechsel von Ruhe zu Geräusch) Aufwachreaktionen zu erwarten waren. Durch die Länge von einer Stunde und die mehrmalige Wiederholung des Szenarios in der Untersuchungsnacht wurde sichergestellt, dass jedes enthaltene Einzelereignis jeder Versuchsperson mehrmals präsentiert wurde. Auf diese Weise erhöhte sich die Anzahl der Ereignisse, die für die spätere Auswertung herangezogen werden konnten.

Gleichzeitig sollte durch die Dauer von einer Stunde verhindert werden, dass eine Synchronisierung zwischen Geräuschszenario und Schlafzyklus (Dauer eines typischen Schlafzyklus ~90 min) der Versuchsperson stattfand. Dadurch wurde verhindert, dass ein Betriebszustand von LWP immer wieder in der gleichen Schlafphase präsentiert wurde. Dieser Ansatz ermöglichte es, Informationen über die Auswirkungen (z.B. Aufwachreaktionen) jedes LWP-Betriebszustandes in verschiedenen Schlafphasen zu sammeln. Das Geräuschszenario in den Bedingungen „geschlossenes Fenster“ bzw. „gekipptes Fenster“ wies einen identischen

Zeitverlauf auf. In der vergleichenden Ruhenacht wurde kein Geräusch dargeboten. Die wesentlichen enthaltenen Betriebszustände waren die des Ein- und Ausschaltens, das Umschalten in einen anderen Lastzustand sowie der Dauerbetrieb. Ein Abtauvorgang konnte nicht aufgezeichnet werden und wurde daher durch spektrale Filterung und Anpassungen im Pegel-Zeit-Verlauf während der vorhergehenden Vereisung der Anlage simuliert. Als Quelle für die Geräuscheigenschaften von Luft-Wasser-Wärmepumpen während des Vereisungs- bzw. Abtauvorgangs wurde neben Erfahrungswerten im Wesentlichen auf eine frühere Untersuchung Bezug genommen (Schulze et al, 2014). In der Zeit zwischen den Schaltmomenten fügten sich die Geräusche des Dauerbetriebs ein. Das Geräusch fuhr dabei unterschiedlich schnell in den jeweiligen Betriebszustand hoch. Abbildung 3 zeigt den schematischen Verlauf des Geräuschszenarios für die Schlafstudie als Zeitstrahl für einen Durchgang von einer Stunde.

Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Geräuschszenarios für die Untersuchungsächte

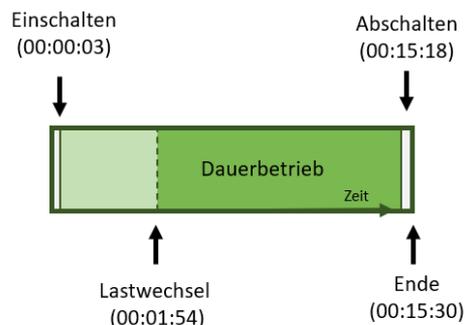


Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

2.6.1.2 Tagesstudie

Für die Tagesuntersuchung wurde eine Kurzfassung des Geräuschszenarios mit einer Dauer von ca. 15 min erstellt. Darin waren ebenfalls die wesentlichen Betriebszustände enthalten, die auch im Geräuschszenario für die Schlafstudie vorkamen. Allerdings wurde der stationäre Dauerbetrieb verkürzt. Zudem wurde auf die Vereisung mit anschließendem Abtaubetrieb verzichtet. Abbildung 4 stellt den zeitlichen Verlauf des 15-minütigen Stimulus schematisch dar.

Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Geräuschszenarios für die Tagesuntersuchung



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

2.6.2 Wahl der Wiedergabepegel

Als Auslegungsziel für die Wahl der Wiedergabepegel in der Studie diente die höchste in Deutschland rechtlich zulässige Geräuschimmission. Für Geräuschimmissionen von technischen

Anlagen ist die technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) einschlägig. Die TA Lärm gibt Immissionsrichtwerte an, die je nach Gebietstyp (z.B. reines oder allgemeines Wohngebiet) einzuhalten sind. Maßgebend für die Beurteilung während der Nacht ist demnach die volle Nachtstunde mit dem höchsten Beurteilungspegel, zu dem die zu beurteilende Anlage relevant beiträgt (sog. lauteste Nachtstunde). Bei der Ermittlung des Beurteilungspegels sind Zeitkorrekturen und etwaige Zuschläge für Lästigkeit und Ton-/Informationshaltigkeit zu berücksichtigen.

In Kern-, Dorf-, Mischgebieten und in urbanen Gebieten ist gemäß TA Lärm für die lauteste Nachtstunde (inkl. aller Zuschläge) ein Beurteilungspegel von 45 dB(A) – außen 0,5 Meter vor dem Fenster – einzuhalten. In Wohngebieten gelten hingegen geringere Immissionsrichtwerte. Auf diese Weise wurde bei der Darbietung der Geräuschkategorien eine Worst-Case-Situation abgebildet.

Die Geräuschkategorien in beiden Studien erfolgte über Lautsprecher, die im Untersuchungsraum aufgestellt wurden, weshalb die Lärmsituation im Innenraum simuliert werden musste. Zu diesem Zweck wurde zunächst der Mittelungspegel des einstündigen Geräuschkategorien (inklusive aller Ruhezeiträume) als Taktmaximal-Mittelungspegel L_{AFTeq} des noch ungefilterten Signals auf 45 dB(A) in ca. 0,5 Meter Entfernung zum Lautsprecher eingestellt, um die Geräuschkategorien einer möglichen ungünstigsten vollen Nachtstunde „vor dem (simulierten) Fenster“ abzubilden. Anschließend wurde das Geräusch spektral gefiltert, um den Übergang durch das geschlossene bzw. gekippte Fenster zu simulieren.

Der Messaufbau und die Durchführung, also die Auswahl der Räumlichkeiten auf Basis von akustischen Kriterien, die Geräuschkategorien in den Untersuchungsräumen sowie die akustische Qualitätssicherung ist in A.9 erläutert. Die Messergebnisse finden sich in Anhang A.10. Weiterhin ist die Einrichtung der Untersuchungszimmer in Anhang 0 dargestellt. Die spektralen Eigenschaften der Lautsprecherabdeckungen zeigt Anhang A.12.

2.7 Statistische Auswertung

Für die deskriptive Darstellung der ausgewerteten Schlafparameter und Fragebogenitems (Fragen) wurden deskriptive Statistiken in Form von Häufigkeiten, Mittelwerten, Standardabweichung und Standardfehler berechnet.

Statistische Analysen testen auf signifikante Unterschiede (z.B. zwischen Lärmbedingungen) oder Zusammenhänge (z.B. zwischen physiologisch gemessenen und selbstberichteten Schlafqualitätsparametern). Bei Signifikanztests wird dabei der p -Wert herangezogen. Diese Größe gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die untersuchten Unterschiede bzw. Zusammenhänge durch Zufall zustande gekommen sind. Die Prüfung erfolgt gegen ein vorher festgelegtes α -Niveau (Signifikanzniveau). In den vorliegenden Analysen wurde α von 5% zugrunde gelegt. Das bedeutet: Bei einem Ergebnis, das einen p -Wert unter $p < 0,05$ hat, wird angenommen, dass die untersuchten Unterschiede mit 95% Wahrscheinlichkeit nicht auf Zufall beruhen (Fisher, 1956). Werte von $p < 0,05$ werden damit als Hinweis auf eine statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen den Bedingungen betrachtet.

Zur Untersuchung etwaiger Unterschiede in den Schlafparametern zwischen den Versuchsnächten wurde der Friedman-Test verwendet. Dieses Verfahren, welches keine bestimmten statistischen Verteilungen der Stichproben voraussetzt (nicht-parametrisches Verfahren), wird zum Vergleich von mehr als zwei abhängigen bzw. verbundenen Stichproben eingesetzt. Im vorliegenden Fall bedeutet das, dass die Versuchspersonen drei Versuchsbedingungen durchlaufen haben, deren Ergebnisse miteinander verglichen wurden. Zusammenhänge zwischen Variablen wurden mit der Produkt-Moment-Korrelation von Pearson

untersucht. Das Korrelationsmaß r kann einen Wert zwischen +1 und -1 annehmen. Je näher der Wert am Betrag von 1 liegt, desto höher ist der positive (Richtung +1) bzw. negative (Richtung -1) Zusammenhang. Ein positiver Zusammenhang bedeutet, dass bei steigendem Wert von Variable 1 auch der Wert von Variable 2 steigt. Umgekehrt bedeutet ein negativer Zusammenhang, dass mit ansteigendem Wert von Variable 1 der Wert von Variable 2 sinkt. Kein Zusammenhang zeigt sich, wenn der Korrelationswert bei oder nahe 0 liegt. Aus dem Korrelationswert ist keine Kausalität ableitbar. Dies bedeutet, dass eine signifikante Korrelation einen vorhandenen Zusammenhang zwischen zwei Variablen aufzeigt, sie lässt jedoch nicht darauf schließen, wie sich die beiden Variablen gegenseitig beeinflussen, d. h. was Ursache und was Folge ist.

Mit den Daten der Tagesuntersuchung wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt, um zu prüfen, ob aus einzelnen Items, denen zusammen ein oder mehrere latente Konzepte (Dimensionen) unterliegen, zusammenfassende Faktoren gebildet werden konnten. Es wurden nur Faktoren mit Eigenwerten ≥ 1 berücksichtigt (Guttman 1954; Kaiser 1960). Im Ergebnis konnten zwei Faktoren gebildet werden. Die beiden Faktoren wurden anhand von Faktorladung, Gemeinsamkeit und Eigenwert bestimmt (siehe Anhang A.13). Diejenigen Items wurden zu einem latenten Konzept (Mittelwert der Item-Bewertungen) zusammengefasst, die in beiden Versuchsbedingungen (Baseline und Geräuschbedingung) eindeutig hoch auf einem Faktor (Faktorladungen $\geq 0,4$) und niedrig auf allen anderen Faktoren (Faktorladungen $< 0,4$) laden. Die sich daraus ergebenden Faktoren waren „Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text“ und „Stimmung“.

Kovarianzanalysen wurden durchgeführt, um zu untersuchen, ob es Unterschiede zwischen den Studienbedingungen Baseline- und Lärmbedingung in der Tagesstudie unter Einbezug (Kontrolle) der Kovariaten Lärmempfindlichkeit, Alter, Geschlecht und Reihenfolge der Präsentation der Bedingungen gab. Kovarianzanalysen wurden für mögliche Unterschiede bei der Lärmbelastigung, Schwierigkeiten mit dem Text, Stimmung sowie den Vitalwerten systolischer und diastolischer Blutdruck sowie Herzfrequenz durchgeführt. Für Versuchspersonen, die angaben, unter keiner der beiden Bedingungen ein Geräusch zu hören, wurden die Lärmbelastigungswerte auf 1 = *überhaupt nicht belästigt* gesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Die Wirkung von Luftwärmepumpengeräuschen in der Nacht

3.1.1 Zwischengruppenvergleiche zwischen den Untersuchungs Nächten

Es wurde kein Einfluss der Reihenfolge von Lärmbedingung 1 (Ruhe-Nacht), Lärmbedingung 2 (Expositions-Nacht, Fenster gekippt) und Lärmbedingung 3 (Expositions-Nacht, Fenster geschlossen) beobachtet.

Der Friedman-Test stellte keine Unterschiede zwischen den Bedingungen 1, 2 und 3 für die Schlafvariablen SOL, TST, SE, REM-Latenz, N3-Latenz, N1, N2, N3, REM, Anzahl der Arousal und Arousal-Index fest. Tabelle 3 zeigt die deskriptiven Statistiken (Mittelwert $M \pm$ Standardabweichung SD) für die Schlafvariablen und die p -Werte.

Tabelle 3: Schlafvariablen (Mittelwert $M \pm$ Standardabweichung SD) nach Lärmbedingungen und Friedman-Test p -Werte

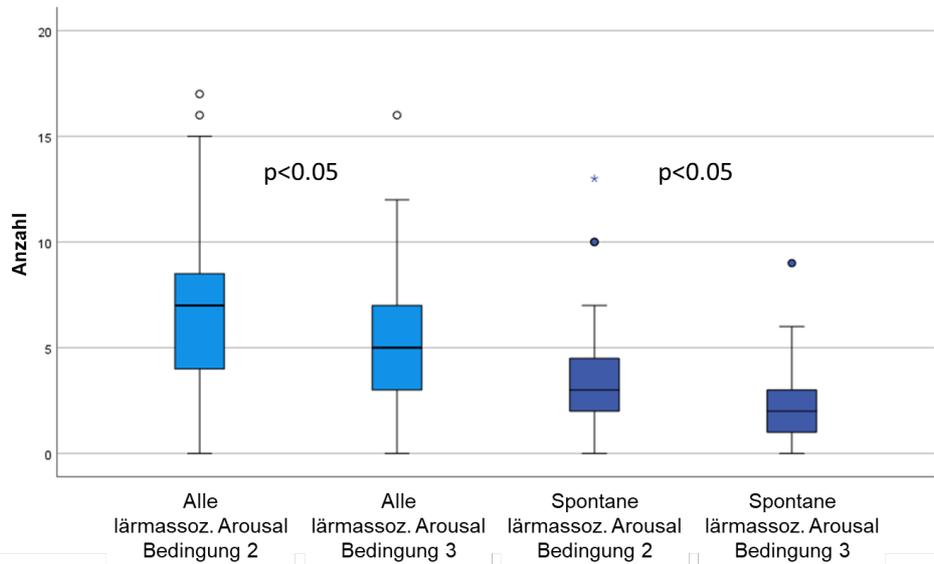
Schlafvariablen	Lärmbedingung 1 (Baseline)	Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt)	Lärmbedingung 3 (Fenster geschlossen)	p Wert
	$M \pm SD$	$M \pm SD$	$M \pm SD$	
SOL (min)	18,7 \pm 18,0	20,4 \pm 18,6	19,2 \pm 15,1	0,63
TST (min)	398,8 \pm 57,8	390,9 \pm 54,6	398,7 \pm 50,8	0,41
SE (%)	83,1 \pm 12,1	81,5 \pm 11,4	83,1 \pm 10,6	0,33
REM Latenz (min)	126,4 \pm 74,3	132,2 \pm 67,8	111,1 \pm 65,9	0,13
N3 Latenz (min)	50,4 \pm 46,8	46,4 \pm 27,7	46,5 \pm 34,2	0,94
N1 (% TST)	12,0 \pm 5,6	12,1 \pm 5,2	11,3 \pm 5,5	0,13
N2 (% TST)	53,0 \pm 8,0	53,2 \pm 8,1	53,5 \pm 8,3	0,97
N3 (% TST)	18,0 \pm 7,7	17,9 \pm 7,3	17,5 \pm 7,7	0,65
REM (% TST)	17,1 \pm 5,3	16,66 \pm 4,9	17,6 \pm 5,5	0,50
# der Arousal	44,8 \pm 20,8	48,3 \pm 22,2	45,3 \pm 21,4	0,69
Arousal index (1 / h)	6,7 \pm 3,3	7,5 \pm 3,6	6,8 \pm 3,4	0,42

Anmerkung. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p = Signifikanzniveau, min = Minute, TST = Gesamtschlafzeit (*total sleep time*), REM = Rapid eye movement.

3.1.2 Vergleich Anzahl lärmassoziierter Arousals zwischen den Lärmbedingungen

Beim Vergleich der beiden Lärmbedingungen 2 und 3 mit unterschiedlichen Lärmpegeln während des Schlafs wurde festgestellt, dass unter der Bedingung „Fenster gekippt“ (Lärmexposition 2) eine höhere Gesamtzahl von Arousals (Summe aus spontanen, respiratorischen und motorischen Arousals) in Verbindung mit Lärmereignissen auftrat als unter der Bedingung „Fenster geschlossen“ (Lärmexposition 3, $p < 0,05$). Das Gleiche galt für die Anzahl der spontanen Arousals in Verbindung mit Lärmereignissen ($p < 0,05$, Abbildung 5).

Abbildung 5: Arousals im Zusammenhang mit Lärmereignissen (lärmassoziierte Arousal) für Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) und Bedingung 3 (Fenster geschlossen)



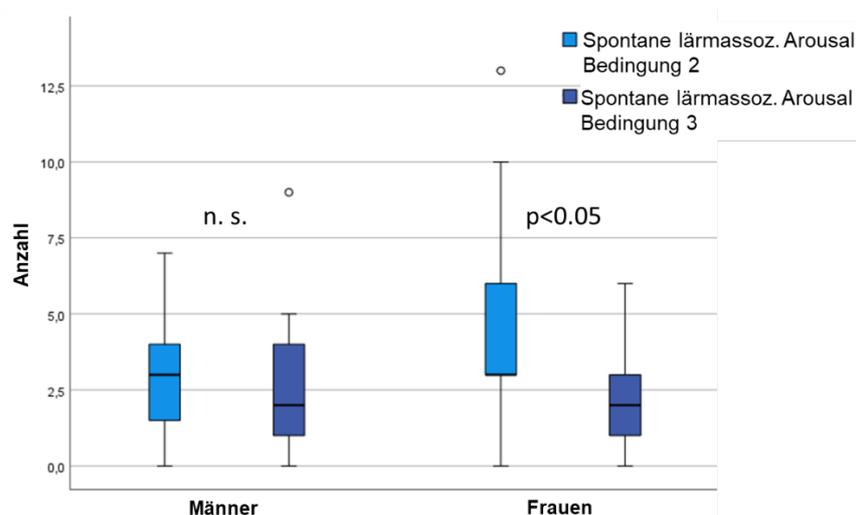
Anmerkung. p = Signifikanzniveau.

Quelle: eigene Darstellung, ASR.

Im Gegensatz dazu unterschied sich die Anzahl der mit Lärmereignissen verbundenen Wechsel von einem beliebigen Schlafstadium zum Stadium Wach nicht zwischen Lärmbedingung 2 und Lärmbedingung 3 ($3,9 \pm 2,2$ und $3,7 \pm 2,5$).

Der Unterschied in der Anzahl der spontanen Arousals in Verbindung mit Lärm zwischen Lärmbedingung 2 und Lärmbedingung 3 war geschlechtsspezifisch, was auf eine Interaktion zwischen den Faktoren Geschlecht und Lärmbedingung hindeutet: Männer zeigten niedrigere Mittelwerte für Lärmbedingung 3, jedoch ohne Signifikanz, während bei Frauen eine signifikante Veränderung beobachtet wurde ($p < 0,05$, Abbildung 6).

Abbildung 6: Spontane Arousals im Zusammenhang mit Lärmereignissen (lärmassoziierte Arousal), getrennt für Männer und Frauen, für die Lärmbedingung (Fenster gekippt) 2 und Bedingung 3 (Fenster geschlossen)



Anmerkung. p = Signifikanzniveau, n.s.= nicht signifikant.

Quelle: eigene Darstellung, ASR.

Im Vergleich der drei Altersgruppen (18 - 34 Jahre, 35 - 50 Jahre, 51 - 65 Jahre) gab es keinen Unterschied in der Anzahl der spontanen lärmassoziierten Arousals. Dieser Befund galt sowohl für Lärmbedingung 2 als auch für Lärmbedingung 3.

Die Pearson-Korrelation der Anzahl der spontanen lärmassoziierten Arousals ergab:

- ▶ weniger Arousals mit zunehmendem Alter ($r = -0,37, p < 0,05$),
- ▶ mehr Arousals bei höheren Tagesschläfrigkeitwerten (ESS, $r = 0,32, p < 0,05$),
- ▶ mehr Arousals mit einer höheren Anzahl von Wechslen von einem beliebigen Schlafstadium zum Wachstadium (W, $r = 0,32, p < 0,05$).

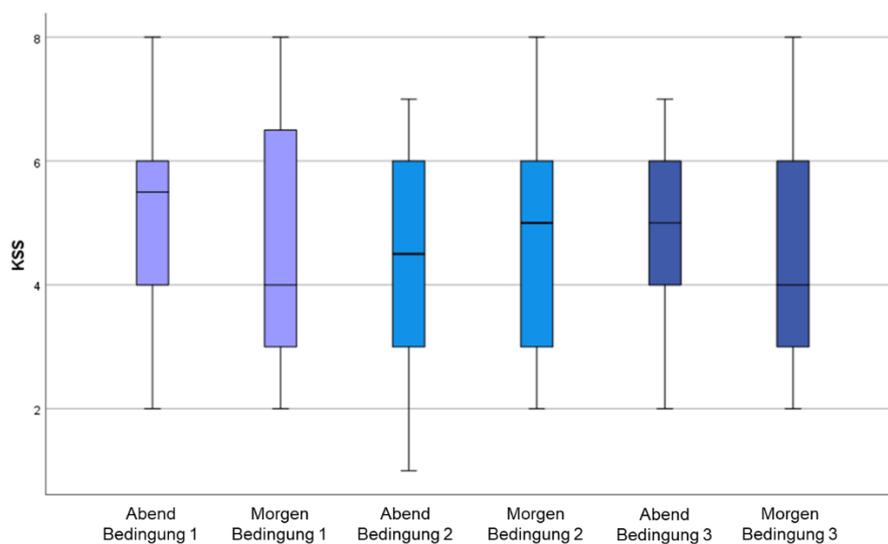
3.1.3 Auswertung der Fragebögen zum Schlaf

3.1.3.1 Schläfrigkeit und Schlafqualität

Hinsichtlich der Selbsteinschätzung der Schläfrigkeit am Morgen nach dem PSG wurden für die KSS keine Unterschiede zwischen Bedingung 1 ($4,6 \pm 1,9$), Bedingung 2 ($4,6 \pm 1,9$) und Bedingung 3 ($4,4 \pm 1,9$) nachgewiesen. Die selbstberichtete Schläfrigkeit zwischen dem Morgen nach dem Schlafen und dem Abend vor dem Schlafengehen war in der Lärmbedingung 1 geringer (KSS: -0,59), in der Lärmbedingung 2 größer (KSS: 0,23) und in der Lärmbedingung 3 geringer (KSS: 0,62) (Abbildung 7).

Es gab keine Unterschiede zwischen Frauen und Männern hinsichtlich der KSS-Werte.

Abbildung 7: Werte der Karolinska-Schläfrigkeitsskala (KSS) vor dem Schlaf (Abend) und nach dem Schlaf (Morgen) für die Lärmexpositionsbedingung 1 (Ruhennacht), Bedingung 2 (Fenster gekippt), und Bedingung 3 (Fenster geschlossen).

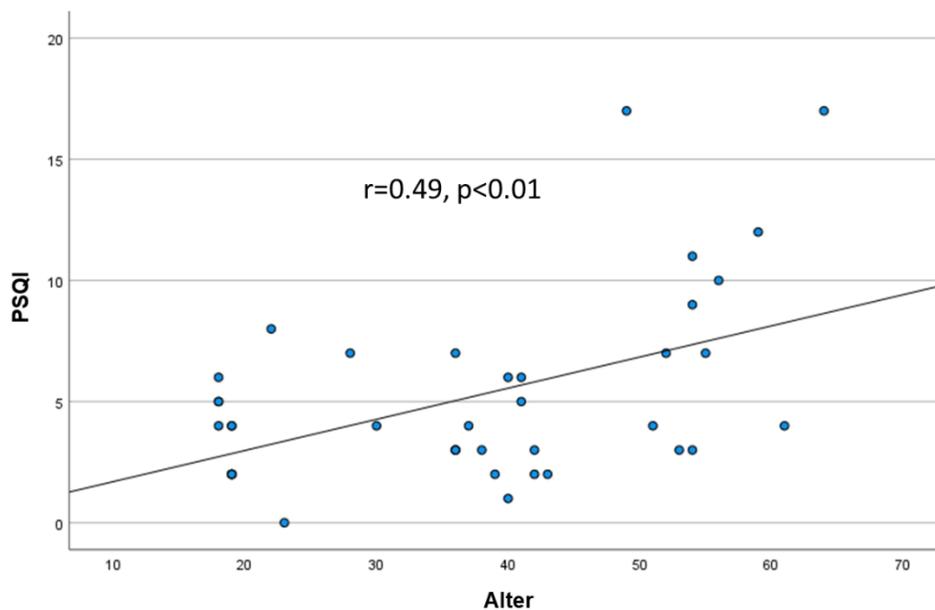


Quelle: eigene Darstellung, ASR.

Folgende Zusammenhänge (Korrelationen) waren signifikant: Eine verringerte Schlafqualität (höherer PSQI) war assoziiert mit höherem Alter ($r = 0,49, p < 0,01$, Abbildung 8) und die Pearson-Korrelation des Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) ergab:

- ▶ niedrigere Werte bei höherer subjektiver Lärmempfindlichkeit ($r = 0,38, p < 0,05$),
- ▶ niedrigere Werte bei längerer Dauer bis zum Erreichen des Tiefschlafs nach „Licht aus“ (N3-Latenz, $r = 0,43, p < 0,01$).

Abbildung 8: Korrelation von Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI) mit dem Alter



Anmerkung. r = Korrelationskoeffizient, p = Signifikanzniveau.

Quelle: eigene Darstellung, ASR.

3.1.3.1 Selbstberichtete Schlafstörungen

Im morgendlichen Fragebogen wurden die Versuchspersonen gebeten, Schlafstörungen aus der vorangegangenen Nacht anzugeben. Tabelle 4 zeigt signifikante Unterschiede bei den selbstberichteten Schlafstörungen beim Einschlafen (Friedman Chi-Quadrat (2) = 18,3, $p < 0,001$, $n=38$), beim Schlaf während der Nacht (Friedman Chi-Quadrat (2) = 23,8, $p < 0,001$, $n=37$) und beim Ausschlafen (Friedman Chi-Quadrat (2) = 10,8, $p < 0,01$, $n=38$).

Tabelle 4: Schlafstörungsvariablen nach Lärmbedingungen und Friedman-Test p-Werte

Schlafstörungsvariable n	Lärmbedingung 1 (Baseline)	Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt)	Lärmbedingung 3 (Fenster geschlossen)	p Wert
	$M \pm SD$	$M \pm SD$	$M \pm SD$	
Störung beim Einschlafen	1,7 ± 1,1	2,8 ± 1,2	1,7 ± 0,8	< 0,001
Störung beim Durchschlafen	1,4 ± 0,7	2,6 ± 1,2	1,6 ± 0,9	< 0,001
Störung beim Ausschlafen	1,4 ± 0,7	2,2 ± 1,1	1,8 ± 1,1	< 0,01

Anmerkung. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p = Signifikanzniveau.

Post-hoc-Tests zeigten signifikante Unterschiede bei den Einschlafstörungen zwischen der Lärmbedingung 1 (Basisnacht) und der Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) ($z = -0,76$, $p_{\text{adjusted}} = 0,003$, Effektgröße nach Cohen (1988): $r = 0,12$). Zusätzlich wurden Unterschiede zwischen Bedingung 3 (Fenster geschlossen) und Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) beobachtet ($z = 0,70$, $p_{\text{adjusted}} = 0,007$, Effektgröße nach Cohen (1988): $r = 0,11$). In der Lärmbedingung 2 mit

simuliertem gekipptem Fenster waren die Einschlafschwierigkeiten im Vergleich zu den anderen Bedingungen am höchsten.

Was den Nachtschlaf betrifft, so ergaben Post-hoc-Tests signifikant höhere Schlafstörungen während der Nacht in der Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) im Vergleich zur Baselinebedingung (z=-0,87, $p_{\text{adjusted}} = 0,001$, Effektgröße nach Cohen (1988): $r = 0,14$). Dasselbe wurde für die Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) im Vergleich zur Lärmbedingung 3 (Fenster geschlossen) festgestellt (z=0,68, $p_{\text{adjusted}} = 0,011$, Effektgröße nach Cohen (1988): $r = 0,11$).

Darüber hinaus wurden signifikante Unterschiede in den Störungen beim Einschlafen zwischen der Baselinebedingung und der Lärmbedingung 2 (Fenster gekippt) gefunden (z=-0,59, $p_{\text{adjusted}} = 0,030$, Effektgröße nach Cohen (1988): $r = 0,1$), die zeigen, dass die durchschnittliche Schlafstörung beim Einschlafen bei simulierten gekippten Fenstern am höchsten war. Alle Effektstärken wurden als schwach eingestuft (Cohen, 1988, S. 79-81).

3.2 Die Wirkung von Luftwärmepumpengeräuschen bei Tag

An der Tagesstudie nahmen mit den 40 Personen dieselbe Stichprobe teil, die auch an der Schlafstudie teilnahm. Die Zuteilung zu den beiden Optionen für die Reihenfolge der Bedingungen war gleichmäßig auf zwei Gruppen verteilt: 19 Versuchspersonen waren zuerst in der Baselinebedingung und danach in der Geräuschbedingung und 21 Versuchspersonen in der umgekehrten Reihenfolge.

3.2.1 Wahrnehmung von Lärm in den beiden Studienbedingungen und die Auswirkungen auf die selbst eingeschätzte Leseleistung

In der Baselinebedingung, in der kein Lärm präsentiert wurde, gaben nur wenige Personen an, während der Aufgabe Geräusche wahrzunehmen (Tabelle 5). In der Geräuschbedingung gaben 33 Personen an, Lärm wahrzunehmen, entweder mit den Ohren oder mit anderen Sinnen.

Gefragt nach der Art der Geräusche, die die Versuchspersonen während der Bedingung hörten, beschrieben die Versuchspersonen, die angaben, Geräusche wahrzunehmen, hauptsächlich Geräusche, die unabhängig von der Umgebung auftraten, wie z. B. Piepsgeräusche oder Geräusche von der Straße (Tabelle 6). In der Lärmbedingung nannten Versuchspersonen vor allem Geräusche im Zusammenhang mit Klimaanlage oder Lüftungssystemen, Rauschen, Summen und Brummen.

Versuchspersonen, die angaben, während der Leseaufgabe Geräusche zu hören, beantworteten Fragen dazu, wie sie die Geräusche beim Lesen wahrnahmen (Tabelle 7), z. B. ob sie durch Geräusche beim Lesen gestört wurden. Das heißt, in der Baselinebedingung wurden nur diejenigen gebeten, Störungen anzugeben, die angaben, ein Geräusch zu hören. Die Items zur Bewältigung wurden in der Baselinebedingung höher bewertet als in der Lärmbedingung, z.B. dass die Versuchspersonen besser in der Lage waren, den Lärm auszublenden oder sich vor dem Lärm zu schützen. In der Lärmbedingung wurde die Lärmbelästigung bei den Versuchspersonen höher eingeschätzt, und mehr Versuchspersonen gaben an, dass Lärm das Lesen und die Konzentration negativ beeinflusst als in der Baselinebedingung.

Tabelle 5: Wahrnehmung von Lärm in den beiden Bedingungen der Tagesstudie

	Bedingung	
	Baseline	Geräuschbedingung
Wahrnehmung mit den Ohren		
<i>ja</i>	6	31
<i>nein</i>	34	9
Wahrnehmung mit den Ohren, aber nicht als Geräusch		
<i>ja</i>	0	2
<i>nein</i>	40	38
Wahrnehmung mit anderen Sinnen		
<i>ja</i>	0	1
<i>nein</i>	40	39
Keine Wahrnehmung		
<i>ja</i>	34	7
<i>nein</i>	6	33
Gesamt N	40	40

Anmerkung. N = Anzahl.

Tabelle 6: Beschreibung der Geräuschwahrnehmung während der Untersuchungsbedingungen

Beschreibung von Geräuschen in Baseline Bedingung		Beschreibung von Geräuschen in der Geräuschbedingung	
Nicht durgängiges Summen	1	Rauschen	10
leises Piepen	1	Klimaanlage	6
Möbelrücken, metallisches Geräusch	1	Belüftungssystem	5
Leises Surren	1	Brummen, Summen	4
Straßengeräusche	1	Surren, Zischen	1
Rauschen	1	Rattern	1
		Herumlaufende Menschen	1

Tabelle 7: Durchschnittliche Geräuschwahrnehmung während des Lesens und die Auswirkung auf die selbstberichtete Leseleistung.

	Bedingung	
	Baseline (N=6) <i>M ±SD</i>	Lärmbedingung (N= 33) <i>M ±SD</i>
Das Geräusch im Hintergrund hat mich beim Lesen gestört.	1,5 ±0,84	2,58 ± 1,23
Ich konnte mich wegen des Geräusches im Hintergrund nicht auf den Text konzentrieren.	1,33 ± 0,82	2,18 ±1,18
Das Geräusch im Hintergrund hat mich vom Lesen abgelenkt.	1,33 ± 0,5	2,21 ± 1,17
Ich fühle mich dem Geräusch ausgeliefert.	1 ± 0,0	1,91 ± 1,1
Das Geräusch beunruhigt mich.	1 ± 0,0	1,58 ±0,83
Das Geräusch bereitet mir schlechte Laune.	1 ± 0,0	1,70 ±1,02
Ich kann das Geräusch beim Lesen gut „ausblenden“.	4,0 ±0,63	3,15 ± 1,33
Das Geräusch bereitet mir Unbehagen.	1 ± 0,0	1,58 ± 0,83
Die Störung durch das Geräusch ärgert mich.	1 ± 0,0	1,61 ± 0,9
Ich kann mich vor der Ablenkung durch das Geräusch gut schützen.	4,17 ±0,41	3,18 ± 1,18
Die Ablenkung durch das Geräusch regt mich auf.	1 ± 0,0	1,7 ± 0,98
Ich konzentriere mich auf das Lesen und das Geräusch stört mich dann gar nicht mehr.	3,83 ±1,47	3,12 ± 1,43
Ich habe mich mit dem Geräusch abgefunden.	4,17 ± 1,0	3,39 ± 1,34

Anmerkung. *M* = Mittelwert. *SD* = Standardabweichung.

3.2.2 Lärmbelästigung, Konzentration und Stimmung während der Versuchsbedingungen der Tagesstudie

Tabelle 8 zeigt die durchschnittlichen Bewertungen der einzelnen Items für Lärmbelästigung, Konzentration auf den Text und Stimmung unter zwei Bedingungen in der Tagesstudie. Die Lärmbelästigung war in der Lärmbedingung höher ($M=2,27$, $SD=1,04$) als in der Baselinebedingung ($M=1,5$, $SD=0,84$). Außerdem wurden alle drei Items, die sich auf Schwierigkeiten beim Lesen des Textes bezogen, in der Lärmbedingung höher bewertet als in der Baselinebedingung. Dies lässt auf Auswirkungen des Lärms in der Lärmbedingung auf die Fähigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren, schließen. Bei den Stimmungsisems zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den Bedingungen, die z. B. auf eine nervösere (Lärm: $M= 1,5$,

$SD=0,72$; Ausgangswert: $M=1,3$, $SD=0,46$), weniger entspannte (Lärm: $M= 3,7$, $SD=1,07$; Ausgangswert: $M= 3,95$, $SD=0,82$) und stärker abgelenkte Stimmung (Lärm: $M=1,88$, $SD=0,99$; Ausgangswert: $M= 1,55$, $SD=0,81$) in der Lärmbedingung hinweisen.

Tabelle 8: Durchschnittliche Lärmbelästigung, Konzentration und Stimmung während der beiden Versuchsbedingungen der Tagesstudie

	Versuchsbedingung	
	Baseline (N=40) $M \pm SD$	Geräuschbedingung (N= 40) $M \pm SD$
<i>Lärmbelästigung</i>	1,5 ± 0,84	2,3 ± 1,04
<i>Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren</i>		
Ich konnte mich nicht auf den Text konzentrieren.	2,2 ± 1,32	2,8 ± 1,5
Ich musste den Text mehrmals lesen, um ihn zu verstehen.	2,7 ± 1,39	2,8 ± 1,33
Es hat mich angestrengt, den Text zu lesen.	2,9 ± 1,36	3,2 ± 1,28
<i>Stimmung</i>		
Ich bin entspannt.	3,95 ± 0,82	3,7 ± 1,07
Ich bin besorgt.	1,5 ± 1,11	1,5 ± 0,99
Ich bin schlecht gelaunt.	1,2 ± 0,46	1,4 ± 0,71
Ich bin nervös.	1,3 ± 0,46	1,5 ± 0,72
Ich fühle mich wohl.	3,7 ± 0,88	3,7 ± 0,88
Ich fühle mich unbehaglich.	1,65 ± 1,05	1,7 ± 0,99
Ich bin aufmerksam.	3,9 ± 0,84	3,5 ± 0,96
Ich bin abgelenkt.	1,55 ± 0,81	1,9 ± 0,99

Anmerkung. M = Mittelwert. SD = Standardabweichung.

Es wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt, um die wichtigsten Items für die Analyse der wichtigsten Konzepte zu identifizieren (Anhang A.13).

Neben der Lärmbelästigung mit einem Item wurden zwei weitere Variablen identifiziert, auf die in der Analyse der Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen der Fokus gelegt wurde (Tabelle 9): *Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text*, bestehend aus zwei Items. Die *Stimmung* wurde aus drei Variablen zu Entspannung, Aufmerksamkeit und Ablenkung gebildet.

Tabelle 9: Ergebnisse der Faktorenanalyse mit drei bedeutsamen Hauptkonzepten

Abhängige Variable	Item	Item im Fragebogen
Lärmbelästigung	Alles in allem fühle ich mich durch das Geräusch ... gestört oder belästigt.	Item 16
Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text	Ich musste den Text mehrmals lesen, um ihn zu verstehen.	Item 21
	Es hat mich angestrengt, den Text zu lesen.	Item 22
Stimmung	Ich bin entspannt.	Item 23
	Ich bin aufmerksam.	Item 29
	Ich bin abgelenkt. *	Item 30

Anmerkung. *= Item wurde für die weitere Auswertung invertiert kodiert.

Die Ergebnisse der drei Hauptvariablen, getrennt nach Bedingungen und verteilt nach Alter, Geschlecht und Reihenfolge, sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Durchschnittliche Lärmbelästigung, Schwierigkeit bei der Konzentration auf den Text und Stimmung in beiden Versuchsbedingungen getrennt nach Alter, Geschlecht und Reihenfolge der Darbietung

	Lärmbelästigung		Schwierigkeit bei der Konzentration auf den Text		Stimmung	
	Baseline	Lärm- bedingung	Baseline	Lärm- bedingung	Baseline	Lärm- bedingung
Alter	<i>M ± SD</i>	<i>M ± SD</i>	<i>M ± SD</i>	<i>M ± SD</i>	<i>M ± SD</i>	<i>M ± SD</i>
18-34 Jahre	1,00 ± 0,00	1,71 ± 0,73	2,57 ± 1,44	2,64 ± 1,13	4,21 ± 0,65	3,83 ± 0,70
35- 49 Jahre	1,13 ± 0,52	2,67 ± 1,23	3,13 ± 1,06	3,73 ± 1,05	3,87 ± 0,75	3,29 ± 0,84
50- 65 Jahre	1,09 ± 0,30	1,64 ± 0,81	2,55 ± 1,31	2,36 ± 1,14	4,27 ± 0,49	4,36 ± 0,53
Gesamt	1,08 ± 0,35	2,05 ± 1,06	2,78 ± 1,27	2,98 ± 1,23	4,10 ± 0,66	3,78 ± 0,82
Geschlecht						
Männlich	1,10 ± 0,44	1,95 ± 0,97	2,79 ± 1,44	3,12 ± 1,32	4,1 ± 0,68	3,71 ± 0,73
Weiblich	1,05 ± 0,23	2,16 ± 1,17	2,76 ± 1,1	2,82 ± 1,15	4,11 ± 0,67	3,84 ± 0,93
Gesamt	1,08 ± 0,35	2,05 ± 1,06	2,78 ± 1,27	2,98 ± 1,23	4,1 ± 0,66	3,78 ± 0,82
Reihenfolge der Bedingungen						
Reihenfolge 1	1,11 ± 0,46	2,58 ± 1,22	3,47 ± 1,01	3,37 ± 1,14	3,91 ± 0,69	3,49 ± 0,97
Reihenfolge 2	1,05 ± 0,22	1,57 ± 0,60	2,14 ± 1,16	2,62 ± 1,23	4,27 ± 0,60	4,03 ± 0,58
Gesamt	1,08 ± 0,35	2,05 ± 1,06	2,78 ± 1,27	2,98 ± 1,23	4,10 ± 0,66	3,78 ± 0,82

Anmerkung. *M*= Mittelwert, *SD*= Standardabweichung, Reihenfolge 1= 1. Baseline Bedingung, 2. Lärmbedingung. Reihenfolge 2= 1. Lärmbedingung, 2. Baseline Bedingung.

3.2.3 Vergleich der Baselinebedingung und der Lärmbedingung hinsichtlich Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text, Stimmung und Blutdruck mittels Kovarianzanalyse

3.2.3.1 Ergebnisse der Kovarianzanalyse für Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text und Stimmung

Es wurde eine Kovarianzanalyse durchgeführt, um mögliche Unterschiede bei der Lärmbelästigung, den Konzentrationsschwierigkeiten beim Text, der Stimmung, dem Blutdruck und der Herzfrequenz zwischen der Baselinebedingung und der Lärmbedingung zu analysieren. In der Analyse wurden die Effekte der Kovariaten Lärmempfindlichkeit, Alter, Geschlecht und Reihenfolge der Präsentation der Bedingungen kontrolliert. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für Lärmbelästigung, Textschwierigkeiten und Stimmung.

Tabelle 11: Kovarianzanalyse für Lärmbelästigung, Schwierigkeit bei der Konzentration mit dem Text und Stimmung

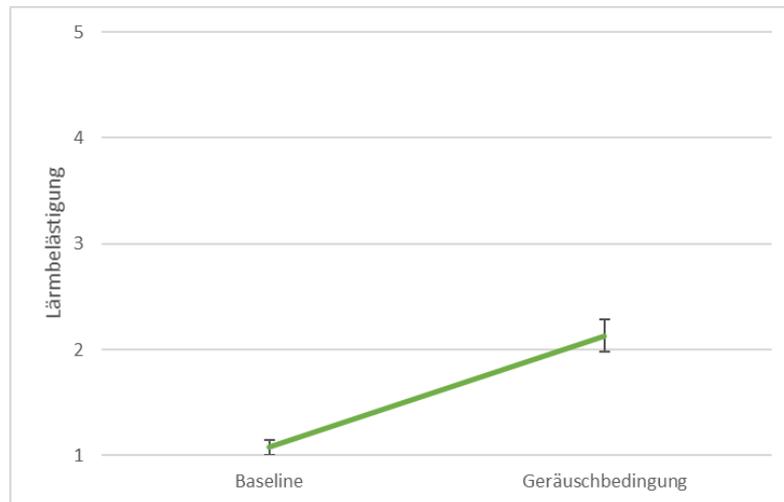
Faktor	Lärmbelästigung	Schwierigkeiten mit dem Text	Stimmung
Haupteffekte			
Bedingung	F(1,25)=9,81, $p = 0,004$	F(1,25)=7,89, $p = 0,009$	F(1,25)=4,40, $p = 0,046$
Lärmempfindlichkeit	F(1,25)=0,09, $p = 0,764$	F(1,25)=4,36, $p = 0,047$	F(1,25)=1,68, $p = 0,207$
Geschlecht	F(1,25)=0,12, $p = 0,733$	F(1,25)=2,58, $p = 0,121$	F(1,25)=0,66, $p = 0,424$
Alter	F(2,25)=2,89, $p = 0,074$	F(2,25)=3,04, $p = 0,066$	F(2,25)=5,09, $p = 0,014$
Reihenfolge	F(1,25)=7,71, $p = 0,010$	F(1,25)=7,80, $p = 0,010$	F(1,25)=10,95, $p = 0,003$
Geschlecht*Alter	F(2,25)=0,57, $p = 0,571$	F(2,25)=1,50, $p = 0,243$	F(2,25)=3,93, $p = 0,033$
Geschlecht*Reihenfolge	F(1,25)=0,00, $p = 0,998$	F(1,25)=2,88, $p = 0,102$	F(1,25)=1,76, $p = 0,197$
Alter *Reihenfolge	F(2,25)=0,56, $p = 0,579$	F(2,25)=1,56, $p = 0,230$	F(2,25)=1,78, $p = 0,190$
Alter*Geschlecht*Reihenfolge	F(1,25)=1,89, $p = 0,181$	F(1,25)=0,41, $p = 0,526$	F(1,25)=4,82, $p = 0,038$
Interaktionsbedingung ...			
*Lärmempfindlichkeit	F(1,25)=0,11, $p = 0,744$	F(1,25)=5,03, $p = 0,034$	F(1,25)=1,65, $p = 0,211$
*Geschlecht	F(1,25)=0,24, $p = 0,627$	F(1,25)=3,25, $p = 0,084$	F(1,25)=0,01, $p = 0,927$
*Alter	F(2,25)=4,18, $p = 0,027$	F(2,25)=4,15, $p = 0,028$	F(2,25)=3,30, $p = 0,053$
*Reihenfolge	F(1,25)=16,37, $p \leq 0,001$	F(1,25)=4,82, $p = 0,038$	F(1,25)=0,84, $p = 0,369$
*Geschlecht*Alter	F(2,25)=3,59, $p = 0,043$	F(2,25)=0,13, $p = 0,882$	F(2,25)=0,70, $p = 0,505$
*Geschlecht*Reihenfolge	F(1,25)=1,38, $p = 0,251$	F(1,25)=1,81, $p = 0,191$	F(1,25)=1,49, $p = 0,233$
*Alter*Reihenfolge	F(2,19)=0,24, $p = 0,790$	F(2,25)=0,10, $p = 0,905$	F(2,25)=1,04, $p = 0,369$
*Alter*Geschlecht*Reihenfolge	F(1,25)=2,45, $p = 0,130$	F(1,25)=2,98, $p = 0,097$	F(1,25)=0,01, $p = 0,926$

Anmerkung. p = Signifikanzniveau.

3.2.3.2 Lärmbelästigung

Für die Lärmbelästigung wurde ein Haupteffekt der Bedingung festgestellt, der in Abbildung 9 dargestellt ist. Die Lärmbelästigung war in der Lärmbedingung im Vergleich zur Baseline signifikant höher ($F(1,25)=9,81, p < 0,01$).

Abbildung 9: Haupteffekt der Bedingung auf Lärmbelästigung

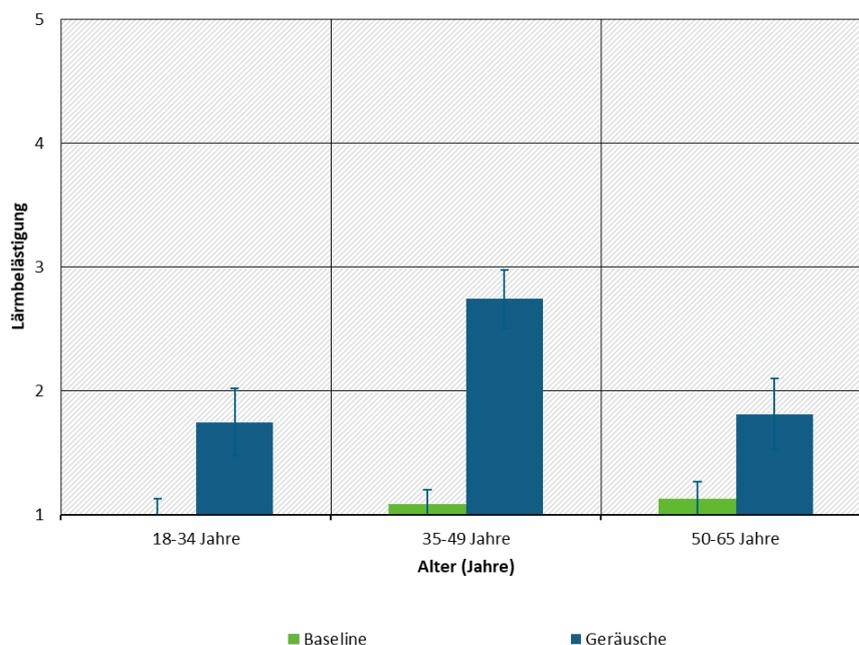


Anmerkung. Skala von 1= überhaupt nicht bis 5= äußerst.

Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Die Interaktion zwischen der Bedingung und dem Alter hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Lärmbelästigung ($F(2,25)=4,176, p < 0,05$). In der Altersgruppe 35-49 Jahre wurden die Versuchspersonen durch das LWP-Geräusch in der Lärmbedingung signifikant stärker belästigt als Versuchspersonen in der jüngeren und älteren Altersgruppe (Abbildung 10).

Abbildung 10: Interaktionseffekt von Alter und Bedingung auf die Lärmbelästigung

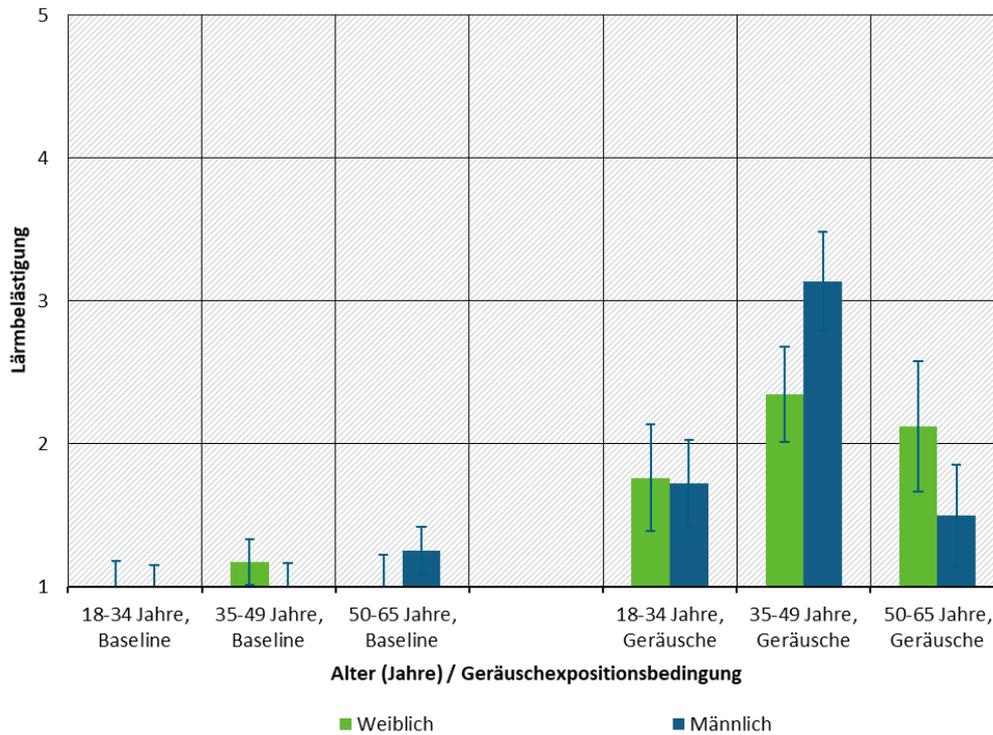


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Anmerkung. Lärmbelästigungsskala von 1= überhaupt nicht bis 5= äußerst.

Außerdem wurde ein Interaktionseffekt für Bedingung*Geschlecht*Alter gefunden, der zeigte, dass Frauen, die älter als 34 Jahre waren, in der Lärmbedingung stärker durch LWP-Lärm belästigt wurden als jüngere Frauen (Abbildung 11). Bei den Männern waren die Versuchspersonen in der mittleren Altersgruppe von 35-49 Jahren stärker gestört als jüngere und ältere Männer ($F(2,25)=3,59, p < 0,05$).

Abbildung 11: Interaktionseffekt von Alter, Geschlecht und Bedingung auf die Lärmbelästigung

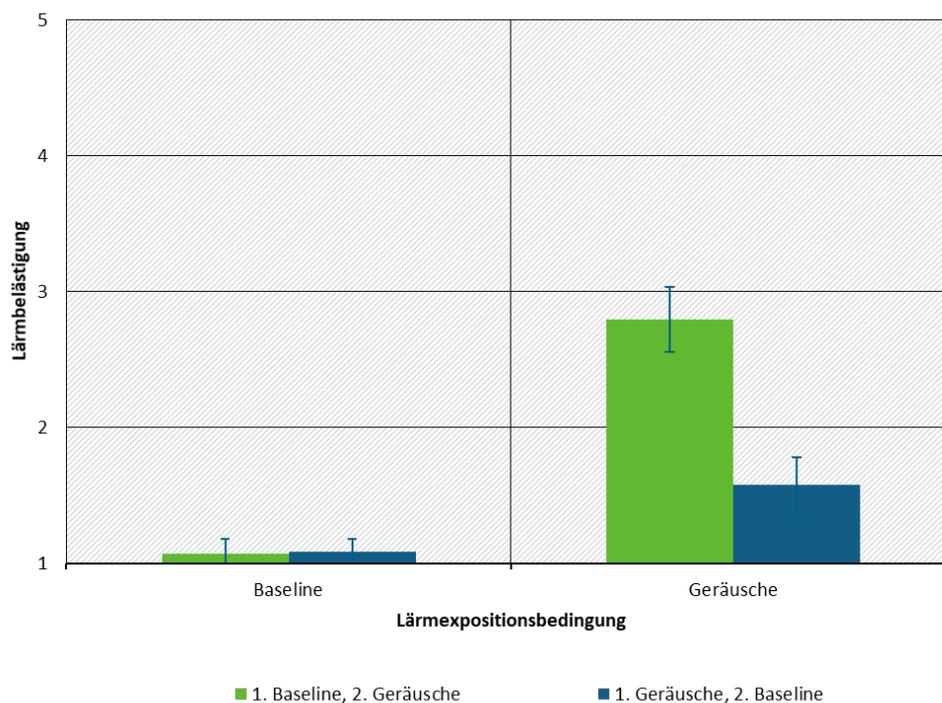


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Anmerkung. Lärmbelästigungsskala von 1= überhaupt nicht bis 5= äußerst.

Weiterhin zeigte sich, dass die Reihenfolge der Bedingungen in Interaktion mit den Bedingungen den Grad der Lärmbelästigung beeinflusste ($F(1,25)=16,37, p < 0,001$). Die Richtung der Ausprägung der Lärmbelästigung war zwischen den Bedingungen gleich, in beiden Reihenfolgen war die Lärmbelästigung in der Lärmbedingung im Vergleich zur Baseline höher (Abbildung 12). Die Intensität, d. h. das Ausmaß der Lärmbelästigung, war jedoch unterschiedlich und in der Lärmbedingung signifikant höher, wenn die Lärmbedingung auf die Baselinebedingung folgte. Der vorherige Zustand diente als Referenzzustand, in diesem Fall die ruhige Umgebung.

Abbildung 12: Lärmbelastung in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Bedingungen



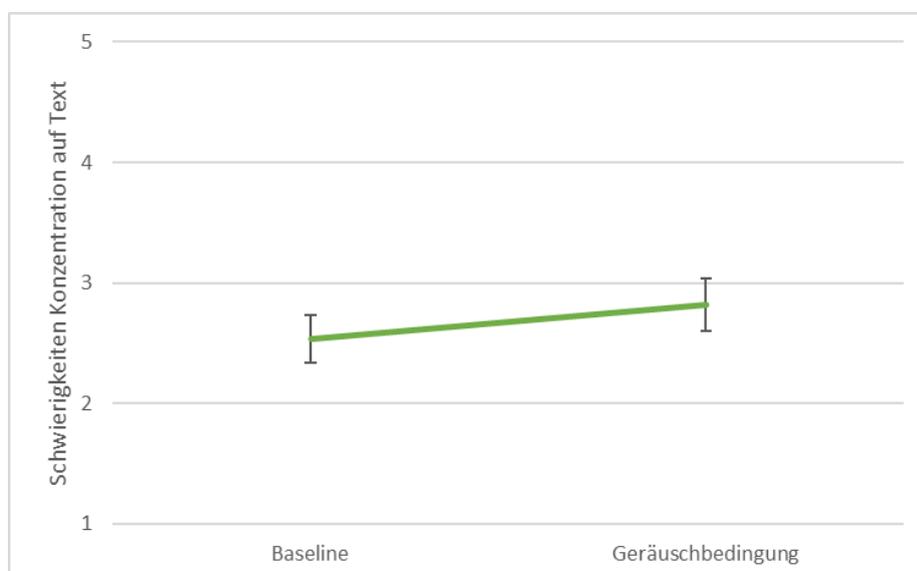
Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Anmerkung. Lärmbelästigungsskala von 1= überhaupt nicht bis 5= äußerst.

3.2.3.3 Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text

In der Lärmbedingung waren die selbstberichteten Konzentrationsschwierigkeiten auf den Text signifikant höher als in der Baselinebedingung ($F(1,25) = 7.89, p < 0,01$; Abbildung 13).

Abbildung 13: Haupteffekt der Bedingung auf Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text



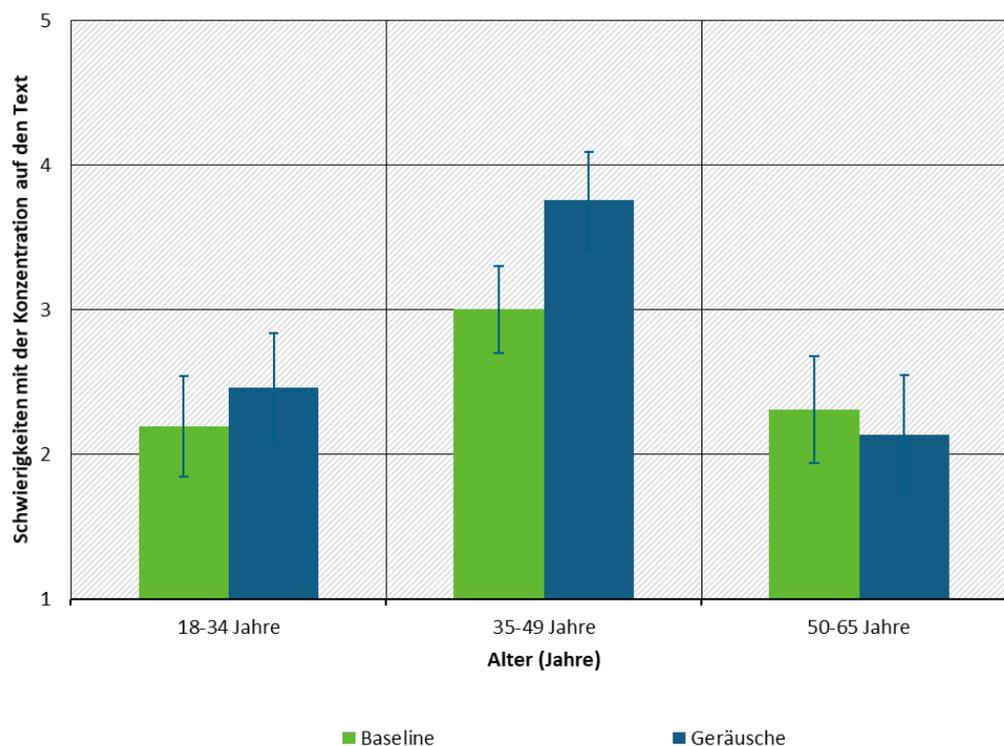
Anmerkung. Skala von 1= nicht bis 5= sehr wahr mit höheren Werten, wobei höhere Werte auf größere Konzentrationsprobleme hinweisen.

Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Auch die individuelle Disposition der Lärmempfindlichkeit beeinflusste die Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text ($F(1,25)=4,36, p < 0,05$), was darauf hindeutet, dass Personen mit höherer Lärmempfindlichkeit mehr Schwierigkeiten haben, sich auf den Text zu konzentrieren. Dies galt besonders für die Konzentrationsschwierigkeiten in der Baselinebedingung ($F(1,25) = 5,03, p < 0,05$). Eine Korrelationsanalyse zeigte, dass die selbstberichtete Lärmempfindlichkeit mit der Bewertung der Konzentrationsschwierigkeiten in der ruhigen Baselinebedingung korrelierte ($r = 0,372, p < 0,05$), nicht aber in der Lärmbedingung ($r = 0,138, p = 0,417$).

Abbildung 14 zeigt den Interaktionseffekt von Bedingung und Alter auf die Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren. Es zeigt sich, dass die Altersgruppe der 35- bis 49-Jährigen die größten Schwierigkeiten hatte, sich auf den Text zu konzentrieren, insbesondere unter der Lärmbedingung.

Abbildung 14: Interaktionseffekt von Bedingung und Alter auf die Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren



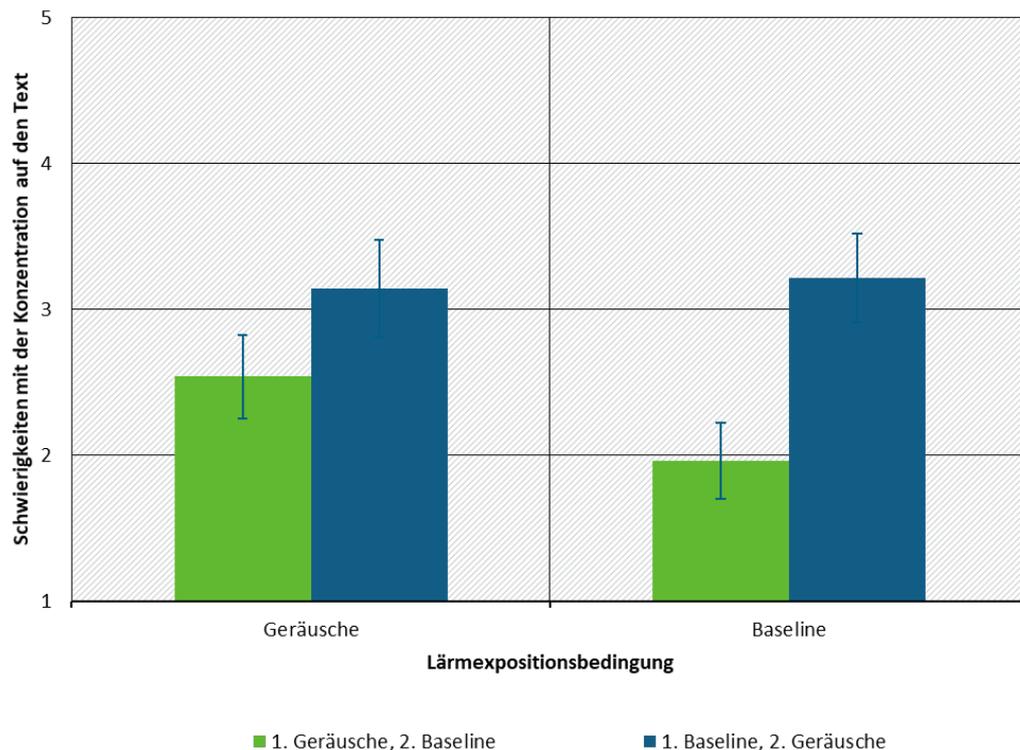
Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Anmerkung. Skala von 1= nicht bis 5= sehr wahr mit höheren Werten, wobei höhere Werte auf größere Konzentrationsprobleme hinweisen.

Die Reihenfolge der Bedingungen hatte einen signifikanten Einfluss auf die Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text in den beiden Lärmbedingungen ($F(1,25)=4,82, p < 0,05$). Abbildung 15 veranschaulicht, dass in der Gruppe mit der Reihenfolge Baselinebedingung gefolgt von der Geräuschbedingung kein Unterschied in der Konzentration auf den Text in der Baselinebedingung gegenüber der Geräuschbedingung auftrat. Das bedeutet, dass die Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren, in der Baselinebedingung ähnlich hoch waren wie in der folgenden Lärmbedingung. Dagegen zeigte sich in der Gruppe *Geräusche* –

Baseline, dass die Versuchspersonen weniger Schwierigkeiten bei der Konzentration auf den Text in der Baselinebedingung im Vergleich zur (vorangehenden) Lärmbedingung berichteten.

Abbildung 15: Interaktionseffekt von Bedingung und Reihenfolge der Bedingungen auf die Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Anmerkung. Skala von 1= nicht bis 5= sehr wahr mit höheren Werten, wobei höhere Werte auf größere Konzentrationsprobleme hinweisen.

3.2.3.4 Stimmung

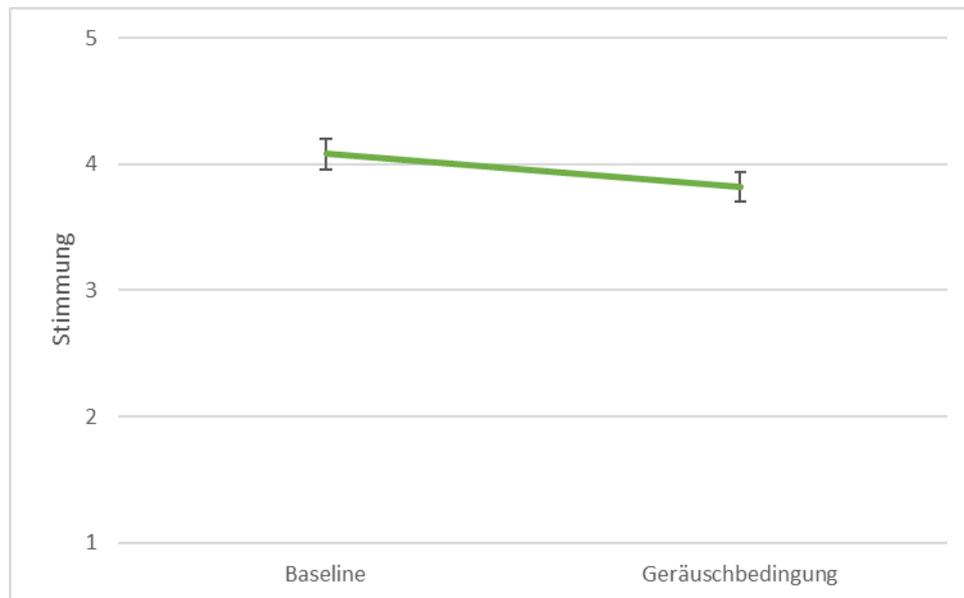
Für die Stimmung wurde nur ein Haupteffekt für die beiden Bedingungen gefunden ($F(1,25)=4,40, p < 0,05$). In der Geräuschbedingung waren die Versuchspersonen signifikant weniger entspannt und aufmerksam als in der Baselinebedingung (Abbildung 16).

Die Stimmung unterschied sich signifikant mit dem Alter, wobei die Gruppe mittleren Alters (35-49 Jahre) ($F(2,25)=5,09, p < 0,05$) weniger entspannt und wach und mehr abgelenkt war ($M = 3,5, SE = 0,15$) als die jüngere ($M = 4,2, SE = 0,17$) und die ältere Gruppe ($M = 4,2, SE = 0,18$). Der Alterseffekt auf die Stimmung interagiert mit dem Geschlecht ($F(2,25)=3,9, p < 0,05$), was darauf hindeutete, dass die älteste männliche Gruppe (50-65 Jahre) die positivste (entspannte, nicht abgelenkte) Stimmung ($M = 4,4, SE = 0,23$) im Vergleich zu allen anderen männlichen Gruppen berichtete (18-34 Jahre: $M = 4,0, SE = 0,20$; 35-49 Jahre: $M = 3,5, SE = 0,22$). Dagegen berichtete die jüngste weibliche Gruppe (18-34 Jahre) die höchste positive Stimmung (entspannt, aufmerksam, nicht abgelenkt) im Vergleich zu den anderen weiblichen Altersgruppen (35-49 Jahre: $M = 3,6, SE = 0,21$; 50-65 Jahre: $M = 4,04, SE = 0,29$).

Hinsichtlich des Haupteffekts der Reihenfolge der Bedingungen ($F(1,25)=10,95, p < 0,01$) waren die Versuchspersonen insgesamt besser gestimmt, wenn die ruhige Baselinebedingung auf die Lärmbedingung folgte ($M = 4,2, SE = 0,13$) als umgekehrt ($M = 3,6, SE = 0,15$). Wenn der Text zuerst in der ruhigen Baselinebedingung und dann in zweiter Reihenfolge in der Lärmbedingung

gelesen wurde, wirkte sich dies insbesondere bei Männern mittleren Alters negativ auf die Stimmung aus, verglichen mit der Stimmung und den Bedingungen in den anderen Gruppen ($F(1,25)=4,82, p < 0,05$). Weitere Interaktionen bezüglich der Stimmung wurden nicht beobachtet.

Abbildung 16: Haupteffekt der Bedingung für die Stimmung



Anmerkung. Skala von 1= nicht bis 5= sehr wahr, wobei höhere Werten auf eine höhere Entspannung und Aufmerksamkeit hindeuten.

Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

3.2.3.5 Blutdruck und Herzfrequenz

Die Vitalfunktionen wurden während der Tagesstudie dreimal gemessen: Zu Beginn der Studie (Start, T0) und nach jeder Studienbedingung (T1 und T2) wurden Blutdruck und Herzfrequenz gemessen. Die Kovarianzanalyse wurde getrennt für den systolischen und den diastolischen Blutdruckwert sowie für die Herzfrequenz durchgeführt. Es wurden Kovariaten einbezogen, um potenzielle Störfaktoren zu kontrollieren: Lärmempfindlichkeit, Geschlecht, Alter und Reihenfolge der Bedingungen.

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse für die drei Kovarianzanalysen. Der Zeitpunkt der Messung (T0, T1, T2) hatte keinen Haupteffekt auf Blutdruck und Herzfrequenz. Der Haupteffekt des Geschlechts auf den systolischen Blutdruck zeigte einen höheren systolischen Blutdruck bei Männern ($M = 123,4, SE = 2,53$) als bei Frauen ($M = 111,9, SE = 2,77$).

Die Auswirkungen der Bedingungen (Baseline und Lärmbedingung) lassen sich an der Interaktion zwischen dem Zeitpunkt der Messung, insbesondere der Messungen zu T1 und T2, und der Reihenfolge der Bedingungen ablesen. Diese Interaktion wurde für alle drei Messungen statistisch signifikant (Tabelle 12). Es ist zu beachten, dass die Versuchspersonen nach dem Zufallsprinzip der Reihenfolge der Bedingungen zugeteilt wurden.

Tabelle 12: Kovarianzanalyse für Blutdruck und Herzfrequenz: Haupteffekte und Interaktionen mit Messzeitpunkt

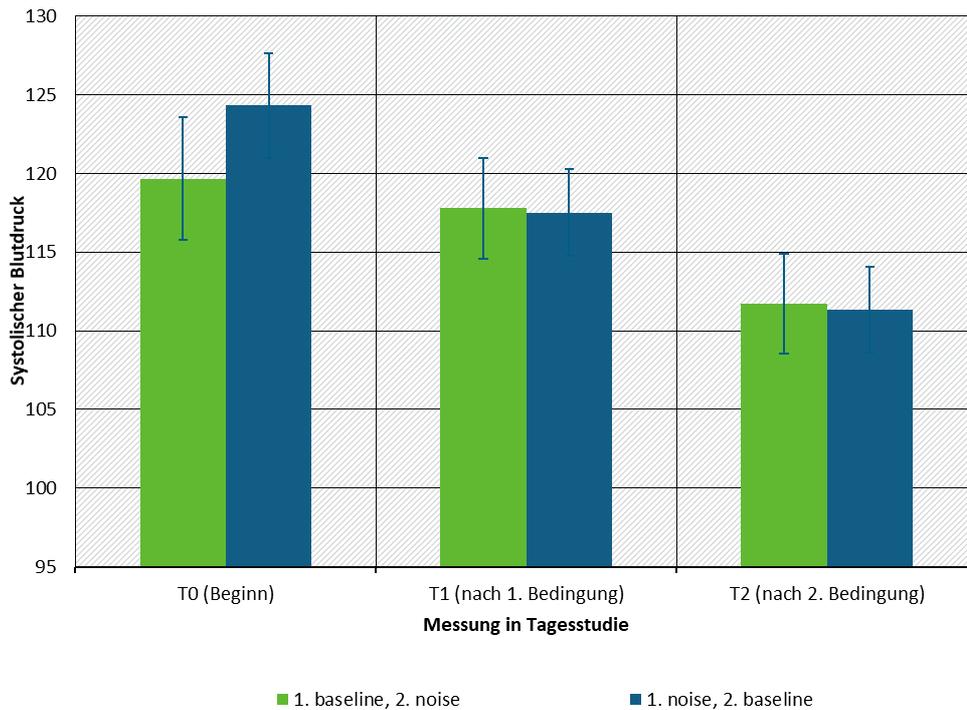
Faktor	Blutdruck: systolischer Wert	Blutdruck: diastolischer Wert	Herzfrequenz
Haupteffekte			
Messzeitpunkt	F(2,50)=2,99, $p=0,059$	F(2,50)=1,16, $p=0,322$	F(2,50)=0,06, $p=0,939$
Lärmempfindlichkeit	F(1,25)=0,02, $p=0,880$	F(1,25)=0,63, $p=0,435$	F(1,25)=0,03, $p=0,866$
Geschlecht	F(1,25)=7,93, $p=0,009$	F(1,25)=2,91, $p=0,100$	F(1,25)=0,90, $p=0,351$
Alter	F(2,25)=0,39, $p=0,681$	F(2,25)=0,29, $p=0,755$	F(2,25)=1,15, $p=0,334$
Reihenfolge	F(1,25)=0,13, $p=0,718$	F(1,25)=0,00, $p=0,999$	F(1,25)=0,13, $p=0,718$
Geschlecht * Alter	F(2,25)=2,71, $p=0,086$	F(2,25)=0,66, $p=0,528$	F(2,25)=3,49, $p=0,046$
Geschlecht * Order	F(1,25)=0,88, $p=0,356$	F(1,25)=0,65, $p=0,430$	F(1,25)=0,16, $p=0,696$
Alter * Reihenfolge	F(2,25)=1,26, $p=0,302$	F(2,25)=0,43, $p=0,654$	F(2,25)=0,63, $p=0,542$
Alter * Geschlecht * Reihenfolge	F(1,25)=2,69, $p=0,113$	F(1,25)=1,27, $p=0,271$	F(1,25)=0,90, $p=0,352$
Interaktion: Messzeitpunkt ...			
*Lärmempfindlichkeit	F(2,50)=1,12, $p=0,336$	F(2,50)=0,88, $p=0,421$	F(2,50)=0,39, $p=0,679$
*Geschlecht	F(2,50)=0,00, $p=0,999$	F(2,50)=2,14, $p=0,128$	F(2,50)=1,57, $p=0,219$
*Alter	F(4,50)=1,28, $p=0,291$	F(4,50)=2,60, $p=0,047$	F(4,50)=4,32, $p=0,004$
*Reihenfolge	F(2,50)=5,60, $p=0,006$	F(2,50)=6,64, $p=0,003$	F(2,50)=5,41, $p=0,007$
* Geschlecht * Alter	F(4,50)=0,56, $p=0,694$	F(4,50)=3,02, $p=0,026$	F(4,50)=1,78, $p=0,148$
* Geschlecht * Reihenfolge	F(2,50)=0,86, $p=0,429$	F(2,50)=1,68, $p=0,196$	F(2,50)=2,15, $p=0,127$
* Alter * Reihenfolge	F(4,50)=1,43, $p=0,236$	F(4,50)=1,97, $p=0,113$	F(4,50)=2,40, $p=0,062$
* Alter * Geschlecht * Reihenfolge	F(2,50)=1,79, $p=0,177$	F(2,50)=0,88, $p=0,421$	F(2,50)=0,58, $p=0,564$

Anmerkung. p = Signifikanzlevel.

Abbildung 17 veranschaulicht den Interaktionseffekt zwischen dem Zeitpunkt der Messung und der Reihenfolge der Baseline-/Lärmbedingungen auf den systolischen Blutdruck ($F(2,50) = 5,60$, $p < 0,01$). Insgesamt zeigt Abbildung 17 einen abnehmenden systolischen Blutdruck im Zeitverlauf von T0 bis T3. Außerdem zeigte sich ein ähnlicher Blutdruck bei den Messungen T2 und T3, unabhängig von den Bedingungen (Baseline und Lärm). Der Unterschied bestand darin, dass der Blutdruck der Gruppe mit Geräuschen als erster Bedingung bereits zu Beginn des Experiments höher war. Dieses Ergebnis spricht nicht für einen Effekt der Expositionsbedingung selbst.

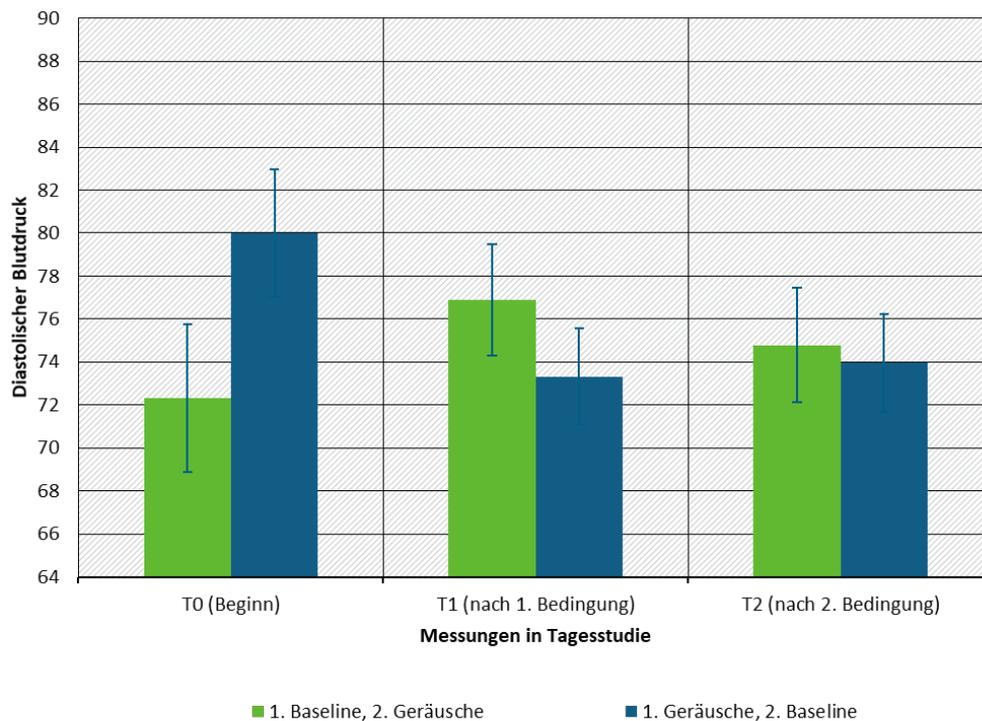
Ein ähnliches Bild der Ergebnisse ergab sich für den diastolischen Blutdruck. Der Hauptunterschied im Blutdruck zeigte sich zu Beginn der Untersuchung, wobei in dieser Studie die unterschiedlichen Bedingungen (Baseline und Geräusche) keinen Einfluss auf den Blutdruck zu haben schienen (Abbildung 18).

Abbildung 17: Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und der Reihenfolge der Darbietung der Bedingungen (Baseline und Lärm) auf den systolischen Blutdruck



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

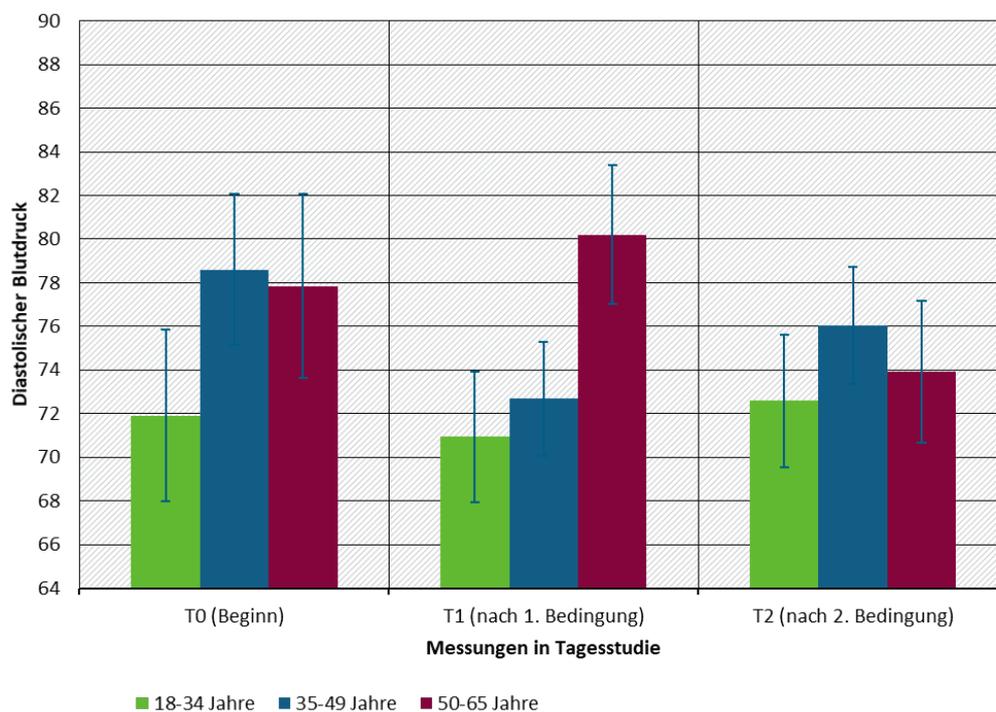
Abbildung 18: Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Reihenfolge der Darbietung der Bedingungen (Baseline und Lärm) auf den diastolischen Blutdruck



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Beim diastolischen Blutdruck zeigte sich eine Wechselwirkung zwischen dem Alter und dem Zeitpunkt der Messung ($F(4,50) = 2,60, p < 0,05$), siehe Abbildung 19. Für alle Altersgruppen bis 49 Jahre waren die diastolischen Blutdruckwerte bei der zweiten (T1) und dritten (T2) Messung niedriger als bei der ersten (T0) zu Beginn der Untersuchung. Im Gegensatz dazu stieg der diastolische Blutdruck in der Gruppe der 50- bis 65-Jährigen von T0 auf T1 an und sank von T1 auf T2 wieder auf ein niedrigeres Niveau als zu Beginn der Tagesstudie.

Abbildung 19: Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Alter auf den diastolischen Blutdruck

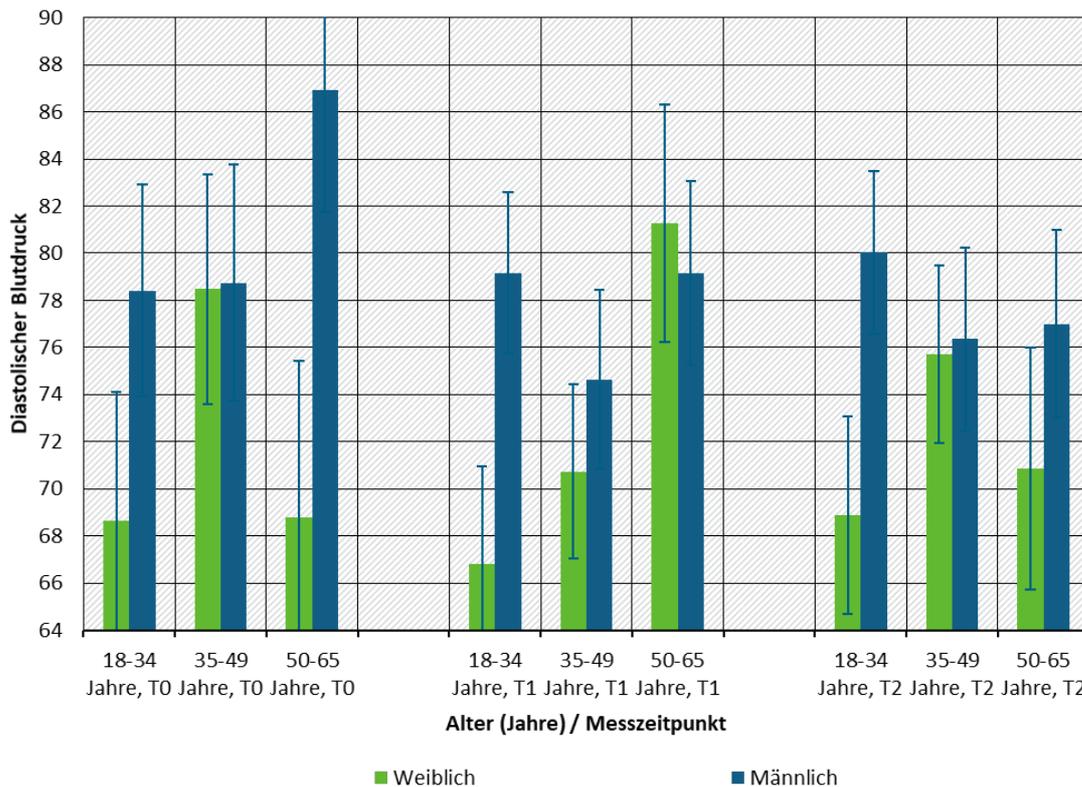


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Betrachtete man jedoch zusätzlich das Geschlecht, so stellte sich heraus, dass in der Gruppe der 50-65-Jährigen der höchste diastolische Blutdruck bei den Männern (am höchsten im Vergleich zu allen anderen Gruppen) zu Beginn (T0) lag. Die weiblichen Versuchspersonen in dieser Altersgruppe hatten den höchsten diastolischen Blutdruck nach der ersten Bedingung (T1) ($F(4,50) = 3,02, p < 0,05$), siehe Abbildung 20. Außerdem hatten männliche Versuchspersonen zu fast allen Messzeitpunkten einen höheren diastolischen Blutdruck als Frauen. Der Unterschied war in der jüngsten Gruppe (18-34 Jahre) und in der älteren Gruppe (50-65 Jahre) größer als bei den Versuchspersonen mittleren Alters.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Interaktion zwischen der Bedingung und der Reihenfolge der Bedingung für die Herzfrequenz ($F(2,50) = 5,41, p < 0,01$). In der Gruppe der Versuchspersonen, die den Text zuerst in der Lärmbedingung (T1) und dann in der Baselinebedingung (T2) lasen, sank die Herzfrequenz von T0 bis T2. Unter der Annahme, dass die Abnahme der Herzfrequenz auf eine Entspannung vom physiologischen Stress hinweist, zeigen die Ergebnisse, dass die Versuchspersonen in der Baselinebedingung im zweiten Teil der Untersuchung (T2) in der Lage waren, sich zu entspannen, während die Gruppe der Versuchspersonen, die zuerst die Baselinebedingung (T1) und dann die Lärmbedingung erhielt, sich in der (ruhigen) Baselinebedingung nicht beruhigen konnte.

Abbildung 20: Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2), Geschlecht und Alter auf den diastolischen Blutdruck

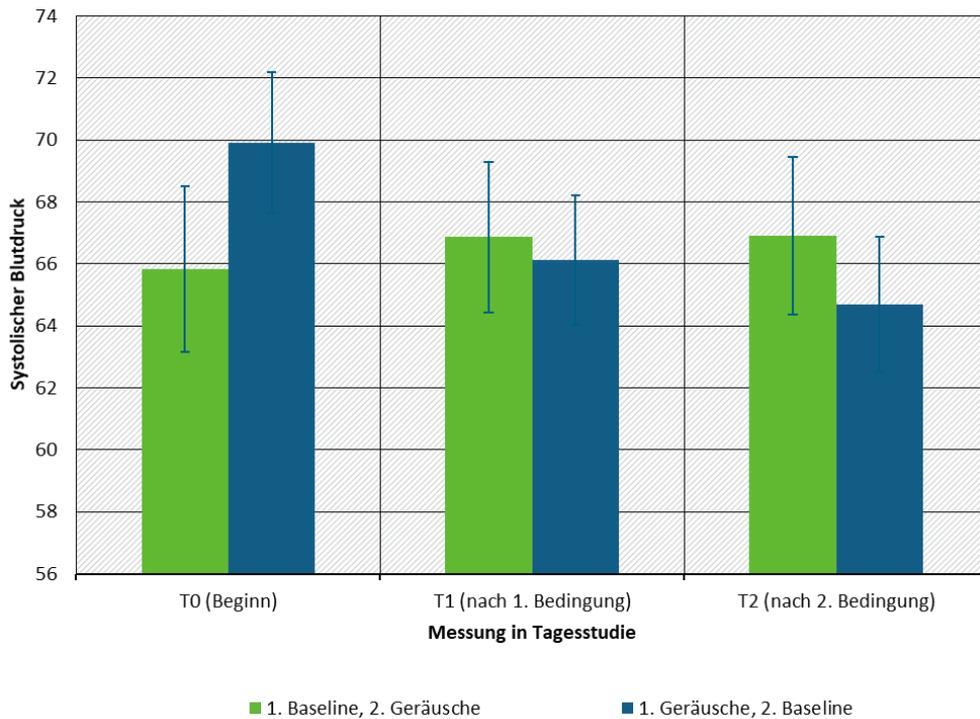


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Die Herzfrequenzwerte unterschieden sich in Bezug auf Geschlecht und Alter ($F(2,25) = 3,49, p < 0,05$). Weibliche Versuchspersonen der älteren Altersgruppen hatten eine niedrigere Herzfrequenz als jüngere (18-34 Jahre: $M = 71,61, SE = 3,82$; 35-49 Jahre: $M = 68,61, SE = 3,42$; 50-65 Jahre: $M = 63,9, SE = 4,67$). Bei männlichen Versuchspersonen war die Beziehung zwischen Herzfrequenz und Alter nicht linear: Die Männer mittleren Alters (35-49 Jahre) hatten im Experiment die niedrigste durchschnittliche Herzfrequenz ($M = 58,3, SE = 3,52$), gefolgt von der jüngsten (18-34 Jahre) ($M = 65,1, SE = 3,16$) und der ältesten Gruppe (50-65 Jahre) ($M = 72,1, SE = 3,62$).

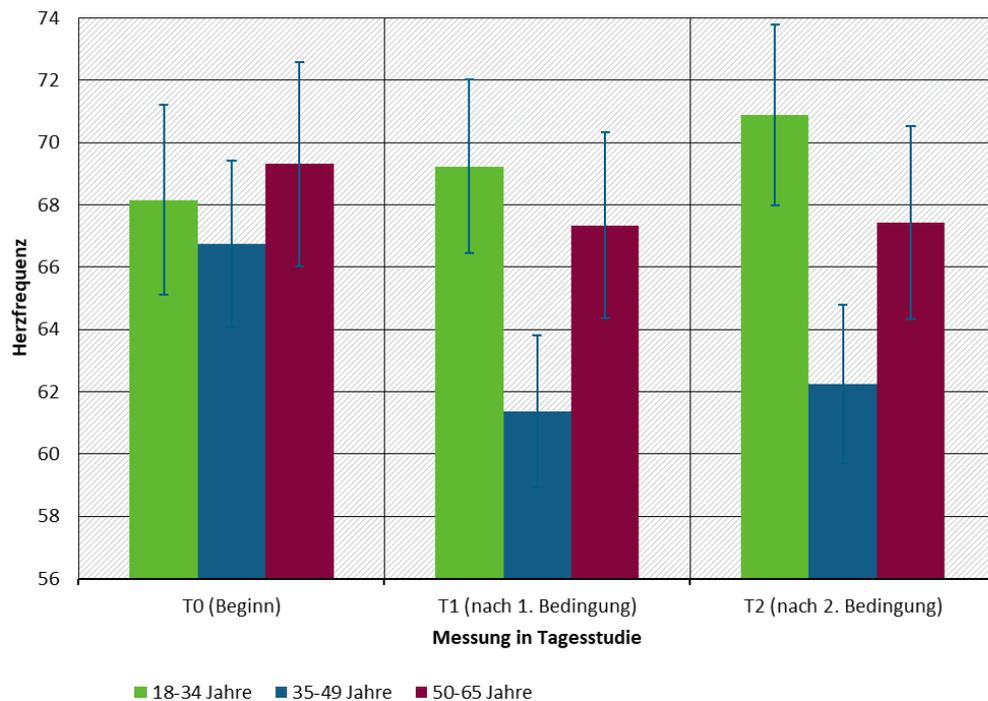
Es gab außerdem einen Interaktionseffekt von Alter und Messzeitpunkt auf die Herzfrequenz ($F(4,50) = 4,320, p < 0,01$), siehe Abbildung 22. In der Altersgruppe 18-34 Jahre stieg die Herzfrequenz von T0 bis T2 an. Im Gegensatz dazu war die Herzfrequenz in der Gruppe mittleren Alters (35-49 Jahre) bei T2 und T3 im Vergleich zu T0 niedriger, wobei der niedrigste Wert bei T2 auftrat. Die älteste Gruppe (50-65 Jahre) hatte die höchste durchschnittliche Herzfrequenz zu Beginn (T0). In dieser Altersgruppe war die durchschnittliche Herzfrequenz bei T2 und T3 niedriger, mit geringem Unterschied zwischen T2 und T3 (Abbildung 22).

Abbildung 21: Interaktion zwischen Messzeitpunkt (T0, T1, T2) und Reihenfolge der Bedingungen (Baseline und Geräusche) auf die Herzfrequenz



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

Abbildung 22: Interaktion zwischen Alter und Messzeitpunkt (T0, T1, T2) auf die Herzfrequenz

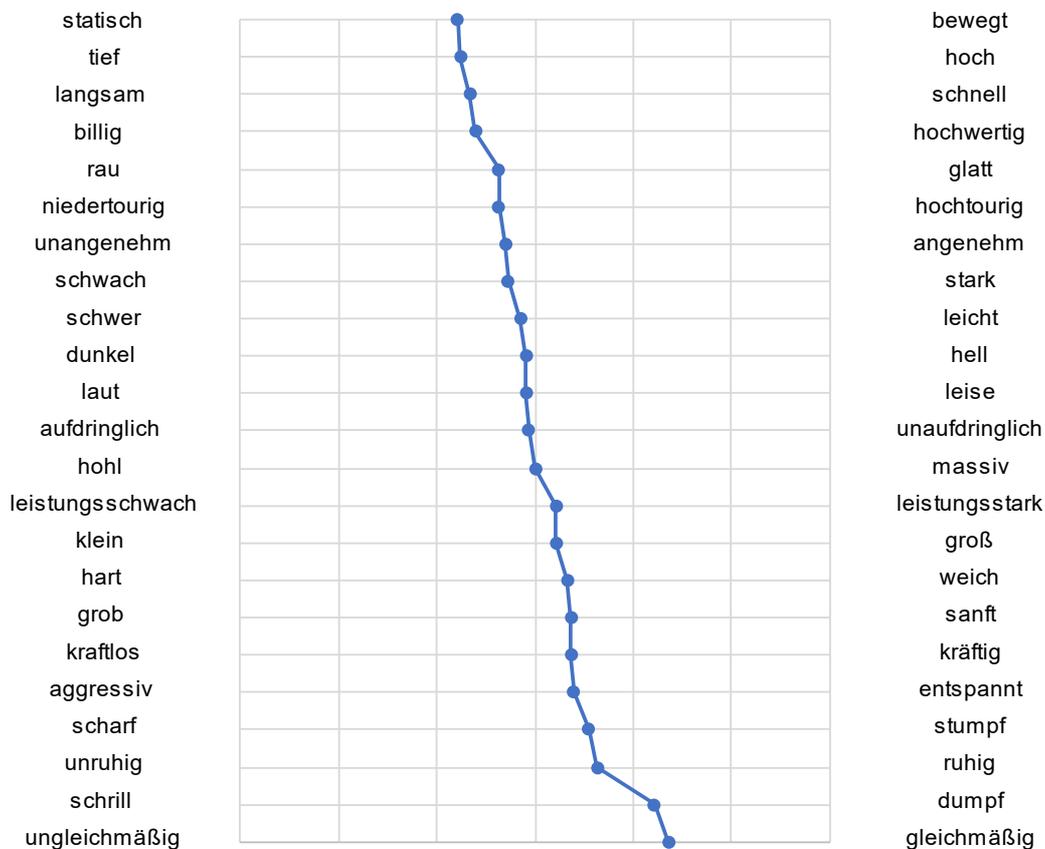


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS

3.2.4 Wahrnehmung der Geräuscheigenschaften von Luftwärmepumpengeräuschen

Die Geräuscheigenschaften des LWP-Geräuschszenarios wurden auf zwei Skalen bewertet. Zunächst bewerteten Versuchspersonen die Geräuschwahrnehmung anhand einer semantischen Differenzskala mit 23 Paaren entgegengesetzter Geräuschbeschreibungen (Abbildung 23). Im Mittel bewerteten die Versuchspersonen insbesondere das LWP-Geräusch als dumpf, billig, langsam, statisch und gleichmäßig.

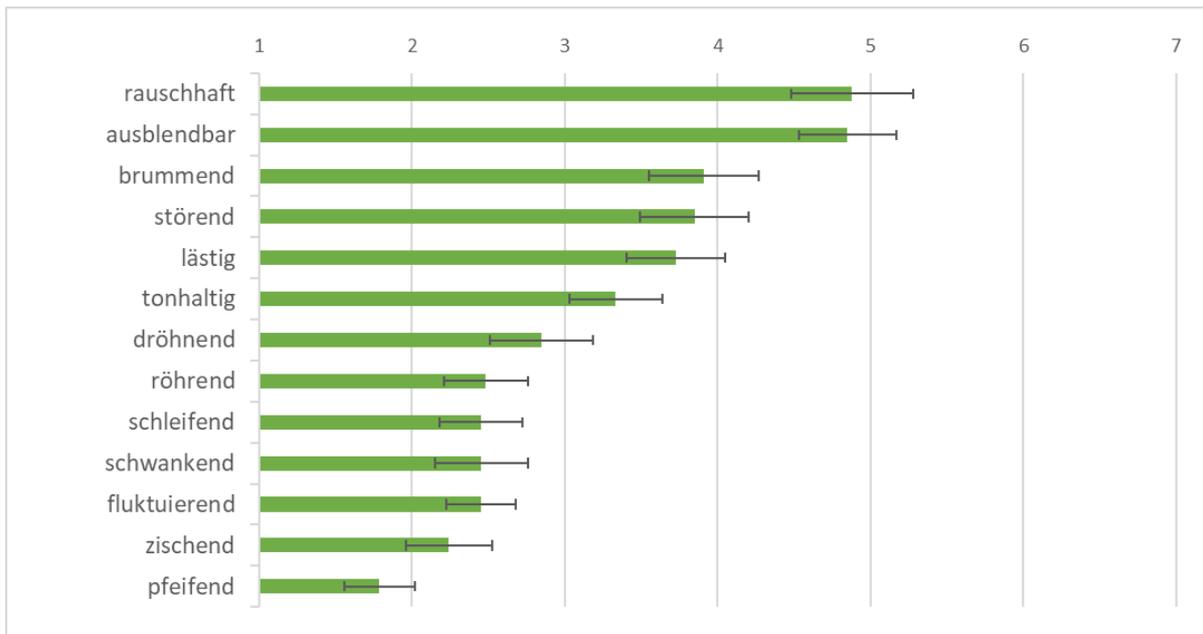
Abbildung 23: Wahrgenommene Eigenschaften der Luftwärmepumpengeräusche



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Weiterhin wurden 14 Geräuscheigenschaften bewertet, die auf einer 7er-Skala von 1= *überhaupt nicht* bis 7= *völlig* zu beantworten waren (Abbildung 24). Gemäß der Bewertung konnte das Geräuschszenario als eher ausblendbar, brummend und laut, eher lästig und störend, aber weniger pfeifend und zischend beschrieben werden.

Abbildung 24: Bewertung des LWP-Geräuschszenario anhand von 13 Geräuscheigenschaften



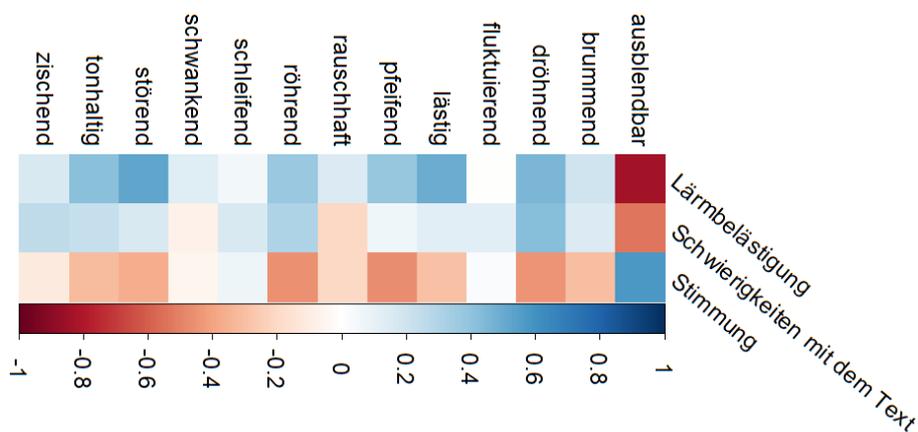
Anmerkung. Skala von 1= überhaupt nicht bis 7= völlig.

Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

3.2.5 Zusammenhang zwischen Geräuscheigenschaften und abhängigen Variablen Lärmbelästigung, Konzentrationsschwierigkeiten auf Text, Stimmung

Die Zusammenhänge zwischen den Geräuscheigenschaften und den drei wichtigsten abhängigen Variablen Lärmbelästigung, Schwierigkeiten bei der Textverarbeitung und Stimmung sind in Abbildung 25 dargestellt. Tabelle 13 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen diesen Variablen. Je stärker die Korrelation zwischen zwei Variablen ist, desto kräftiger ist die Farbe. Blau steht für eine positive Korrelation, rot steht für eine negative Korrelation zwischen den Variablen.

Abbildung 25: Korrelationen zwischen Geräuscheigenschaften und den drei Hauptvariablen Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit der Konzentration auf den Text und Stimmung



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Tabelle 13: Korrelationen zwischen Geräuscheigenschaften und drei Hauptvariablen Lärmbelästigung, Schwierigkeiten mit dem Text und Stimmung

Eigenschaften	AV1 Lärmbelästigung	AV2 Schwierigkeiten mit Konzentration auf Text	AV3 Stimmung
ausblendbar	-0,836***	-0,538**	0,575***
brummend	0,201	0,157	-0,302
dröhnend	0,459**	0,423*	-0,444*
fluktuierend	-0,002	0,120	0,028
lästig	0,493**	0,121	-0,298
pfeifend	0,386*	0,061	-0,463**
rauschhaft	0,159	-0,202	-0,2
röhrend	0,373*	0,306	-0,458**
schleifend	0,056	0,165	0,071
schwankend	0,136	-0,071	-0,057
störend	0,523**	0,168	-0,364*
tonhaltig	0,414*	0,234	-0,313
zischend	0,164	0,256	-0,116

Anmerkung. AV= abhängige Variable, Skala von 1= überhaupt nicht bis 7= völlig. *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

Wurde das Geräusch als nicht ausblendbar wahrgenommen, waren die Lärmbelästigung und die Schwierigkeiten, sich auf einen Text zu konzentrieren, größer und die Versuchspersonen weniger entspannt und aufmerksam. Ähnliche Effekte zeigten sich für das Geräuschmerkmal *Dröhnen*: Wurde das Geräusch als dröhnend wahrgenommen, war es störender und schwieriger, sich auf einen Text zu konzentrieren, während die Stimmung schlechter eingeschätzt wurde. Die Lärmbelästigung korrelierte mit den Geräuschmerkmalen *Pfeifen*, *Brüllen* und *tonaler Klang*. Die Stimmung wurde z. B. durch pfeifende und brüllende Geräusche negativ beeinflusst.

3.2.6 Finale Beurteilung der Texte

Am Ende der Tagesstudie wurden zehn Aussagen zu den Texten im Allgemeinen bewertet, die auf einer 5-Punkte-Skala von 1= *nicht* bis 5= *sehr* zu beantworten waren (siehe Anhang A.3). Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Im Durchschnitt gaben die Versuchspersonen an, dass sie es kaum gewohnt sind, solche Texte zu lesen ($M=2,05$, $SD=1,1$) und einige Wörter waren für die durchschnittliche Stichprobe ungewohnt ($M=3,05$, $SD= 1,2$). Dennoch wurden die Texte im Durchschnitt als mäßig spannend ($M=2,73$, $SD=1,3$) und interessant ($M=2,83$, $SD=1,5$) bewertet.

Tabelle 14: Finale Beurteilung der griechischen Texte der Tagesstudie

	<i>M</i>	<i>SD</i>	Min	Max
Die Texte waren einfach zu verstehen.	2,65	1,1	1	5
Einige Wörter in den Texten waren mir unbekannt.	3,05	1,2	1	5
Ich hatte Probleme den Texten zu folgen.	2,65	1,3	1	5
Die Botschaft der Texte kann ich in wenigen Sätzen wiedergeben.	2,78	1,2	1	5
Ich bin geübt im Lesen solcher Texte.	2,15	1,1	1	5
Das Lesen der Texte hat mir Freude bereitet.	2,33	1,2	1	5
Der Inhalt der Texte hat mich interessiert.	2,83	1,5	1	5
Das Lesen von Texten, die eine ähnliche Schwierigkeit wie die gelesenen Texte aufweisen, ist Alltag für mich.	2,40	1,3	1	5
Es hat Spaß gemacht die Texte zu lesen.	2,65	1,4	1	5
Die Texte waren spannend.	2,73	1,3	1	5

Anmerkung. Skala von 1= nicht bis 5 = sehr, *M*= Mittelwert, *SD* = Standardabweichung.

4 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Forschungsprojekt wurden die Auswirkungen von LWP-Geräuschen auf den Schlaf die Tagesfunktionen und die Stimmung im Labor untersucht. Als zentrale Hypothesen wurden herausgestellt, dass nächtlicher LWP-Lärm Einfluss auf die Mikro- und Makrostruktur des Schlafs hat sowie ein zeitlicher Zusammenhang zwischen Auftreten von Veränderungen im Geräuschmuster und Störungen der Schlafstruktur vorliegen. Für die Wirkungen im Wachzustand wurden die Hypothesen aufgestellt, dass die Geräuschexposition beim Lesen eines Textes negativen Einfluss auf die Stimmung, die Konzentration beim Lesen eines Texts sowie die Belästigung durch Lärm haben im Vergleich zu einer ruhigen Bedingung. Weiterhin wurde angenommen, dass sich die Geräuschexposition im Vergleich zur Baselinebedingung in Messungen des Blutdrucks und der Herzfrequenz bemerkbar machen.

In der Schlafstudie schliefen die Versuchspersonen drei Nächte in einem Schlaflaborraum. In einer Nacht wurden sie LWP-Geräuschen ausgesetzt, die durch ein (simuliertes) geschlossenes Fenster zu hören waren, in der anderen Nacht wurde ein gekipptes Fenster für die Geräuschexposition simuliert. Zum Vergleich war die dritte Bedingung „ruhig“ (Basisnacht), ohne Lärmexposition. Die Expositionsbedingungen wurden in den drei Nächten permutiert. Für die Bedingung „Fenster gekippt“ betrug der durchschnittliche $L_{Aeq,1h}$ 30,4 dB(A) mit Spitzenschallpegeln bis zu 41 dB(A) am Ohr der schlafenden Person, und für die Bedingung „Fenster geschlossen“ betrug der $L_{Aeq,1h}$ 21 dB(A) mit Spitzenschallpegeln bis zu 30 dB(A). In der Tagesstudie wurden die Versuchspersonen 15 Minuten lang den LWP-Schallpegeln des Szenarios „Fenster gekippt“ ausgesetzt, im Vergleich zu 15 Minuten Stille (keine Lärmexposition).

4.1 Wirkungen der Luftwärmepumpengeräusche im Wachzustand und im Schlaf

Bei den 40 Versuchspersonen, die an den zwei Laborstudien teilnahmen, wurden sowohl in der Schlafstudie als auch in der Tagesstudie Auswirkungen der Exposition durch LWP-Lärm auf den Schlaf, die Beeinträchtigung bei Tagesaktivitäten und die Lärmbelastigung nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Schlafstudie deuten auf geringe Auswirkungen der LWP-Geräusche während des Schlafs hin. Bei den Schlafparametern zeigten sich nur geringe, aber statistisch signifikante Auswirkungen auf die lärmassoziierten Arousals. In der „lautesten“ Lärmbedingung fanden sich eine höhere Anzahl von Arousals, d. h. in der Nacht mit dem Geräuschszenario „Fenster gekippt“ im Vergleich zum Szenario „Fenster geschlossen“. Obwohl der Einfluss des LWP-Geräuschs auf die lärmassoziierten Arousals zeigen, dass der Organismus auf betriebsbedingte Veränderungen des LWP-Geräuschs während der Nacht reagiert, ist dieses Ergebnis jedoch nicht gleichzusetzen mit einer schädlichen, pathologischen Wirkung des LWP-Geräuschs.

Studien zur Auswirkung von Verkehrslärm auf den Schlaf zeigen, dass physiologische Reaktionen auf Lärmereignisse („Aufwachen“) bei einem Schallpegel SEL von ca. 33 dB(A) beginnen (Basner & McGuire 2018). Die Spitzenpegel L_{Amax} in dieser Studie waren höher, aber vermutlich von zu kurzer Dauer für Aufwachreaktionen jenseits von Arousals. Hinsichtlich der Schlafparameter, die sich auf den Schlaf der gesamten Nacht beziehen, konnte in früheren Schlafstudien zur Wirkung von Lärm gezeigt werden, dass lärmbedingte Veränderungen der Schlafstruktur über die Nacht zumindest teilweise kompensiert werden konnten (Basner et al. 2011).

In der Tagesstudie zeigten sich Unterschiede zwischen der Lärmbedingung und der Baselinebedingung für die wichtigsten Untersuchungsparameter (Lärmbelastigung,

Konzentrationsschwierigkeiten auf Text und Stimmung). Für die Auswirkungen auf die Lärmbelästigung und die Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren, wurde ein Reihenfolgeeffekt festgestellt. Das heißt, bezogen auf die Lärmbelästigung und die Fähigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren, wurden mehr negative Effekte gemessen, wenn die Präsentation eines Geräuscheszenarios nach dem ruhigen Szenario erfolgte. Eine Interpretation ist, dass die erste dargestellte Bedingung als Referenz dient, so dass der auf die Ruhe folgende Lärm intensiver wahrgenommen wird. Es scheint plausibel, dass dies auf einer kurzfristigen Ebene auf den so genannten Change-Effekt bei Reaktionen auf Lärm hinweist. Der Change-Effekt bedeutet, dass Menschen bei einer Veränderung der Lärmbelastung mit einem Übermaß an Reaktionen in Richtung der Veränderung der Belastung reagieren. Der Change-Effekt ist stärker ausgeprägt, wenn sich die Lärmsituation verschlechtert (Zunahme der Lärmexposition) (Brown & van Kamp 2009, a, b; Schreckenberget al. 2019).

Übertragen auf die reale Situation in Wohngebieten könnte dies die zunehmende Zahl von Beschwerden über neu installierte LWP, insbesondere in ländlichen Gebieten, erklären. Dies ist ein weiterer Beleg für das Argument, dass der wahrgenommene Kontrast zwischen zwei Bedingungen für die Lärmwahrnehmung von großer Bedeutung ist.

4.2 Methodische Überlegungen und Limitationen der Studie

Alle Versuchspersonen der Laborstudie wurden auf Schlafstörungen untersucht und als schlafgesund eingestuft. Faktoren, die einen Einfluss auf den Schlaf haben könnten, wurden wenn möglich ausgeschlossen. Daher ist es nicht möglich anzugeben, ob eine stärkere Lärmwirkung bei zuvor kranken oder schlafgestörten Personen auftritt. Folglich können keine Aussagen über die Auswirkungen von LWP-Lärm auf andere vulnerable Gruppen, z.B. Personen mit Schlafstörungen, gemacht werden. Es ist ratsam, weitere Studien durchzuführen, insbesondere in der Praxis, d.h. in Wohngebieten, in denen LWP eingesetzt werden.

Die COVID-19-Pandemie beeinträchtigte die Rekrutierung und Durchführung der Studie und führte weiterhin zu Verzögerungen bei der Fertigstellung. Beispielsweise war es in der Phase Anfang 2021 schwierig, ältere Versuchspersonen zu erreichen oder zur Teilnahme zu motivieren, da die Menschen in dieser Altersgruppe stärker über mögliche COVID-19-Infektionen besorgt waren. Dennoch konnte die Studie im Jahr 2021 erfolgreich abgeschlossen werden.

Im Studiendesign wurden die Studiennächte in einem wöchentlichen Rhythmus jeweils am gleichen Wochentag durchgeführt. Es wurden keine Gewöhnungsnächte realisiert. In der Schlafforschung sind beide Designs üblich, sowohl Untersuchungsnächte im Wochenrhythmus als auch in aufeinanderfolgenden Nächten durchzuführen.

In der vorliegenden Studie wurden zwei Designs diskutiert:

- ▶ Die Durchführung von vier aufeinanderfolgenden Nächten mit N= 30 Versuchspersonen, wovon eine Nacht als Gewöhnungsnacht dient, oder
- ▶ die Durchführung von drei Nächten in wöchentlichen Abständen mit N= 40 Versuchspersonen ohne Gewöhnungsnacht.

Bisherige Schlafstudien zur Untersuchung von Lärm, die in der Literatur zu finden sind, wurden in aufeinanderfolgenden Nächten gemessen (z.B. Basner, Müller & Elmenhorst 2011; Müller et al. 2015). Diesem Ansatz zu folgen hätte den Vorteil der Vergleichbarkeit. Eine Gewöhnungsnacht ist in der Schlafforschung gut etabliert, da Studien darauf hindeuten, dass sich die erste Nacht signifikant von den folgenden Nächten unterscheiden kann (Agnew et al.

1966). Die dermatologische Belastung der Versuchspersonen durch das Anbringen der Elektroden, insbesondere am Kopf, in vier aufeinanderfolgenden Nächten ist jedoch erheblich. Außerdem wäre nur eine Stichprobengröße von 30 Versuchspersonen für vier Nächte realisierbar gewesen. In aufeinanderfolgenden Nächten ist auch eine Übertragung der Belastung aus den vorangegangenen Nächten möglich (Carry-over-Effekt). Um diesen Effekt zu vermeiden, ist daher eine Auswaschphase zwischen den Studiennächten erforderlich, also Zeit, in der sich die Wirkung der vorangegangenen Behandlung oder Intervention aufheben kann. Anschließend muss ein statistischer Test der aufgezeichneten Daten durchgeführt werden, um die Wirksamkeit des Messaufbaus nachzuweisen (Wellek & Blettner, 2010). Obwohl dieser Effekt bei allen Versuchspersonen gleich gewesen wäre, wäre er aufgrund der Permutation der Testbedingungen in den drei Testnächten bei unterschiedlichen Testbedingungen aufgetreten. Zudem wurden in der Vergangenheit die Einflüsse der individuellen Chronobiologie, also dem individuellen biologischen Rhythmus, sowie der persönlichen Wochenroutinen des Einzelnen auf die Messergebnisse nicht berücksichtigt.

Es wurde die Option 2 mit drei Nächten in einem wöchentlichen Intervall ohne Gewöhnungsnacht und 40 Versuchspersonen gewählt, so dass mehr Versuchspersonen einbezogen werden konnten. Ein längerer Zeitraum zwischen den Nächten erlaubt der Haut außerdem, sich zu regenerieren, insbesondere am Kopf. Eine Übertragung der Belastung aus den vorangegangenen Nächten auf die folgenden Nächte kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Eine Gewöhnungsnacht ist somit nicht notwendig, da der sogenannte „First Night Effect“ (Agnew et al. 1966) in allen Nächten wieder die gleiche Wirkung hat. Daher wurde ein potentiell höheres Drop-out-Risiko in Kauf genommen. Die Vergleichbarkeit mit anderen Schlafstudien zur Wirkung von Lärm ist eingeschränkt, da in bisherigen Schlafstudien mit polysomnographischen Messungen bisher in aufeinanderfolgenden Nächten gemessen wurde (z.B. Basner et al. 2011; Griefahn et al. 2007). Allerdings unterscheiden sich die in dieser Studie untersuchten Lärmquellenarten in Bezug auf Häufigkeit, Dauer und Geräuschcharakteristik deutlich von anderen Studien. Vor allem Verkehrslärmquellen weisen unterschiedliche Eigenschaften auf (z. B. in der Tonalität).

Es kann argumentiert werden, dass die für die Tagesstudie gewählte *imaginierte Alltagssituation* keine messbaren Leistungseffekte hervorrufen kann. Außerdem werden mögliche Auswirkungen der Lärmbedingung auf Konzentration und Aufmerksamkeit selbst berichtet. Es wurden zunächst zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen: die Verwendung standardisierter kognitiver Leistungstests oder eine *imaginierte Alltagssituation* (Feldmann & Carolus 2019).

Bei der Beurteilung der Lärmbelastung müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden:

- ▶ Die Belastungssituation sollte eine Alltagssituation widerspiegeln und es sollte möglich sein, eine Störung durch die Lärmexposition zu erzeugen. Wenn die Versuchspersonen einfach gebeten werden, ihre Lärmbelastung auf der Grundlage ihrer Hörerfahrung zu beurteilen, liegt die Beurteilung der Belastung sehr nahe an der Beurteilung der Lautheit (da diese sehr stark korreliert). Ein realistischeres Szenario ist die Schaffung einer Alltagssituation, in der eine Tätigkeit gestört werden kann.
- ▶ Der Künstlichkeit der Laborsituation sollte durch die Schaffung einer *imaginierten* Alltagssituation entgegengewirkt werden. Bei der Verwendung von standardisierten kognitiven Leistungstests wären Auswirkungen der Geräuschsituation auf die kognitive Leistung untersuchbar. Gleichzeitig hätten die Versuchspersonen eine Aufgabe, die prinzipiell durch Geräusche gestört werden kann. Allerdings ist die Durchführung der Tests nicht sehr alltagsnah und die Versuchspersonen befinden sich vollständig in der künstlichen Laborsituation.

Da in der Tagesstudie die Erhebung der Belästigung durch die Lärmbedingungen im Vordergrund stand und dieser Studienteil alltagsnah gestaltet werden sollte, wurde der Ansatz der *imaginierten* Alltagssituation gewählt. Die Überlegung, die Instruktion für die Tagesstudie systematisch zu variieren und damit zwei verschiedene Instruktionen durchzuführen, wurde verworfen, um eine weitere Unterteilung der Stichprobe zu vermeiden, da die Kombination von Nacht- und Tagesstudien zu einer Erhöhung des Messfehlers führen könnte.

In Bezug auf die Auswahl des Lesematerials während der Tagesstudie kann argumentiert werden, dass die griechischen Sagen besonders anspruchsvoll sein könnten für den gewöhnlichen Lesenden. Die Analyse der potentiellen Schwierigkeit, sich auf den Text zu konzentrieren, zeigte, dass die Beschäftigung mit den griechischen Sagen zu Beginn generell als schwieriger eingeschätzt wird. In der Reihenfolge der Bedingungen *Lärm - Baseline* scheint sich die Beschäftigung mit den Texten in der zweiten Bedingung jedoch zu verbessern. In der Gruppe mit der Reihenfolge *Baseline - Lärm* konnten die Geräusche der AHPs eine richtige Beschäftigung mit den Texten auch in der zweiten Bedingung beeinträchtigen. Daher könnte erwogen werden, die Auswahl des Lesematerials in zukünftigen Studien auf eine einfachere Alternative umzustellen.

Es wurde festgestellt, dass bestimmte Geräuscheigenschaften der LWP-Geräusche mit einer höheren Lärmbelastung verbunden sind. Diese Ergebnisse könnten für die Optimierung der psychoakustischen Eigenschaften von LWP genutzt werden. Die für beide Studien ausgewählten akustischen Geräuscheszenarien entsprechen den typischen Geräuschen von im Feld installierten LWP einschließlich typischer Zustände. In den generierten Geräuscheszenarien wurde die Anzahl der Betriebszustandswechsel im Vergleich zu einem typischen Betriebszyklus erhöht. Dies geschah, um die Chance zu erhöhen, potenzielle Auswirkungen zu provozieren, da ein normaler LWP-Zyklus nur eine begrenzte Anzahl von Zustandsänderungen während der Nacht aufweist. Die Lautstärkeinstellungen wurden so gewählt, dass sie einer realistischen Betriebssituation ähneln. Die Auswahl des Schallpegels basiert auf dem höchsten gesetzlich zulässigen Lärmpegel in einem Mischgebiet nach TA Lärm. Es ist möglich, dass es in der Praxis lautere LWP gibt, aber aus ethischen Gründen wurde davon abgesehen, sich auf Systeme mit unzulässigen Schallemissionen zu konzentrieren. Dadurch können keine Annahmen über die Auswirkungen der Exposition gegenüber höheren Schallpegeln oder die Auswirkungen der Exposition gegenüber den Geräuschen mehrerer LWP getroffen werden. Die Auswirkung der Exposition gegenüber mehreren LWP könnte mit zusammentreffenden Geräuschzuständen verbunden sein.

4.3 Offene Forschungsfragen und Ausblick

Sowohl die Schlafstudie als auch die Tagestudie liefern Hinweise auf Effekte in einer Laborumgebung. Eine Laborstudie wird durchgeführt, um festzustellen, ob Effekte unter kontrollierten Bedingungen vorhanden sind. Die Ergebnisse können jedoch aus mehreren Gründen nicht direkt auf eine Feldsituation übertragen werden, vor allem wegen der fehlenden ökologischen Validität. Die Laborumgebung ist eine künstliche Umgebung, in der mögliche Störfaktoren kontrolliert werden können. LWP in Wohngebieten sind noch eine relativ neue Form der Energienutzung, aber ihre Zahl nimmt kontinuierlich zu. Indem sie nach und nach herkömmliche Heizsysteme ersetzen, tragen sie dazu bei, die mit dem Klimawandel verbundenen gesellschaftlichen Ziele eines effizienten und nachhaltigen Energieverbrauchs zu erreichen. Allerdings hatten die Versuchspersonen möglicherweise noch nicht viel Erfahrung mit LWP-Lärm in ihrem Alltag. Daher werden andere Einflussfaktoren bei Personen, die LWP-Geräuschen in ihrer Umgebung ausgesetzt sind, nicht berücksichtigt.

In dieser Laborstudie wurden Wirkungen festgestellt, die Hinweise auf die Notwendigkeit einer Feldstudie geben. Eine Feldstudie würde es ermöglichen, die Expositionssituation sowie deren

Auswirkungen unter realen Bedingungen zu erfassen, um mögliche Auswirkungen bei Personen zu bestätigen, die über einen längeren Zeitraum mit LWP-Geräuschen leben (mehr als drei Nächte über einen Zeitraum von drei Wochen). Feldstudien könnten auch zu neuen Grenzwerten für die Geräuschemission von LWP führen. Die Leitlinien der WHO für Umgebungslärm für die Europäische Region (World Health Organization, WHO, 2018) empfehlen bereits Grenzwerte für verschiedene Umweltlärmquellen wie Windkraftanlagen oder Flugzeuge. Mit ausreichend Daten könnten vergleichbare Werte für LWP abgeleitet werden.

Die Zahl der Menschen, die von zu Hause arbeiten, nimmt stetig zu. Selbst nach der Aufhebung der Maßnahmen im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie scheint es eine Verschiebung im Arbeitsumfeld zu geben. Die Menschen kehren nicht zwangsläufig ins Büro zurück, sondern es etabliert sich eine Arbeitskultur, die auch das Arbeiten aus der Ferne einschließt. Infolgedessen wünschen sich immer mehr Menschen, dass ihr Zuhause für die Fernarbeit geeignet ist. Es müssen neue Lösungen für die Vereinbarkeit des Wachstums nachhaltiger Energiesysteme und Lärmreduzierung in Wohngebieten gefunden werden. Der Regelungsbedarf sollte überprüft werden (z. B. Lage und Ausrichtung der Anlagen), um den Bedürfnissen derjenigen gerecht zu werden, die sich über den Lärm beschweren. Außerdem sollten neue technische Lösungen zur Verbesserung geprüft und entwickelt werden.

5 Quellenverzeichnis

- Agnew, H. W.; Webb, W. B.; Williams, R. L. (1966): The first night effect: an EEG study of sleep. In: *Psychophysiology*, 1966, 2, pp. 263–266.
- Ahlefeldt, T.; Jakob, A.; Möser, M.; Feldmann, J. (2006): Verbesserung der Schalldämmung eines gekippten Fensters durch schallabsorbierende Laibungsverkleidung, 32. DAGA, Braunschweig
- Akerstedt, T.; Gillberg, M. (1990): Subjective and objective sleepiness in the active individual. In: *Int. J. Neurosci.*, 52: pp. 29–37.
- Basner, M.; Brink, M. (2013): Sample size estimation for field studies on the effects of aircraft noise on sleep. In: *Applied Acoustics*, 2013, 74, pp. 812 – 817.
- Basner, M.; McGuire, S. (2018): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(3), 519. doi:10.3390/ijerph15030519.
- Basner, M.; Müller, U.; Elmenhorst, E.-M. (2011): Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. In: *Sleep*, 2011, 34, pp. 1–23.
- Berry, R.B.; Quan, S.F.; Abreu, A.R. et al. (2020): The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology, and Technical Specification. Version 2.6. American Academy of Sleep Medicine, Darien, IL
- Brown, A.L.; van Kamp, I. (2009a): Response to a change in transport noise exposure: Competing explanations of change effects. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125 (2), pp. 905-914.
- Brown, A.L.; van Kamp, I. (2009b): Response to a change in transport noise exposure: A review of evidence of a change effect. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(5), pp. 3018-3029.
- Buysse, D.J.; Reynolds, C.F.; Monk, T.H.; Hoch, C.C.; Yeager, A.L.; Kupfer, D.J. (1991): Quantification of subjective sleep quality in healthy elderly men and women using the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI). In: *Sleep*, 1991, 14(4), pp. 331-338.
- DIN 45680:1997-03, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft
- Dalbert, C. (1992): Subjektives Wohlbefinden junger Erwachsener: Theoretische und empirische Analysen der Struktur und Stabilität. In: *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 13, pp. 207-220.
- Eulitz, C.; Zobel, P.; Ost, L.; Möhler, U.; Schröder, M. (2020): Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung. Texte 134/2020, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Fasold, W. & Veres, E. (1998): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis (1. Auflage). Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Feldmann, C.; Carolus, T. (2019): Context Effect in Fan Sound Evaluation by Jury Tests Using the Method of the Semantic Differential. In: *Acta Acustica united with Acustica*, 2019, 105(1), pp. 123-129. DOI: <https://doi.org/10.3813/AAA.919293>
- Fisher, R. A. (1956). *Statistical methods and scientific inference*. Oxford, England: Hafner Publishing Co.
- Glass, D.C.; Singer, J. E. (1972): *Urban stress. Experiments on noise and social stressors*. Academic Press, New York.
- Görtelmeyer, R. (1981): SF-A und SF-B. Schlafragebogen A und B. In: CIPS(Hrsg): *Internationale Skalen für Psychiatrie*. 5. Auflage. Beltz-Test: Göttingen 2005.
- Griefahn, B.; Basner, M.; Penzel, T. (2007): Verkehrslärm – Wirkungen auf Schlaf und Leistung. Ergebnisbericht des Virtuellen Instituts 'Transportation Noise - Effects on Sleep and Performance'. Impulsfonds-Projektnummer

VH-V1-111. [https://www.dlr.de/me/](https://www.dlr.de/me/Portaldata/25/Resources/dokumente/vinesh/2007_VINESH_Abschlussbericht.pdf)

[Portaldata/25/Resources/dokumente/vinesh/2007_VINESH_Abschlussbericht.pdf](https://www.dlr.de/me/Portaldata/25/Resources/dokumente/vinesh/2007_VINESH_Abschlussbericht.pdf) (14/07/2022).

Griefahn, B.; Bising, R.; Feil, A.; Guski, R.; Hellbrück, J.; Kuhnt, S.; et al. (2007): Forschungsverbund Leiser Verkehr. Bereich 2000 ‚Lärmwirkungen‘. Abschlussbericht. Dortmund: IfADo. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/572380240.pdf> (19/07/2022)

Guttman, L. (1954): Some necessary conditions for common factor analysis. In: Psychometrika- 1954, 19, pp. 149–161.

Johns, M.W. (1991): A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. In: Sleep, 1991, 14(6), pp. 540-455.

Kaiser, H. F. (1960): The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological Measurement, 1960, 20, pp. 141–151. <http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000116>

Kötz, W.-D. (2004): Zur Frage der effektiven Schalldämmung von geöffneten Fenstern: ein klärendes Wort zur Schallpegeldifferenz außen/innen bei Fenstern in Kippstellung, In: Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 51 (2004)

Krahé, D.; Alaimo Di Loro, A.; Müller, U.; Elmenhorst, E.-M.; De Gioannis, R.; Schmitt, S.; Belke, C.; Benz, S.; Großarth, S.; Schreckenberger, D.; Eulitz, C.; Wiercinski, B.; Möhler, U. (2020): Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen. Texte 163/2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Liepert, M.; Möhler, U. (2007): Filterfunktionen zur spektralen Anpassung von Geräuschaufzeichnungen an die Innenraumsituation bei gekipptem und geschlossenem Fenster – Untersuchungsbericht Nr. 101-2482-1, im Auftrag der DB Systemtechnik

Mauelshagen, R. (o.d.): <https://www.akustikstoff.com/media/products/0900591001442653810.pdf> (15/07/2022)

Morin, C.M.; Belleville, G.; Belanger, L.; Ivers, H. (2011): The Insomnia Severity Index: Psychometric Indicators to detect Insomnia Cases and Evaluate Treatment Response. In: Sleep, 2011, 34(5), pp. 601-608.

Mühlbacher, M.; Eulitz, C.; Möhler, U. (2016): Konzepte für die Prognose tieffrequenter Schalle, 42. DAGA, Aachen

Müller, U.; Aeschbach, D.; Elmenhorst, E.-M.; Mendolia, F.; Quehl, J.; Hoff, A.; Rieger, I.; Schmitt, S.; Littel, W. (2015): Fluglärm und nächtlicher Schlaf. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenum-feld (Bd. 4). Kelsterbach: Umwelthaus gGmbH. https://www.norah-studie.de//de/publikationen.html?file=files/norah-studie.de/Downloads/NORAH_Bd4_M2_Schlaf_Endbericht.pdf (14.07.2022)

Penzel, T. (2007): Polysomnographie und Hypnogramm. In: H. Peter, T. Penzel, J.H. Peter [ed.]: Enzyklopädie der Schlafmedizin. Springer Medizin, Heidelberg, S. 930 – 941.

Schmitter, S.; Alaimo Di Loro, A.; Hemmer, D.; Schreckenberger, D.; Großarth, S.; Pörschmann, C.; Kühner, T. (2022): Noise effects of the use of land-based wind energy. Texte 70/2022. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/noise-effects-of-the-use-of-land-based-wind-energy>

Schreckenberger, D.; Großarth, S. (2021): Shooting noise annoyance in communities around German military training areas. Proceedings of Inter-Noise 2021. Washington DC, USA: 1-5 August 2021. Paper No. 1997.

Schreckenberger, D.; Guski, R.; Haubrich, J.; Spilski, J. (2019): Assessment of the impact of changes in noise exposure at an expanding airport by means of the multiple item aircraft noise annoyance scale (MIAS). Proceedings of ICA 2019, International Congress on Acoustics 9-13 September 2019, Aachen, Germany. DOI:10.18154/RWTH-CONV-239852

Schreckenberger, D.; Benz, S.; Heuschkel, C.; Schlittmeier, S.; Esser, M.; Casper, A.; Flatten, M.; Mankarios, A.; Melcher, C.; Ebermann, C.; Ludewig, E.; Brand-Sassen, K. (im Druck): Handlungsempfehlungen für eine

überzeugende Umweltberichterstattung: Nutzbarmachung von Erkenntnissen der Wahrnehmungspsychologie. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 3717 12 102 0 im Auftrag des Umweltbundesamts. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schulze, C.; Hübelt, J.; Ruhнау, M.; Krause, R.; Peusch, A. (2014): Ermittlung der Geräuschemissionen und Möglichkeiten zur Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen, Texte 71/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

TA Lärm (1998): 6. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – (TA Lärm) vom 26.08.1998 (GMBI. Nr. 26/1998).

Wellek, S.; Blettner, M. (2012): On the proper use of the crossover design in clinical trials: part 18 of a series on evaluation of scientific publications. Dtsch Arztebl Int, 2012, 109(15) pp. 276–81. DOI: 10.3238/arztebl.2012.0276

World Health Organization (WHO). (1991): Report of the informal working group on prevention of deafness and hearing impairment programme planning, 18-21 June 1991. Geneva.

World Health Organization (WHO). (2018): Environment noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.

A Anhang

A.1 Screening Fragebogen

- ▶ ESS: Epworth Sleepiness Scale (Johns, 1991)

- ▶ ISI: Insomnia Severity Index (Morin, Belleville, Belanger & Ivers, 2011)

- ▶ PSQI: Pittsburgh Sleep Quality Index (Buysse et al., 1991)

► Hörfähigkeit, Empfindlichkeit gegenüber Umweltbelastungen:

Fragen zum Screening

Hörfähigkeit |

Hörfähigkeit

Haben Sie ein Hörgerät?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Können Sie hören bzw. verstehen , was in einem Gespräch gesagt wird, wenn mehrere Personen gleichzeitig sprechen, gegebenenfalls mit Hörgerät?	<input type="checkbox"/> Ja, ohne Schwierigkeiten <input type="checkbox"/> Ja, mit leichten Schwierigkeiten <input type="checkbox"/> Ja, mit großen Schwierigkeiten

Empfindlichkeit gegenüber Umweltbelastungen

Als nächstes geht es um die **Empfindlichkeit gegenüber den Belastungen aus der Umwelt**. Für wie empfindlich halten Sie sich gegenüber...

		nicht	wenig	mittel- mäßig	ziemlich	sehr
1.	...Gerüchen?	<input type="checkbox"/>				
2.	... Stress allgemein?	<input type="checkbox"/>				
3.	... Wetter?	<input type="checkbox"/>				
4.	... Lärm?	<input type="checkbox"/>				

A.2 In der Schlafstudie verwendete Fragebögen

Deutsche Version der Karolinska-Schläfrigkeitsskala (KSS) (Akerstedt & Gilberg, 1990)

Hinweis: Dieser Fragebogen unterliegt dem Urheberrecht. Jegliche Verwendung, Veröffentlichung oder Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Autoren oder Rechteinhaber.

Die Karolinska Schläfrigkeits-Skala
KSS

Name: ...

Datum: ... Uhrzeit: ...

Wählen Sie bitte diejenige Aussage, die am besten den Grad ihrer Schläfrigkeit (bzw. Wachheit) beschreibt. Zutreffendes bitte ankreuzen. Bitte nur ein Kästchen ankreuzen!

1. Extrem wach ...	<input type="checkbox"/>
2. Sehr wach ...	<input type="checkbox"/>
3. Wach ...	<input type="checkbox"/>
4. Ziemlich wach ...	<input type="checkbox"/>
5. Weder wach noch schläfrig ...	<input type="checkbox"/>
6. Einige Anzeichen von Schläfrigkeit ...	<input type="checkbox"/>
7. Schläfrig, aber kann noch ohne Mühe wach bleiben ...	<input type="checkbox"/>
8. Schläfrig, habe Mühe wach zu bleiben ...	<input type="checkbox"/>
9. Sehr schläfrig, kann nur mit großer Mühe wach bleiben; kämpfe gegen den Schlaf ...	<input type="checkbox"/>

1

Schlaffragebogen A (SF-A) (Görtelmeyer, 1981):

Hinweis: Dieser Fragebogen unterliegt dem Urheberrecht. Jegliche Verwendung, Veröffentlichung oder Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Autoren oder Rechteinhaber.

CIPS Collegium Internationale Psychiatriae Sclaxarum	_____ _____ _____	SF-A Schlaffragebogen A
--	-------------------------	--

Anleitung: Die folgenden Fragen beziehen sich darauf, wie Sie in der letzten Nacht geschlafen haben. Kreuzen Sie bitte die Antworten an, die für Sie am ehesten zutreffen! Gehen Sie bei der Beantwortung der Fragen zügig voran und lassen Sie keine Frage aus! Bitte sofort nach dem Aufstehen morgens ausfüllen!	
1. Wann haben Sie sich gestern abend schlafen gelegt (Licht gelöscht)?	Beispiel: 2 : 15 <small>Std. Min.</small> : <small>Std. Min.</small>
2. Wie lange hat es gestern abend nach dem Lichtlöschen gedauert, bis Sie eingeschlafen waren?	weniger als 1 Minute 1 1 bis 5 Minuten 2 6 bis 15 Minuten 3 16 bis 30 Minuten 4 mehr als 30 Minuten 5
3. Woran hat es Ihrer Meinung nach gelegen, wenn Sie nicht gleich einschlafen konnten? (Mehrfachnennungen möglich)	persönliche/berufliche Probleme 1 Geräusche im Zimmer oder von draußen 2 Beschäftigung mit Tagesereignissen 3 ich mußte zur Toilette 4 Gedanken drehten sich ständig um ein Thema 5 ich war angespannt 6 ungewohnte Umgebung 7 sonstige: _____ 8
4. In der Einschlafphase hat man hin und wieder plötzlich deutliche Bildeindrücke. War dies gestern abend bei Ihnen so?	nein 1 bin nicht sicher 2 ja, sehr deutlich 3
5. Hatten Sie in der Einschlafphase Muskelzuckungen in den Armen oder Beinen?	nein 1 leicht 2 stark 3
6. Hatten Sie gestern nacht ein Stechen in der Herzgegend oder ein Ziehen im linken Arm verspürt?	nein 1 leicht 2 stark 3
7. Sind Sie gestern nach dem Einschlafen nachts wieder aufgewacht?	nein 1 ja, einmal 2 ja, zweimal 3 ja, dreimal 4 ja, mehr als dreimal 5 8
Bitte prüfen Sie ob Sie alle Fragen zutreffend beantwortet haben! Bitte umblättern!	

Hinweis: Dieser Fragebogen unterliegt dem Urheberrecht. Jegliche Verwendung, Veröffentlichung oder Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Autoren oder Rechteinhaber.

CIPS Collegium Internationale Psychiatriae Sclorum	_____ _____ _____	SF-A Schlaffragebogen A
--	-------------------------	--

8. Woran hat es Ihrer Meinung nach gelegen, wenn Sie nachts wach wurden?	persönliche/berufliche Probleme Geräusche im Zimmer oder von draußen ich mußte zur Toilette ich hatte geträumt ich hatte noch keinen richtigen Schlaf gefunden sonstige: _____	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6
9. Falls Sie in der Nacht aufgewacht sind, wie lange waren Sie insgesamt wach?	weniger als 1 Minute 1 bis 5 Minuten 6 bis 15 Minuten 16 bis 30 Minuten mehr als 30 Minuten	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
10. Können Sie sich erinnern, ob Sie heute nacht geträumt haben?	nein, ich kann mich nicht erinnern geträumt zu haben ja, ich habe geträumt, kann mich aber nicht an den Trauminhalt erinnern ja, ich habe geträumt und kann mich an den Trauminhalt erinnern	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
11. Falls Sie sich an Ihre Träume erinnern können: welche Gefühle hatten Sie während des Träumens?	angenehme Gefühle neutrale Gefühle unangenehme Gefühle	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
12. Haben Sie in der letzten Zeit nachts geschwitzt?	nein leicht stark	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
13. Wann sind Sie heute morgen aufgewacht?	Beispiel: <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="6"/> : <input type="text" value="3"/> <input type="text" value="0"/> Std. Min. Std. Min.	
14. Sind Sie heute morgen geweckt worden (Radio-Wecker, Radio, Personen etc.) oder wurden Sie von allein wach?	ich wurde von allein wach ich wurde aus dem Halbschlaf geweckt ich wurde aus dem Tiefschlaf geweckt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
15. Sind Sie heute morgen zu früh wach geworden und konnten dann nicht mehr einschlafen?	ja nein	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2
16. Haben Sie heute morgen Kopfschmerzen?	nein leicht stark	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
17. Haben Sie gestern abend nach dem Abendessen Alkohol (Bier, Wein, Schnaps) getrunken?	nein ja, über den Abend verteilt ja, unmittelbar vor dem Schlafengehen	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
18. Haben Sie gestern abend ein Schlafmittel benutzt?	nein ja	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2
19. Falls ja, welches Präparat/welche Präparate:	_____ _____	
20. War der gestrige Tag für Sie sehr anstrengend?	nein ein wenig sehr	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
Bitte prüfen Sie ob Sie alle Fragen zutreffend beantwortet haben!		Bitte umblättern!

Hinweis: Dieser Fragebogen unterliegt dem Urheberrecht. Jegliche Verwendung, Veröffentlichung oder Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Autoren oder Rechteinhaber.

CIPS Collegium Internationale Psychiatriae Sclorum	_____ _____ _____	SF-A Schlaffragebogen A
--	-------------------------	--

Anleitung: Auf dieser Seite finden Sie einige Wörter, mit denen Sie beschreiben können, wie Sie sich gestern Abend, vor dem Schlafengehen, fühlten, wie Sie heute Nacht geschlafen haben und wie Sie sich heute Morgen fühlen. Kreuzen Sie hinter jedem Wort an, in welchem Ausmaß es für Sie zutrifft! Bitte antworten Sie zügig und lassen Sie keine Zeile aus!						
		nicht	wenig	mittel	ziemlich	sehr
21. Wie haben Sie in der vergangenen Nacht geschlafen?	gleichmäßig	1	2	3	4	5
	tief	1	2	3	4	5
	unruhig	1	2	3	4	5
	entspannt	1	2	3	4	5
	ungestört	1	2	3	4	5
	gut	1	2	3	4	5
	ausgiebig	1	2	3	4	5
22. Wie fühlten Sie sich gestern vor dem Schlafengehen?	sorglos	1	2	3	4	5
	erschöpft	1	2	3	4	5
	schlafbedürftig	1	2	3	4	5
	überfordert	1	2	3	4	5
	ausgeglichen	1	2	3	4	5
	ruhig	1	2	3	4	5
	müde	1	2	3	4	5
	entspannt	1	2	3	4	5
23. Wie fühlen Sie sich heute morgen?	ausgeglichen	1	2	3	4	5
	dösig	1	2	3	4	5
	tatkraftig	1	2	3	4	5
	munter	1	2	3	4	5
	frisch	1	2	3	4	5
	ausgeschlafen	1	2	3	4	5
	entspannt	1	2	3	4	5
	Bitte prüfen Sie, ob Sie kein Wort ausgelassen haben!					
Bemerkungen/Fragen:						

Aktuelle Stimmungsskala (ASTS), Dalbert, 1992:

Hinweis: Dieser Fragebogen unterliegt dem Urheberrecht. Jegliche Verwendung, Veröffentlichung oder Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Autoren oder Rechteinhaber.

ASTS © Dalbert, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

MOMENTANES BEFINDEN

Nachfolgend finden Sie eine Liste mit Wörtern, die verschiedene Gefühle und Gefühlszustände beschreiben. Bitte lesen Sie sorgfältig jedes einzelne Wort und kreuzen Sie dann die Zahl an, die am besten Ihren Gefühlszustand **im Moment** beschreibt. Bitte machen Sie bei jeder Aussage ein Kreuz.

		sehr stark	stark	ziemlich	etwas	schwach	sehr schwach	überhaupt nicht
1	zornig	7	6	5	4	3	2	1
2	abgeschlafft	7	6	5	4	3	2	1
3	unglücklich	7	6	5	4	3	2	1
4	traurig	7	6	5	4	3	2	1
5	angenehm	7	6	5	4	3	2	1
6	betrübt	7	6	5	4	3	2	1
7	freudig	7	6	5	4	3	2	1
8	hoffnungslos	7	6	5	4	3	2	1
9	müde	7	6	5	4	3	2	1
10	verärgert	7	6	5	4	3	2	1
11	frohgemut	7	6	5	4	3	2	1
12	entmutigt	7	6	5	4	3	2	1
13	fröhlich	7	6	5	4	3	2	1
14	erschöpft	7	6	5	4	3	2	1
15	heiter	7	6	5	4	3	2	1
16	verzweifelt	7	6	5	4	3	2	1
17	wütend	7	6	5	4	3	2	1
18	entkräftet	7	6	5	4	3	2	1
19	lustig	7	6	5	4	3	2	1

Bitte überprüfen Sie nochmals, ob Sie kein Wort ausgelassen haben.

Morgenbefragung Klima

Morgenbefragung „Klima“ Seite 1

Bitte beziehen Sie sich bei Ihren Antworten auf die letzte Nacht im Schlaflabor

Raumklima im Laborschlafzimmer

Beim Aufstehen empfinde ich die **Raumtemperatur** im Laborschlafzimmer als...

- viel zu warm
- zu warm
- gerade angenehm
- zu kalt
- viel zu kalt
- weiß nicht/keine Angabe

Beim Aufstehen empfinde ich die **Luftfeuchtigkeit** im Laborschlafzimmer als...

- viel zu trocken
- zu trocken
- gerade richtig
- zu feucht
- viel zu feucht
- weiß nicht/keine Angabe

Beim Aufstehen empfinde ich die **Luftqualität** im Laborschlafzimmer als...

- sehr abgestanden
- abgestanden
- neutral
- frisch
- sehr frisch
- weiß nicht/keine Angabe

Insgesamt empfinde ich beim Aufstehen das **Raumklima** im Laborschlafzimmer als...
angenehm.

- nicht
- wenig
- mittelmäßig
- ziemlich
- sehr

...angenehm.

Lichtverhältnisse im Laborschlafzimmer

Die **Lichtverhältnisse** im Laborschlafzimmer empfinde ich als ... für meine Schlafqualität.

- sehr angenehm
- angenehm
- neutral
- unangenehm
- sehr unangenehm
- weiß nicht/keine Angabe

Beim Aufstehen empfinde ich die **Luftfeuchtigkeit** im Laborschlafzimmer als...

- viel zu trocken
- zu trocken
- gerade richtig
- zu feucht
- viel zu feucht
- weiß nicht/keine Angabe

Umgebungsqualität im Laborschlafzimmer

Alles in allem bin ich mit der **Umgebungsqualität** im Laborschlafzimmer ...
zufrieden.

- sehr zufrieden
- zufrieden
- neutral
- unzufrieden
- sehr unzufrieden
- weiß nicht/keine Angabe

Morgenbefragung „Klima“ Seite 2

Bitte beziehen Sie sich bei Ihren Antworten auf die letzte Nacht im Schlaflabor

Geräusche im Laborschlafzimmer

		überhau pt nicht	etwas	mittel- mäßig	stark	äußerst
Wie stark wurden Sie durch Geräusche in den folgenden Situationen insgesamt gestört?						
1.	... beim Einschlafen?	<input type="checkbox"/>				
2.	... beim Nachtschlaf?	<input type="checkbox"/>				
3.	... beim Ausschlafen am Ende der Schlafzeit?	<input type="checkbox"/>				
<i>Falls etwas – äußerst:</i>						
4.	Welche(s) Geräusch(e) haben Sie gestört?	_____ (Freitext)				
		überhau pt nicht	etwas	mittel- mäßig	stark	äußerst
Wenn Sie einmal an die vergangene Nacht im Laborschlafzimmer denken, wie stark haben Sie sich durch Geräusche gestört oder belästigt gefühlt?						
5.		<input type="checkbox"/>				
<i>Falls etwas – äußerst:</i>						
6.	Welche(s) Geräusch(e) haben Sie gestört?	_____ (Freitext)				

Gerüche im Laborschlafzimmer

		überhau pt nicht	etwas	mittel- mäßig	stark	äußerst
Wenn Sie einmal an die vergangene Nacht im Laborschlafzimmer denken, wie stark haben Sie sich durch Gerüche gestört oder belästigt gefühlt?						
1.		<input type="checkbox"/>				
<i>Falls etwas – äußerst:</i>						
2.	Welcher Geruch/welche Gerüche haben Sie gestört?	_____ (Freitext)				

A.3 Fragebogen für die Tagesstudie

a) **Imaginierte Wohnzimmersituation:** Stellen Sie sich vor, Sie sitzen mittags in einem/ihrem(?) Wohnzimmer und lesen. Bitte lesen Sie diesen Text. Zwischendurch werden wir Sie bitten, ein paar allgemeine Fragen zu beantworten. Am Ende der Untersuchung werden wir Ihnen dann Fragen zum Text stellen.

b) **Instruktion Lesen:** Bitte lesen Sie diesen Text. Zwischendurch werden wir Sie bitten, ein paar allgemeine Fragen zu beantworten. Am Ende der Untersuchung werden wir Ihnen dann Fragen zum Text stellen.

Bitte füllen Sie die folgenden Fragen aus. Sind Sie sich bei einer Frage nicht sicher, so wählen Sie die Antwortmöglichkeit aus, die am ehesten zutrifft.

1. Nehmen Sie gerade in diesem Raum ein dauerhaftes Geräusch im Hintergrund mit Ihren Sinnen wahr? (Mehrfachnennungen möglich)

- ₁ ja, ich kann es mit meinen Ohren hören.
₂ ja, ich kann es mit meinen Ohren wahrnehmen, aber nicht als Geräusch.
₃ ja, ich nehme es über einen anderen Sinn wahr, nämlich _____.
₄ nein, ich nehme nichts wahr.

Wenn Sie mit „nein, ich nehme nichts wahr“ geantwortet haben, machen Sie direkt bei Frage 21 weiter.

2. Wenn 1=ja: Worum handelt es sich bei diesem Geräusch im Hintergrund? Was ist das für eine Art Geräusch im Hintergrund?

(Freitext)

3. Das Geräusch im Hintergrund hat mich beim Lesen gestört.

Stimmt ...
nicht wenig mittelmäßig ziemlich sehr
₁ ₂ ₃ ₄ ₅

4. Ich konnte mich wegen des Geräusches im Hintergrund nicht auf den Text konzentrieren.

Stimmt ...
nicht wenig mittelmäßig ziemlich sehr
₁ ₂ ₃ ₄ ₅

5. Das Geräusch im Hintergrund hat mich vom Lesen abgelenkt.

Stimmt ...
nicht wenig mittelmäßig ziemlich sehr
₁ ₂ ₃ ₄ ₅

6. Ich musste den Text mehrmals lesen, um ihn zu verstehen.

Stimmt ...
nicht wenig mittelmäßig ziemlich sehr
₁ ₂ ₃ ₄ ₅

7. Es hat mich angestrengt, den Text zu lesen.

- | | Stimmt ...
nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | wenig
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | ziemlich
<input type="checkbox"/> ₄ | sehr
<input type="checkbox"/> ₅ |
|------------|---|--|--|---|--|
| 8. | Alles in allem fühle ich mich durch das Geräusch ... gestört oder belästigt. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 9. | Das Geräusch beunruhigt mich. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 10. | Das Geräusch bereitet mir schlechte Laune. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 11. | Die Störung durch das Geräusch ärgert mich. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 12. | Das Geräusch bereitet mir Unbehagen. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 13. | Die Ablenkung durch das Geräusch regt mich auf. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 14. | Ich kann mich vor der Ablenkung durch das Geräusch gut schützen. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 15. | Ich kann das Geräusch beim Lesen gut „ausblenden“. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 16. | Ich konzentriere mich auf das Lesen und das Geräusch stört mich dann gar nicht mehr. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 17. | Ich fühle mich dem Geräusch ausgeliefert. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |
| 18. | Ich habe mich mit dem Geräusch abgefunden. | | | | |
| | überhaupt nicht
<input type="checkbox"/> ₁ | etwas
<input type="checkbox"/> ₂ | mittelmäßig
<input type="checkbox"/> ₃ | stark
<input type="checkbox"/> ₄ | äußerst
<input type="checkbox"/> ₅ |

19. Wenn Frage 1=ja:
Bitte geben Sie auf der Skala für folgende Wortpaare an, wie Sie das Geräusch empfinden.
 Bitte machen Sie in jeder Zeile nur 1 Kreuz.

a.	aggressiv	<input type="checkbox"/>	entspannt						
b.	aufdringlich	<input type="checkbox"/>	unaufdringlich						
c.	billig	<input type="checkbox"/>	hochwertig						
d.	schrill	<input type="checkbox"/>	dumpf						
e.	dunkel	<input type="checkbox"/>	hell						
f.	grob	<input type="checkbox"/>	sanft						
g.	hart	<input type="checkbox"/>	weich						
h.	hohl	<input type="checkbox"/>	massiv						
i.	klein	<input type="checkbox"/>	groß						
j.	schwach	<input type="checkbox"/>	stark						
k.	langsam	<input type="checkbox"/>	schnell						
l.	laut	<input type="checkbox"/>	leise						
m.	leistungsschwach	<input type="checkbox"/>	leistungsstark						
n.	niedertourig	<input type="checkbox"/>	hohtourig						
o.	rau	<input type="checkbox"/>	glatt						
p.	kraftlos	<input type="checkbox"/>	kräftig						
q.	schwer	<input type="checkbox"/>	leicht						
r.	statisch	<input type="checkbox"/>	bewegt						
s.	scharf	<input type="checkbox"/>	stumpf						
t.	tief	<input type="checkbox"/>	hoch						
u.	unangenehm	<input type="checkbox"/>	angenehm						
v.	ungleichmäßig	<input type="checkbox"/>	gleichmäßig						
w.	unruhig	<input type="checkbox"/>	ruhig						

20. Wenn Frage 1=ja:
Bitte geben Sie für folgende Beschreibungen an, wie sehr sie auf das Geräusch zutreffen, von (1) völlig bis (7) überhaupt nicht.

		völlig			überhaupt nicht			
a.	ausblendbar	<input type="checkbox"/>						
b.	brummend	<input type="checkbox"/>						
c.	dröhnend	<input type="checkbox"/>						
d.	fluktuierend	<input type="checkbox"/>						
e.	lästig	<input type="checkbox"/>						
f.	pfeifend	<input type="checkbox"/>						
g.	rauschhaft	<input type="checkbox"/>						
h.	röhrend	<input type="checkbox"/>						
i.	schleifend	<input type="checkbox"/>						
j.	schwankend	<input type="checkbox"/>						
k.	störend	<input type="checkbox"/>						
l.	tonhaltig	<input type="checkbox"/>						
m.	zischend	<input type="checkbox"/>						

21. Wenn Frage 1 = nein: Bitte beantworten Sie Frage 21 – 31.

Ich konnte mich nicht auf den Text konzentrieren.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

22. Ich musste den Text mehrmals lesen, um ihn zu verstehen.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

23. Es hat mich angestrengt, den Text zu lesen.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

24. Ich bin entspannt.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

25. Ich bin beunruhigt.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

26. Ich bin schlecht gelaunt.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

27. Ich bin nervös.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

28. Ich fühle mich wohl.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

29. Ich fühle mich unbehaglich.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

30. Ich bin aufmerksam.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

31. Ich bin abgelenkt.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

Wenn Sie mit der Beantwortung der Fragen fertig sind, wenden Sie sich bitte an die Versuchsleitung.

Abschlussfragen zum Text

Nun haben wir noch Fragen, die sich auf den gesamten Versuchsablauf beziehen.

31. Die Texte waren einfach zu verstehen.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

32. Einige Wörter in den Texten waren mir unbekannt.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

33. Ich hatte Probleme den Texten zu folgen.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

34. Die Botschaft der Texte kann ich in wenigen Sätzen wiedergeben.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

35. Ich bin geübt im Lesen solcher Texte.

Stimmt ...

nicht ₁ wenig ₂ mittelmäßig ₃ ziemlich ₄ sehr ₅

36. Das Lesen der Texte hat mir Freude bereitet.

Stimmt ...

nicht
1

wenig
2

mittelmäßig
3

ziemlich
4

sehr
5

37. Der Inhalt der Texte hat mich interessiert.

Stimmt...

nicht
1

wenig
2

mittelmäßig
3

ziemlich
4

sehr
5

38. Das Lesen von Texten, die eine ähnliche Schwierigkeit wie die gelesenen Texte aufweisen, ist Alltag für mich.

Stimmt...

nicht
1

wenig
2

mittelmäßig
3

ziemlich
4

sehr
5

39. Es hat Spaß gemacht die Texte zu lesen.

Stimmt...

nicht
1

wenig
2

mittelmäßig
3

ziemlich
4

sehr
5

40. Die Texte waren spannend.

Stimmt...

nicht
1

wenig
2

mittelmäßig
3

ziemlich
4

sehr
5

Abschlussfragen

Ihr Schlafverhalten in dieser Studie und die Angaben, die Sie in der heutigen Tagesuntersuchung gemacht haben können von Ihren Vorerfahrungen zuhause abhängen. Diese wiederum können verbunden sein mit den Wohnbedingungen und den Gebäudemerkmalen in Ihrem Zuhause.

Daher haben wir zum Abschluss die folgenden Fragen zu Ihren Wohnbedingungen:

Wohnbedingungen

Gebäudetyp der Wohnung/des Hauses der Untersuchungsperson

In welcher Art von Gebäude wohnen Sie?

- freistehenden Einfamilienhaus
- Reihenendhaus
- Reihemittelhaus
- Doppelhaushälfte
- Wohnung in einem mehrstöckigen Mehrfamilienhaus

Fensterart in der Wohnung der Untersuchungsperson

Fensterart, Lüftungsgewohnheiten

Welche Verglasung haben die Fenster im Wohnraum Ihrer Wohnung bzw. Ihres Hauses (Hauptwohnraum)?

- einfache Fensterscheiben
- Doppelverglasung oder Doppelfenster (Isolierglas, Kastenfenster)
- Schallschutzfenster, Dreifachverglasung oder Fenster mit dicken Scheiben
- Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüftern
- Weiß nicht/keine Angabe

Welche Verglasung haben die Fenster in Ihrem Schlafzimmer?

- einfache Fensterscheiben
- Doppelverglasung oder Doppelfenster (Isolierglas, Kastenfenster)
- Schallschutzfenster, Dreifachverglasung oder Fenster mit dicken Scheiben
- Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüftern
- Weiß nicht/keine Angabe

Wie ist das bei Ihnen üblicherweise in den warmen Jahreszeiten?

	geschlossen	gekippt	geöffnet
Haben Sie nachts die Fenster in Ihrem Schlafzimmer überwiegend geschlossen, gekippt oder geöffnet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie haben Sie nachts die Fenster in Ihren Wohnräumen überwiegend?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie bei sich zuhause im Schlafzimmer eine Klimaanlage, eine Lüftungsvorrichtung oder ähnliches?	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja, eine Klimaanlage <input type="checkbox"/> ja, eine Lüftungsvorrichtung <input type="checkbox"/> Ja, sonstiges und zwar: _____		

Sichtverbindung in der Wohnung zur Strasse

Ausrichtung des Wohn- und Schlafzimmers

Wie ist/war die Ausrichtung Ihres Wohnraums (Hauptwohnraum) zur Straße mit dem meisten Verkehr in Ihrem Wohngebiet?	<input type="checkbox"/> von der Straße abgewandt <input type="checkbox"/> seitlich zur Straße ausgerichtet <input type="checkbox"/> der Straße zugewandt
Hinweis: Bei Kreuzung gleich stark befahrener Straßen bezieht sich die Frage auf die Ausrichtung zur Straßenkreuzungsmitte.	
Wie ist/war die Ausrichtung Ihres Schlafzimmers zur Straße mit dem meisten Verkehr in Ihrem Wohngebiet?	<input type="checkbox"/> von der Straße abgewandt <input type="checkbox"/> seitlich zur Straße ausgerichtet <input type="checkbox"/> der Straße zugewandt
Hinweis: Bei Kreuzung gleich stark befahrener Straßen bezieht sich die Frage auf die Ausrichtung zur Straßenkreuzungsmitte.	

Corona-Fragen

Corona-Fragen

Hat sich mit den Einschränkungen der Corona-Pandemie Ihre Schlafqualität verändert?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
---	--

Wenn ja, wie?

Hat sich mit den Einschränkungen der Corona-Pandemie Ihre Schlafdauer verändert?

- ja
 nein

Wenn ja, wie?

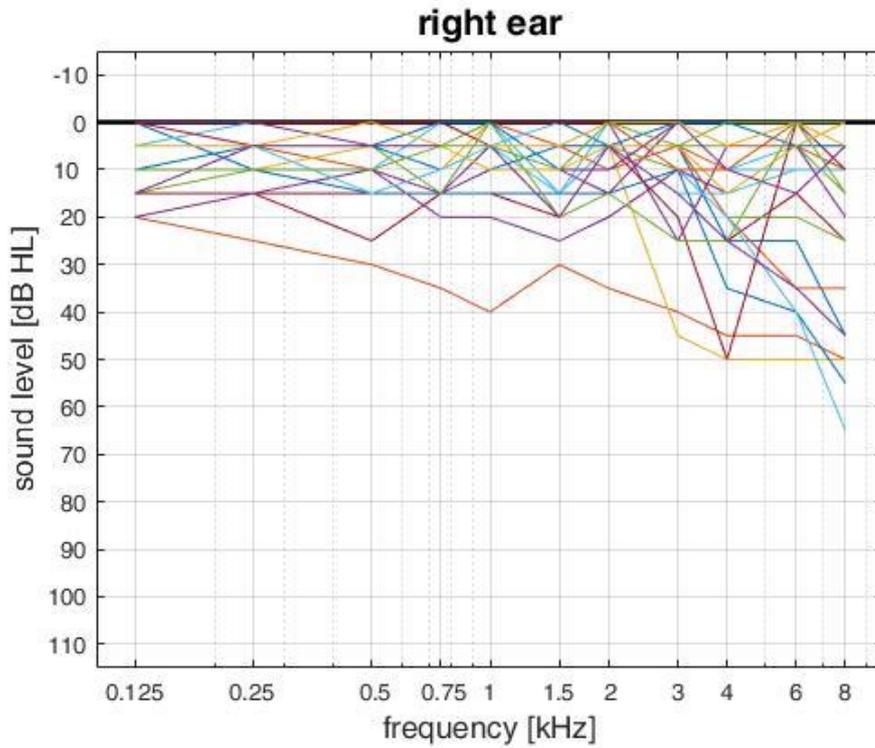
Haben Sie mit den Einschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie sonstige Veränderungen bezüglich Ihres Schlafs bemerkt?

- ja
 nein

Wenn ja, wie?

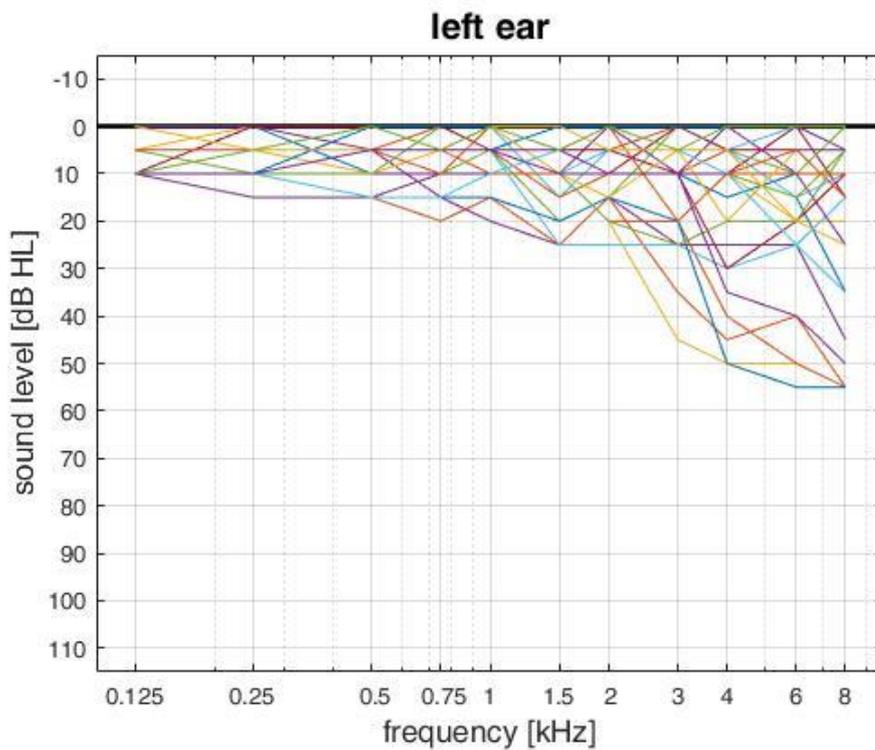
A.4 Audiometrie

Abbildung A 1: Ergebnisse der Audiometrie, rechts Ohr



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 2: Ergebnisse der Audiometrie, linkes Ohr



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.5 Aufzeichnung des Audiomaterials

Die Außeneinheiten verschiedener LWP-Typen und -hersteller wurden bei realen Betriebszuständen aufgezeichnet (Tabelle A 1). Eine im Vorfeld der Messreihe durchgeführte Recherche ergab, dass es technologisch bedingte Gemeinsamkeiten bei den LWP gibt. Diese verursachen neben einem Lüftungsrauschen typischerweise tonale Geräuschkomponenten im tieffrequenten Bereich zwischen 50 Hz und 200 Hz (Schulze et al., 2014).

Ebenso finden sich jedoch auch hersteller-/bauart-/altersbedingte oder sonstige Unterschiede (Schaltgeräusche, tonale Anteile, Frequenzlage usw.). Für die Geräuschszenarien wurden daher drei charakteristische LWP von verschiedenen Herstellern und an unterschiedlichen Standorten herangezogen (Abbildung A 3).

Abbildung A 3: Luftwärmepumpen bei der Aufzeichnung des Audiomaterials



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Tabelle A 1: Technische Daten der gemessenen Wärmepumpen

Gerät	LWP 1	LWP 2	LWP 3
Bezeichnung	Vaillant VWL 11/4 SA	2Daikin ERLQ011CAW1	Rotex RRLQ008CAV3
Typ	Raumheizung/ Warmwasser	Raumheizung/ Warmwasser	Raumheizung/ Warmwasser
Innen/Außengerät	Außeneinheit eines Split- Geräts	Außeneinheit eines Split- Geräts	Außeneinheit eines Split- Geräts
Nennwärmeleistung	11,5 kW	11,2 kW	8 kW
angegebener Schalleistungspegel	LWA 56 dB(A)	LWA 64 dB(A)	LWA 62 dB(A)
Aufstellort	Freistehend	An Hauswand	Freistehend

Die Aufzeichnungen wurden im Februar 2020 durchgeführt. Insgesamt wurden im Rahmen der Messreihe über fünf Stunden Audiomaterial gesammelt. Darin finden sich Ein- und Ausschaltvorgänge sowie Lastwechsel und der stationäre Dauerbetrieb. Aufgrund der

Witterungsverhältnisse wurde keine Vereisung des Verdampfers festgestellt, sodass die abgestrahlten Geräusche während des Enteisungsprozesses nicht aufgezeichnet werden konnten. Diese mussten mittels spektraler Filterung und Anpassungen im Pegel-Zeit-Verlauf während der vorhergehenden Vereisung der Anlage simuliert werden.

Die abgestrahlten Geräusche wurden jeweils an mindestens zwei verschiedenen Messpunkten aufgezeichnet. Aufgrund der freistehenden Position der LWP 1 (vgl. Fotodokumentation) wurden hierbei fünf Messpunkte gewählt. Zur Pegelkontrolle wurden während aller Messungen auch der Schalldruckpegel (L_{Aeq} , L_{AF} , L_{AFTm5}) aufgezeichnet. Folgende Messtechnik kam dabei zum Einsatz:

Audioaufzeichnung

- ▶ 2 Stk. ½“-Messmikrofone MTG MK 221 (Microtech Gefell)
- ▶ 2 Stk. Mikrofonvorverstärker MTG MV 225.1 (Microtech Gefell)
- ▶ RME Fireface UFX II
- ▶ je 1 Stk. Windschirm MTG W2
- ▶ Magix Samplitude 11

Pegelkontrolle

- ▶ Handschallpegelmesssystem „Tango Plus“ (SINUS Messtechnik)
- ▶ Geeichter akustischer Kalibrator Larson Davis CAL200
- ▶ 1Stk. Windschirm

Während des Dauerbetriebs wurden in ca. 0,5 m Entfernung Schalldruckpegel zwischen $L_{Aeq} = 56$ dB und $L_{Aeq} = 62$ dB, gemessen. Während der Aufzeichnungen traten vereinzelte Störgeräusche wie Vogelgezwitscher, Pkw-Vorbeifahrten, Wind- und Kommunikationsgeräusche auf. Diese wurden protokolliert und für die weitere Verarbeitung des Tonmaterials verworfen.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Anhang A.10 protokolliert. Dargestellt sind die mittleren fast-bewerteten Terz- und Schmalbandspektren (1,56 Hz Bandbreite) während des Dauerbetriebs, jeweils auf einen Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 60$ dB normiert. Exemplarisch sind zudem Lastwechsel und Einschaltvorgänge der einzelnen Geräte in Form von Pegel-Zeit-Verläufen und Frequenzspektren während der einzelnen Betriebszustände dargestellt. Eine Fotodokumentation der Aufzeichnungen findet sich in Anhang A.6.

A.6 Fotodokumentation der Audioaufnahme

Abbildung A 4: Fotodokumentation LWP 1

Außeneinheit



Innenraumeinheit



Messaufbau



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 5: Fotodokumentation LWP 2

Außeneinheit



Technische Daten



Messaufbau



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 6: Fotodokumentation LWP 3

Außeneinheit



Technische Daten



Messaufbau



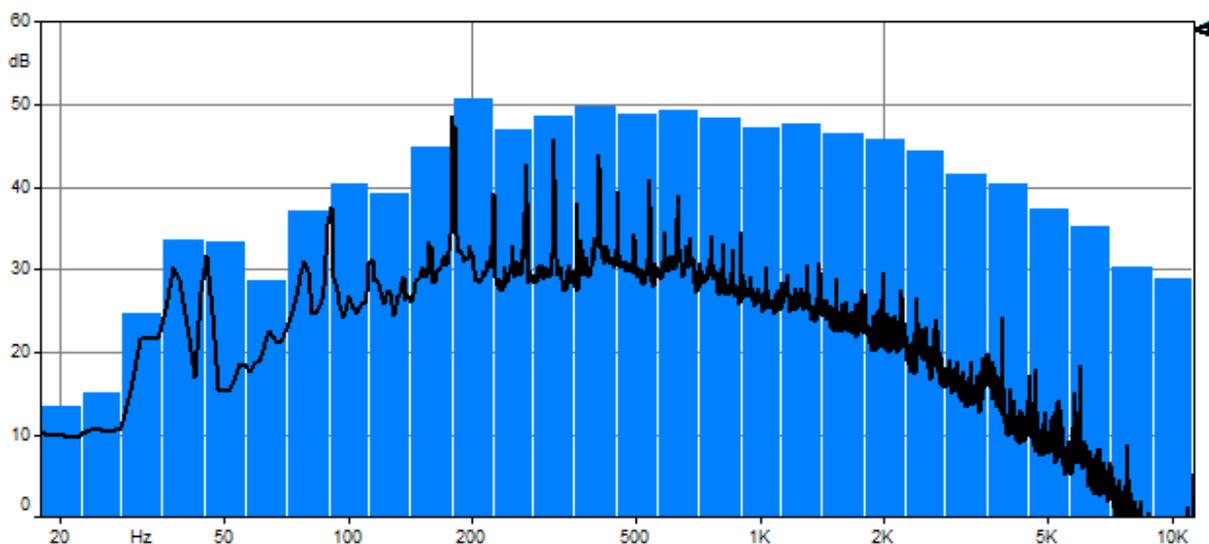
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.7 Auswahl einer Luftwärmepumpe für die Geräuschszenarien

Da über aktuelle Absatzzahlen und Marktanteile verschiedener LWP-Modelle keine belastbaren Angaben ermittelt werden konnten, wurde die Auswahl der LWP auf Grundlage der Geräuschcharakteristik des erhobenen Audiomaterials sowie der Geräteleistung durchgeführt.

Die Nennwärmeleistung der aufgezeichneten LWP lag im Bereich von 8 kW (LWP3) bis 11,5 kW (LWP1). Die Leistung der LWP2 beträgt 11,2 kW und bildet damit den Durchschnitt am besten ab. Auf Grundlage der erhobenen Messdaten wurde daher die LWP 2 als repräsentative Anlage für die Generierung der Stimuli ausgewählt. Abbildung A.7 zeigt das mittlere A-bewertete Terzpegelspektrum (blaue Balken) sowie ein Schmalbandspektrum (Bandbreite 1,56 Hz, schwarze Linie) der ausgewählten LWP2 im Dauerbetrieb, jeweils auf einen Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 60 \text{ dB(A)}$ normiert. Es zeigt sich, dass das Spektrum den für Luft-Wasser-Wärmepumpen typischen Verlauf aufweist: Im tieffrequenten Bereich zeigen sich deutliche tonale Anteile, während das Geräusch zu höheren Frequenzen hin abnimmt.

Abbildung A 7: A-bewertetes Terzpegelspektrum der ausgewählten LWP2 im Dauerbetrieb, normiert auf 60 dB(A)



Anmerkung. Blaue Balken = A-bewertetes Terzpegelspektrum, schwarze Linie = Schmalband Spektrum.

Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.8 Simulation der Außen-Innen-Übertragung

Zur spektralen Anpassung wurde das zuvor beschriebene Geräuschszenario mit Filterfunktionen in Terzbandbreite getrennt für die Schalldämmung eines Fensters in Kippstellung und eines geschlossenen Fensters gefiltert. Durch die verschiedenen Betriebszustände und simulierten Fensterstellungen (gekippt und geschlossen) ergeben sich unterschiedlich hohe Geräuschpegel während der Untersuchungsächte.

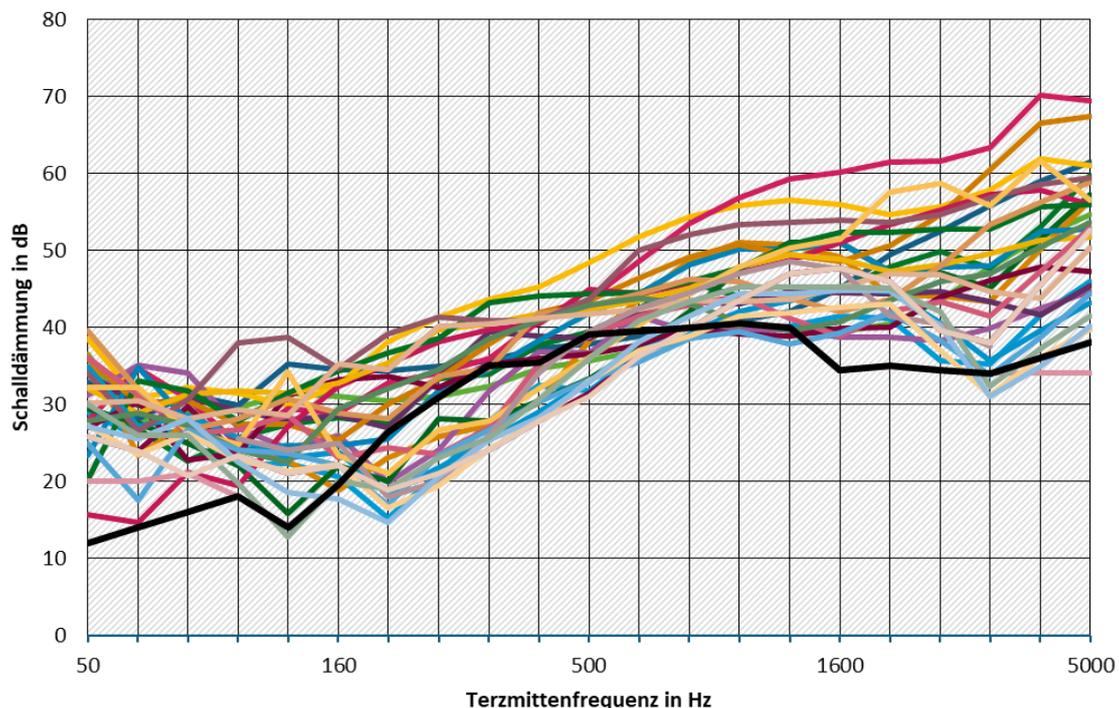
A.8.1 Lärmbedingung „Geschlossenes Fenster“

Für die Bedingung „geschlossenes Fenster“ wurde ein Standard-Isolierglasfenster mit 2-fach-Verglasung der Schallschutzklasse 2 (d.h. ein Schalldämmmaß etwa von $R_w = 32$ dB, ohne besonderen Schallschutz) gewählt. Grund für diese Auswahl ist die Annahme, dass in Gebieten, in denen es zu Beschwerdefällen wegen LWP-Geräuschen kommt, bei der Auswahl der Fenster im Wesentlichen auf den Wärmeschutz, nicht aber auf den Schallschutz geachtet wird, weil dort mit vergleichsweise geringer Lärmbelastung (bspw. durch Verkehrslärm) zu rechnen ist.

Um eine repräsentative Kurve für das frequenzabhängige Schalldämmmaß zu finden, wurde im ersten Schritt eine Recherche nach verschiedenen Ausführungen dieses Fenstertyps durchgeführt. So wurden Informationen über einen ungefähren Bereich gewonnen, in dem sich die Schalldämmung der verschiedenen Fenster bewegt. Anschließend wurde für die Stimuli eine konkrete frequenzabhängige Kurve ausgewählt.

Die frequenzabhängige Schalldämmung des geschlossenen Fensters wurde einer früheren Untersuchung entnommen (Liepert & Möhler, 2007). Abbildung A 8 stellt die darin verwendete Kurve (fett, schwarz) im Vergleich zum Ergebnis der durchgeführten Literaturrecherche (farbig) dar.

Abbildung A 8: Dämmspektren verschiedener (geschlossener) Fenster



Anmerkung. Farbig: Dämmspektren „reale“ Fenster, Schwarz: Liepert & Möhler, 2007.

Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Eine Mittelwertbildung über verschiedene Übertragungskurven ist nicht zweckmäßig, da diese den charakteristischen Verlauf der Kurven (z.B. durch Reflexionen zwischen den Scheiben kommt es bspw. zu Peaks in der Kurve) verfälschen würde. Diese sollten möglichst realitätsnah beibehalten werden.

Es zeigt sich, dass die Kurve aus der Untersuchung von 2007 im mittleren Frequenzbereich der Schalldämmung handelsüblicher Fenster gleicht. Im Bereich ausgeprägt hoher und tiefer Frequenzen zeigt die Kurve hingegen eine (deutlich) geringere Schalldämmung als die zum Vergleich dargestellten Fenster. Jedoch wurde die Kurve im Frequenzbereich < 100 Hz und $> 3,15$ kHz linear extrapoliert, was den unterschiedlichen Verlauf in den Grenzbereichen begründet. Die Abweichungen in den Randbereichen < 100 Hz und $> 3,15$ kHz sollen im Folgenden durch eine Änderung der Extrapolation minimiert werden.

Die in Liepert und Möhler (2007) verwendete Kurve eignet sich (mit Ausnahme der Randbereiche) zum einen gut für die hier verfolgten Zwecke, da sie keine zu hohe Schalldämmung aufweist. Lärmkonflikte durch LWP in der Nachbarschaft sind insbesondere in ruhigen Wohngebieten zu erwarten. Aufgrund der dort vorherrschenden ruhigen Umgebungslärmbedingungen ist entsprechend von Fenstern mit vergleichsweise geringer Schalldämmung auszugehen. Schallschutzfenster sind in ruhigen Wohngebieten hingegen kaum zu erwarten. Zum anderen weist die Kurve zwar einen typischen Frequenzverlauf auf, zeigt jedoch keine spezifischen Eigenschaften, wie sie bei der Verwendung der Kurve eines realen Fensters auftreten würden. Die späteren Untersuchungsergebnisse lassen sich somit auf verschiedene Fenstertypen übertragen. Zugleich wird durch die Verwendung einer geringen Schalldämmung erneut eine „Worst-Case-Situation“ erzeugt.

A.8.2 Lärmbedingung „Gekipptes Fenster“

Die Schalldämmung des gekippten Fensters wird von der Spaltöffnung bestimmt und ist dementsprechend nahezu frequenzunabhängig. Die genutzte Filterfunktion eines Fensters in Kippstellung (bei 80 mm maximaler Spaltbreite) entstammt einer Veröffentlichung von Kötz (2004). Bezogen auf die Fensterfläche (Glasfläche und Spaltfläche) ergibt sich ein bewertetes Schalldämm-Maß von 11 dB.

Abbildung A 9 zeigt die Kurve nach Kötz (2004) im Vergleich zu zwei gemessenen Dämmspektren (Ahlenfeldt, et al., 2006). Es zeigt sich, dass die Kurve nach Kötz im ausgeprägt tieffrequenten Bereich deutlich von den Messungen von Ahlenfeldt et al. (2006) abweicht. Im Frequenzbereich > 200 Hz zeigen die Kurven jedoch einen ähnlichen Verlauf und liegen in einem vergleichbaren Pegelbereich. Auf die Abweichungen im tieffrequenten Bereich soll im Folgenden durch eine Änderung der Extrapolationsmethode reagiert werden.

Abbildung A 9: Frequenzabhängige Schalldämmung verschiedener Fenster in Kippstellung



Anmerkung. Farbige: aus Ahlenfeldt et al. (2006), Schwarz: aus Kötz (2004).

Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

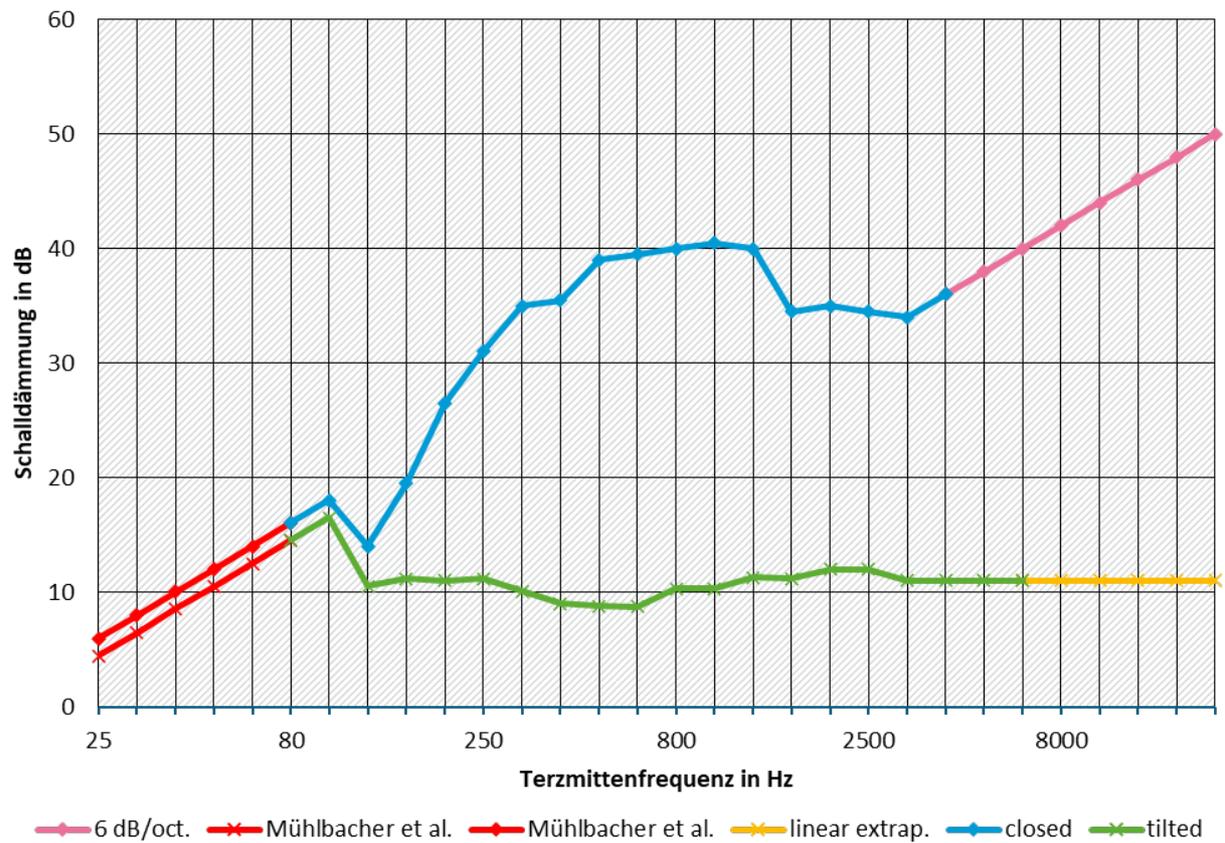
A.8.3 Extrapolation fehlender Werte

Die Filterfunktionen für die Anpassung der Geräuschszenarien müssen anstelle der in bauakustischen Messungen sonst üblichen Darstellungen zwischen 100 Hz und 3,15 kHz den gesamten Hörbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz umfassen. Für die Extrapolation der fehlenden Werte im hochfrequenten Bereich wurde auf Grundlage des Berger'schen Massegesetzes (Fasold & Veres, 1998) mit einer Zunahme der Schalldämmung um 6 dB pro Oktave gerechnet. Für den tieffrequenten Bereich < 100 Hz wurde die Prognoseformel von Mühlbacher et al. (2016) herangezogen:

$$dL_{Terz} = [20 * \log(f_{Terz}) + R'(100Hz) - 40] dB$$

Dies bedeutet, dass im Bereich < 100 Hz und > 3,15 kHz von den in den Quellen dargestellten Kurven abgewichen wurde. Auf diese Weise ergibt sich eine bessere Übereinstimmung mit den im Rahmen der Literaturrecherche gesammelten Dämmspektren handelsüblicher Fenster. Die aus den o.g. Quellen kombinierten Filterfunktionen, die für die beiden Fensterkonditionen verwendet wurden, sind in Abbildung A 10 dargestellt.

Abbildung A 10: Frequenzabhängige Filterfunktionen der beiden Fensterkonditionen „gekipptes Fenster“ und „geschlossenes“ Fenster



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.9 Messaufbau und Durchführung

A.9.1 Auswahl der Räumlichkeiten

In den Räumlichkeiten des ASR in Berlin standen potenziell mehrere Schlafräume für die Untersuchungs Nächte der Studie zur Verfügung. Um für die Durchführung der Untersuchungs Nächte einen geeigneten Schlafräum auszuwählen, wurden raumakustische Messungen durchgeführt. Auf Grundlage der Messergebnisse wurden zwei Räume ausgewählt, in denen die Schlafstudie und die Tagesstudie durchgeführt wurden.

Vorbereitende Messungen

Im Rahmen der raumakustischen Messungen wurden die Ruheschallpegel sowie die Nachhallzeiten der zur Auswahl stehenden Räume ermittelt, um herauszufinden, welche Räume für die Studiendurchführung am besten geeignet sind.

Um die Dauer der Studiendurchführung zu minimieren, sollte ein identischer Messaufbau in zwei Schlafräumen installiert werden, um mehrere Versuchspersonen in derselben Nacht einladen zu können. Um für diesen Fall die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen zu gewährleisten, war es wichtig, dass die Räume aus raumakustischer Sicht keine wesentlichen Unterschiede aufweisen, die das Messergebnis beeinflussen können.

Für die Auswahl der Räumlichkeiten wurden deshalb in der Nacht vom 27. auf den 28. Juni 2019 die Umgebungsgeräusche sowie die Nachhallzeiten in den verschiedenen Schlafräumen gemessen. Zwei der untersuchten Räume befinden sich auf der Straßenseite gelegen, ein Raum ist zum Innenhof hin ausgerichtet und ein Raum liegt vollständig im Innern des Gebäudes, verfügt also über kein Fenster. Die Größe der Räume liegt zwischen 8 und 13 m²; alle Räume verfügen über eine Deckenhöhe von 2,65 m. Im Anhang 0 findet sich eine fotografische Dokumentation der Schlafräume sowie der Messaufbauten.

A.9.2 Gemessene Ruheschallpegel

Die Dauermessung ergab in der ersten Nachthälfte in allen Räumen Ruheschallpegel zwischen 18 und 22 dB(A). In den straßenseitig gelegenen Räumen sowie im fensterlosen Raum blieb das Umgebungsgeräusch über den gesamten Messzeitraum auf einem ähnlich niedrigen Niveau. Im Zimmer mit Fenster zum Hof stieg der Innenraumpegel in der zweiten Hälfte des Messzeitraums jedoch auf bis zu 30 dB(A) an. Dieser Pegelanstieg ist auf eine Lüftungsanlage zurückzuführen, die sich in unmittelbarer Nähe zum Fenster an der Gebäudefassade befindet.

Der Betrieb dieser Lüftungsanlage lässt sich nach Rücksprache mit den Betreibern nicht über die gesamte Dauer der Studiendurchführung vermeiden. Da ein solches Störgeräusch die Messergebnisse beeinflussen könnte, sind Räume mit Fenstern in Richtung Innenhof für die Studiendurchführung ungeeignet.

Das Zimmer ohne Fenster weist den geringsten Ruheschallpegel auf, da hier kein Straßenverkehrsgeräusch in den Raum gelangt. Zwar ist ein niedriger Ruheschallpegel für den Untersuchungszweck prinzipiell erstrebenswert. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit ein fensterloser Schlafräum es ermöglicht, eine realitätsnahe Geräuschsituation für die Versuchspersonen zu simulieren, da die Geräuschdarbietung den Schalleinfall „durch ein geschlossenes bzw. gekipptes Fenster“ abbilden soll.

Im Hinblick auf das Ziel, während der Studien eine möglichst alltagsnahe Umgebung zu schaffen, erweisen sich demnach die Räume mit Fenstern in Richtung Straße als am besten geeignet. Zwar sind Störschalleinflüsse, bspw. durch Straßenverkehrslärm, in diesen Räumen nicht vollständig auszuschließen. Jedoch liegen die gemessenen Innenraumpegel in einem derart niedrigen Pegelbereich, dass ein ausreichender Pegelabstand zwischen den eingespielten Stimuli (LWP-Geräusche) und dem vorherrschenden Ruhepegel eingehalten werden kann. Die Analyse der Terzpegelspektren ergibt darüber hinaus keine deutlichen Pegelspitzen in einzelnen Terzbändern, sodass keine Störungen durch Einzeltöne (bspw. durch technische Geräte) zu erwarten sind.

Gemessene Nachhallzeit

Es wurden in den oben genannten Räumen Nachhallzeitmessungen durchgeführt. Die Messungen ergeben Nachhallzeiten von 0,28 bis 0,42 s. Die gemessenen Nachhallzeiten liegen damit in einem Bereich, der mit den akustischen Bedingungen typischer Schlafräume im Wohnumfeld vergleichbar ist. Somit werden keine Maßnahmen nötig, um während der Geräuscharbietung eine alltagsnahe Raumakustik zu schaffen. Durch die verhältnismäßig geringen Nachhallzeiten eignen sich die untersuchten Räume zudem gleichermaßen gut für die Wiedergabe von Tonaufnahmen.

Hallradius

Der Hallradius ist die Entfernung, in der in einem geschlossenen Raum der Direktschallpegel einer Quelle gleich dem Diffusschallpegel ist. Das Ohr der Versuchsperson sollte sich außerhalb dieses Hallradius befinden, um Einflüsse aus der Richtwirkung der Lautsprecher weitestgehend zu eliminieren und eine natürliche Wahrnehmung der Geräusche als simulierte Außengeräusche sicherzustellen. Der Hallradius liegt für alle untersuchten Räume im Bereich zwischen 0,4 und 0,6 m. Durch die Positionierung der Schallquelle in Fensternähe und die Ausrichtung der Betten mit dem Fußende in Richtung Fenster konnte sichergestellt werden, dass sich die Ohren der Versuchsperson außerhalb des Hallradius befinden.

A.9.3 Geräuscharbietung

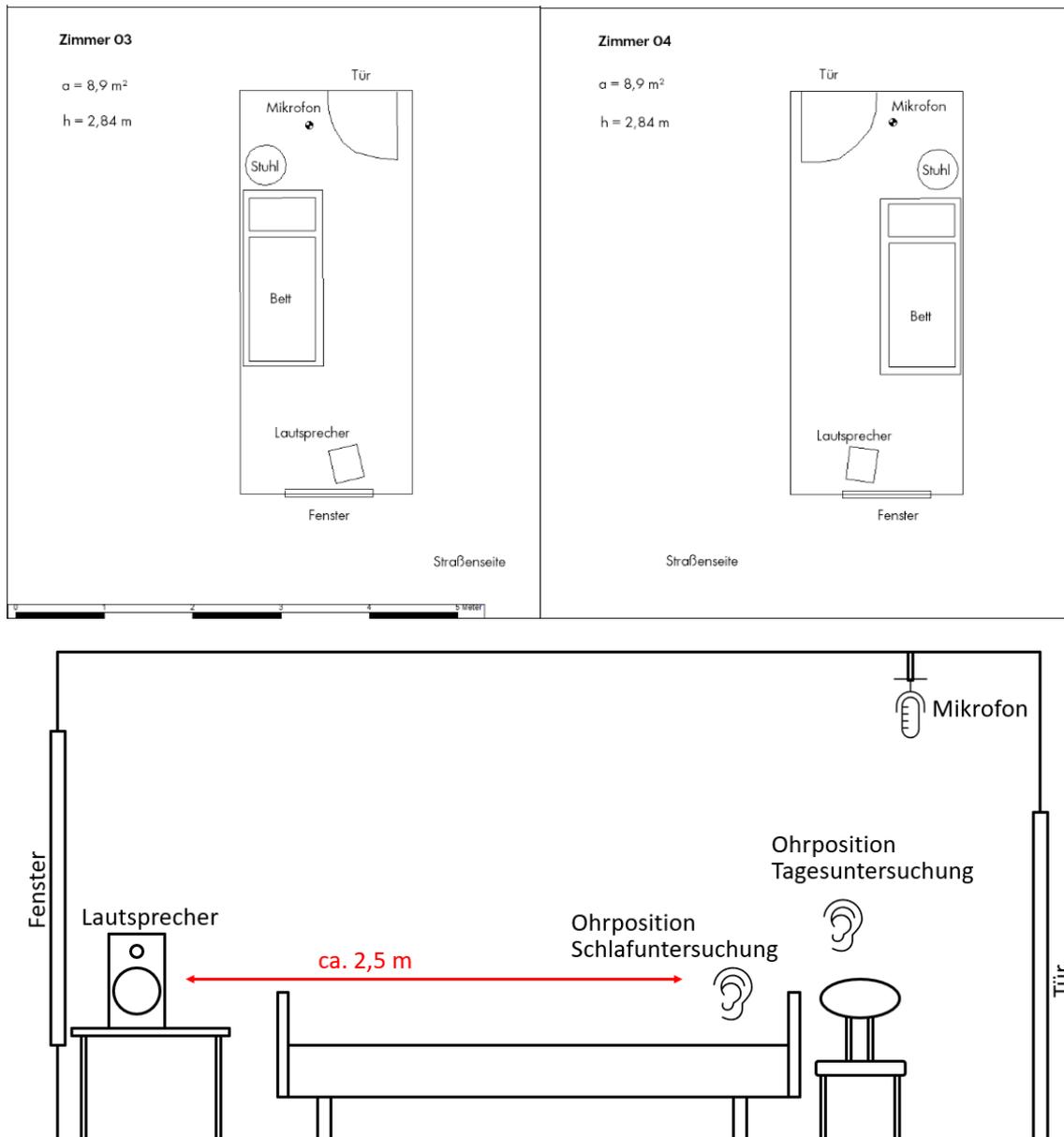
Messaufbau

Die akustischen Stimuli wurden über einen Lautsprecher in Fensternähe in den Schlafräumen eingespielt, um eine Schalleinwirkung durch das Fenster zu simulieren. Der Abstand zwischen Lautsprecher und Kopfende beträgt in beiden Räumen etwa 2,50 m. Somit befanden sich die Personen im Diffusfeld des Lautsprechers (nicht im Nahfeld). Gleichzeitig galt es die Beschallung möglichst unauffällig zu platzieren, um eine Beeinflussung der Versuchspersonen zu vermeiden, indem sie bspw. durch auffällige Lautsprecher-Arrays auf den Studieninhalt hingewiesen werden. Die ruhige Schlafumgebung sollte so natürlich wie möglich auf die Versuchspersonen wirken. Während der Tagesstudie nahmen die Versuchspersonen auf einem Stuhl am Kopfende des Bettes Platz, sodass sich die Position im Vergleich zu den Untersuchungs Nächten nur gering änderte.

Die Lautsprecher wurden mit Akustikstoff umhüllt. Auf diese Weise wurde den Versuchspersonen nicht unmittelbar vermittelt, dass sie während der Studiendurchführung beschallt werden würden. Die akustischen Auswirkungen auf das Frequenzspektrum wurden durch spektrale Anpassung der abgespielten Audiodateien kompensiert (Vgl. Anhang A.12). Die Lautsprecher wurden auf einem Tisch platziert, der sich unmittelbar vor dem Fenster befindet. Die Ausrichtung war zum Kopfende des Bettes hin. Unter der Decke, in der Nähe der Eingangstür

befand sich jeweils ein Messmikrofon zu Pegelkontrolle der Geräuscharbeitung (sog. Referenzmesspunkt) (vgl. Abbildung A 11).

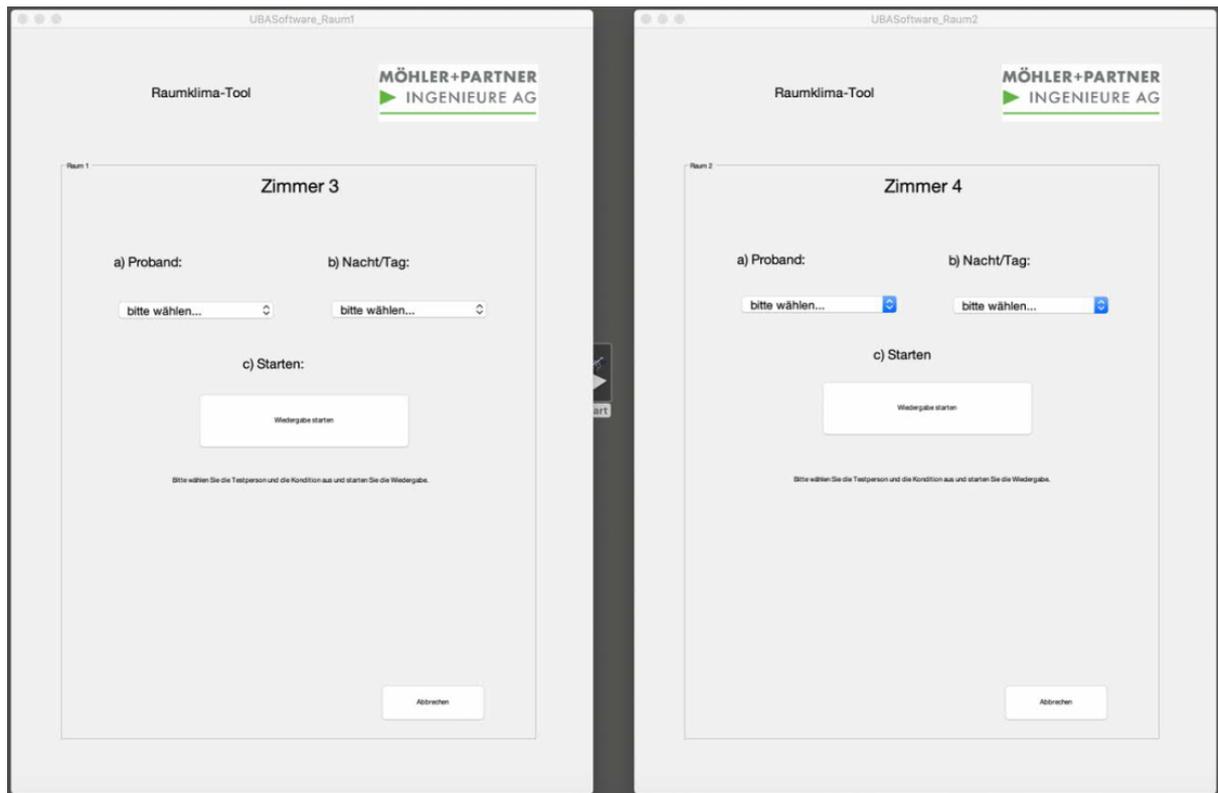
Abbildung A 11: Messaufbau der Audiowiedergabe und -aufzeichnung in den Untersuchungsräumen



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Lautsprecher und Mikrofone waren mit einem Computer samt Audio-Interface verbunden, der sich im Kontrollraum des Schlaflabors befand. Als Software kam eine MATLAB Anwendung zum Einsatz, die sowohl die Wiedergabe der Stimuli als auch die Pegelkontrolle über die Mikrofone steuerte. Die Bedienoberfläche der Software ließ keinen Schluss auf die dargebotenen Geräuschkonstellationen zu. Das Bedienpersonal hatte nur die Versuchspersonennummer und die jeweilige Nummer der Untersuchungsnacht auszuwählen (1. bis 3. Untersuchungsnacht bzw. 1. bis 2. Bedingung am in der Tagesstudie, siehe Abbildung A 12). Die Wiedergabe des jeweiligen Geräuschkonstellations (gekipptes Fenster/geschlossenes Fenster/Ruhe nacht) erfolgte anschließend automatisch.

Abbildung A 12: Grafische Bedienoberfläche der Software zur Geräuscharbeitung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

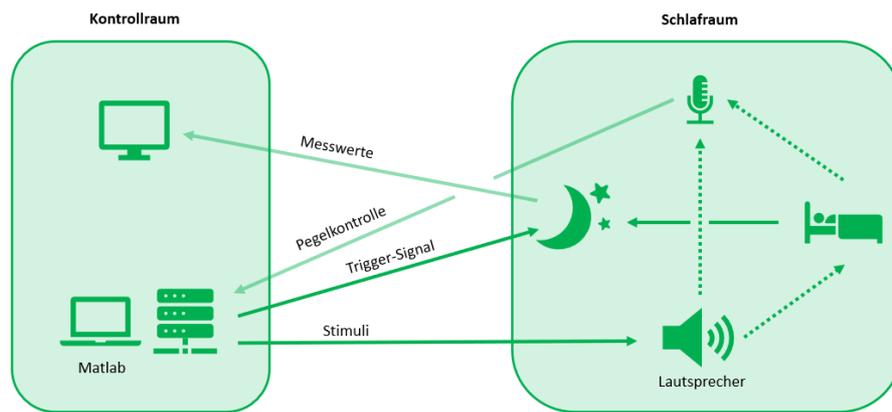
Zusätzlich wurden zu bestimmten Geräuscheignissen über weitere Ausgänge Trigger-Signale an das Polysomnografie-Messgerät gesendet. Hierdurch konnten in der Analyse möglicherweise aufgetretene Aufwachreaktionen und Arousals den Geräuscheignissen zugeordnet werden.

Abbildung A 13 stellt den Versuchsaufbau in den Schlafräumen schematisch dar. Eine Fotodokumentation der Räumlichkeiten findet sich in Anhang 0. Für die Audiowiedergabe und -aufzeichnung kam die folgende Messtechnik zum Einsatz:

- ▶ Macbook Pro 16“, 2019
- ▶ RME Fireface UFX II
- ▶ 2 x Yamaha HS 8i Lautsprecher
- ▶ 2 Stk. ½“-Messmikrofone MTG MK 221 (Microtech Gefell)
- ▶ 2 Stk. Mikrofonvorverstärker MTG MV 225.1 (Microtech Gefell)
- ▶ je 1 Stk. Windschirm MTG W2
- ▶ Akustikstoff zur Verhüllung der Lautsprecher ²

² Die Auswirkungen des Akustikstoffs auf das Frequenzspektrum der Stimulowiedergabe wurde durch eine spektrale Filterung kompensiert. Zur Frequenzanpassung siehe („Akustikstoff 1fach“): <https://www.akustikstoff.com/media/products/0900591001442653810.pdf>

Abbildung A 13: Schematische Darstellung des Messaufbaus im Schlaflabor



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Geräuschszenarien

Der Schalldruckpegel während der Schlafstudie wurde so gewählt, dass ein Soll-Bewertungspegel von 45 dB(A) außerhalb des Fensters simuliert wurde. In der Bedingung „gekipptes Fenster“ herrschte während des stationären Dauerbetriebs der LWP ein Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 30$ dB am Ohr der Versuchsperson. Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz des angestrebten Beurteilungspegels von 45 dB(A) außen vor dem Fenster und der mittleren Schalldämmung eines „gekippten“ Fensters mit ca. 12-15 dB in Kombination mit dem entstehenden Schallfeld im Raum. Als Messpunkt wurde das Kopfende des Bettes (etwa 2,5 m Entfernung zum Lautsprecher und ca. 30 cm über Oberkante der Matratze) gewählt.

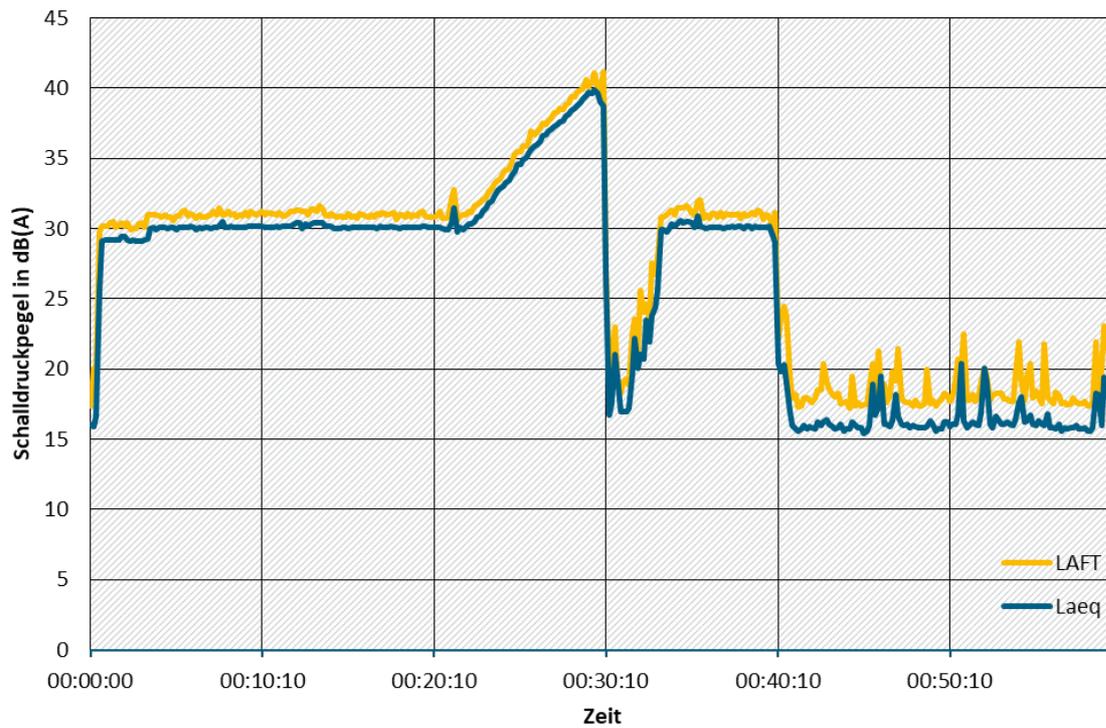
Während des einstündigen Geräuschszenarios (Vgl. Abbildung A 14) ergeben sich durch die unterschiedlichen Betriebszustände Spitzenpegel von bis zu 41 dB(A) (am Ende des Vereisungsprozesses). Das zur Orientierung hilfsweise herangezogene Spitzenpegelkriterium der TA Lärm für kurzzeitige Geräuschspitzen ($L_{AFmax} \leq 45 + 20$ dB(A) in der Nacht) wird somit eingehalten. Innerhalb der Ruhezustände des Geräuschszenarios werden Mittelungspegel zwischen 15 und 20 dB(A) gemessen. Auf diese Weise ergibt sich ein über die gesamte Dauer von einer Stunde gemessener Mittelungspegel von $L_{Aeq,1h} = 30,4$ dB(A).

Für die Messkondition „geschlossenes Fenster“ ergeben sich entsprechend geringere Schalldruckpegel. Das Verhältnis zwischen den Schalldruckpegeln der beiden Messkonditionen „gekipptes“ und „geschlossenes“ Fenster ergeben sich aus den Unterschieden in der frequenzabhängigen Schalldämmung bzw. den zugehörigen Filterfunktionen.

Sowohl während des stationären Dauerbetriebs als auch im Mittel über die gesamte Dauer von einer Stunde wurde auf diese Weise für das „geschlossene Fenster“ ein Mittelungspegel von ca. $L_{Aeq} = 21$ dB gemessen (Vgl. Abbildung A 15).

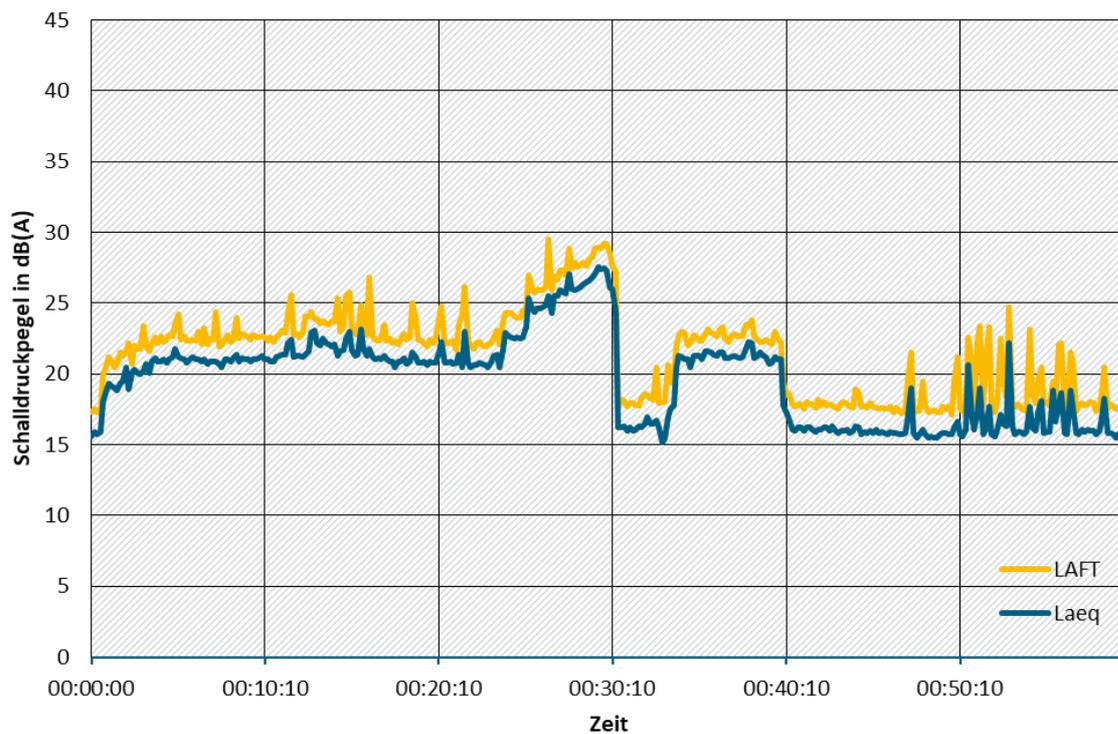
Bei Schallübertragungen innerhalb von Gebäuden oder bei Körperschallübertragungen ist demnach unabhängig vom Standort innerhalb von Gebäuden ein Innenschallpegel von 25 dB(A) einzuhalten. Kurzzeitige Lärmspitzen dürfen diesen Wert nicht um mehr als 10 dB überschreiten. In der Spitze werden in der Schlafposition der Versuchsperson Schalldruckpegel von bis zu 30 dB(A) gemessen. Ähnliche Innenpegel ergeben sich aus dem zulässigen Geräuschpegel außerhalb des Fensters und der üblichen Schalldämmung eines Fensters im geschlossenen Zustand. Beide festgelegten Kriterien auf Basis des Schutzmechanismus der TA Lärm werden erfüllt. Somit waren die Geräuschsituationen „am Ohr des Schlafenden“ durch die Reizdarbietung in beiden Messbedingungen („gekipptes“ und „geschlossenes“ Fenster) plausibel.

Abbildung A 14: Pegel-Zeit-Verlauf am Ohr der Schlafenden während der Wiedergabe des Geräuschkennszenarios „gekipptes Fenster“



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 15: Pegel-Zeit-Verlauf am Ohr der Schlafenden während der Wiedergabe des Geräuschkennszenarios „geschlossenes Fenster“



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.9.4 Akustische Qualitätskontrolle

Während der Untersuchungen wurden die Wiedergabepegel in den Untersuchungsräumen kontinuierlich über die an der Decke angebrachten Messmikrofone kontrolliert. Die Aufzeichnung erfolgt simultan zur Wiedergabe über das duplexfähige Audiointerface. Die Pegeldifferenz zwischen der „Ohrposition der Schlafenden“ am Kopfende des Bettes und den Messmikrofonen an der Zimmerdecke wurde im Vorfeld separat ermittelt. Das wurde für beide Räume mit einem geeichten Mehrkanalsystem bezogen auf die Geräuscharbietungen durchgeführt. Die Mikrofonaufzeichnungen an den Referenzmesspunkten können dadurch auf den jeweiligen Wiedergabepegel am „Ohr der Schlafenden“ übertragen werden.

Die gemessenen Schalldruckpegel an den Messmikrofonen werden laufend überprüft. Hierzu werden für eine stichprobenhaft ausgewählte Nachtstunde der Mittelungspegel (L_{Messung} als L_{Aeq} in dB(A)) im stationären Teil des Stimulus (Dauerbetrieb der LWP) über eine Dauer von 5 min ermittelt. Die Pegeldifferenz zum gewünschten Zielwert wurde gebildet. Dabei wird ausgehend vom aufgezeichneten Pegel-Zeit-Verlauf ein Teilstück mit möglichst geringem Störgeräuscheinfluss (bspw. verursacht durch die Versuchsperson) gewählt. Für die verschiedenen Messkonditionen liegt der Zielwert (L_{Ziel}) während des stationären Dauerbetriebs der LWP bei $L_{\text{Aeq}} = 21$ dB für die Simulation des „geschlossenen“ Fensters bzw. bei $L_{\text{Aeq}} = 30$ dB für die Simulation des „gekippten“ Fensters.

Außerdem wird der Schalldruckpegel im lautesten Punkt des Stimulus (Ende des Vereisungsprozesses, kurz vor dem Abschalten) ermittelt. Der Zielwert für den Spitzenpegel liegt bei $L_{\text{max}} = 41$ dB(A) für das „gekippte Fenster“ bzw. bei $L_{\text{max}} = 30$ dB(A) für das „geschlossene Fenster“.

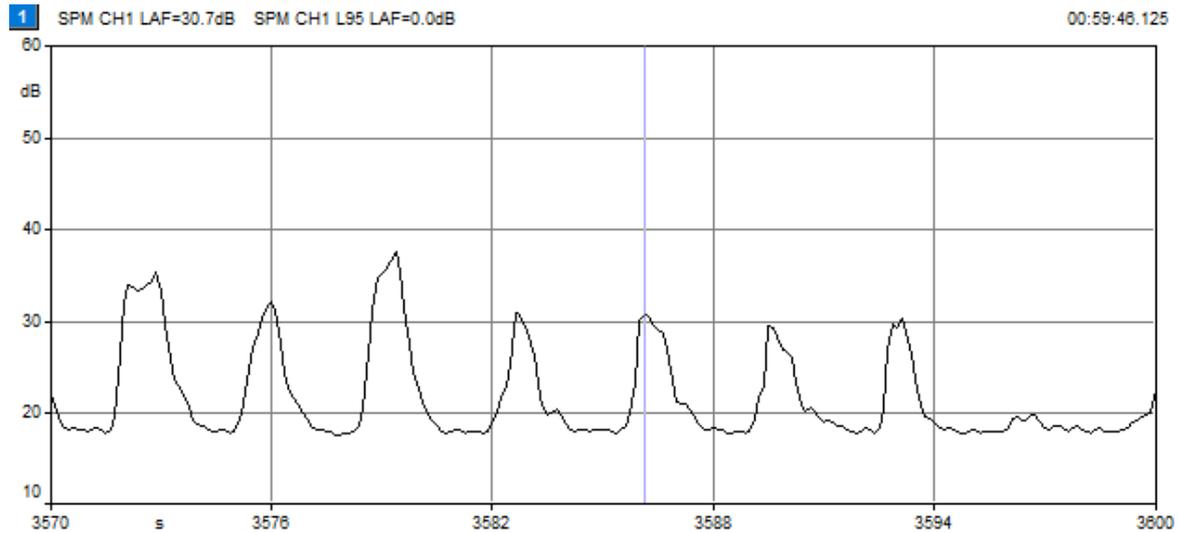
Die Abweichung der gemessenen Schalldruckpegel vom jeweiligen Zielwert wurde stetig durch Auswertung der Pegel-Zeit-Verläufe kontrolliert. Die Kontrollen zeigten keine Unregelmäßigkeiten. Die Geräuscharbietung erfolgte also ordnungsgemäß.

Störgeräusche

Neben kurzzeitigen Störgeräuschen (z.B. Türen schließen, Sirengeräusche) wurden Auffälligkeiten in den gemessenen Pegeln festgestellt, die auf die Versuchspersonen selbst zurückzuführen sind, insbesondere durch Schnarchen (Vgl. Abbildung A 16).

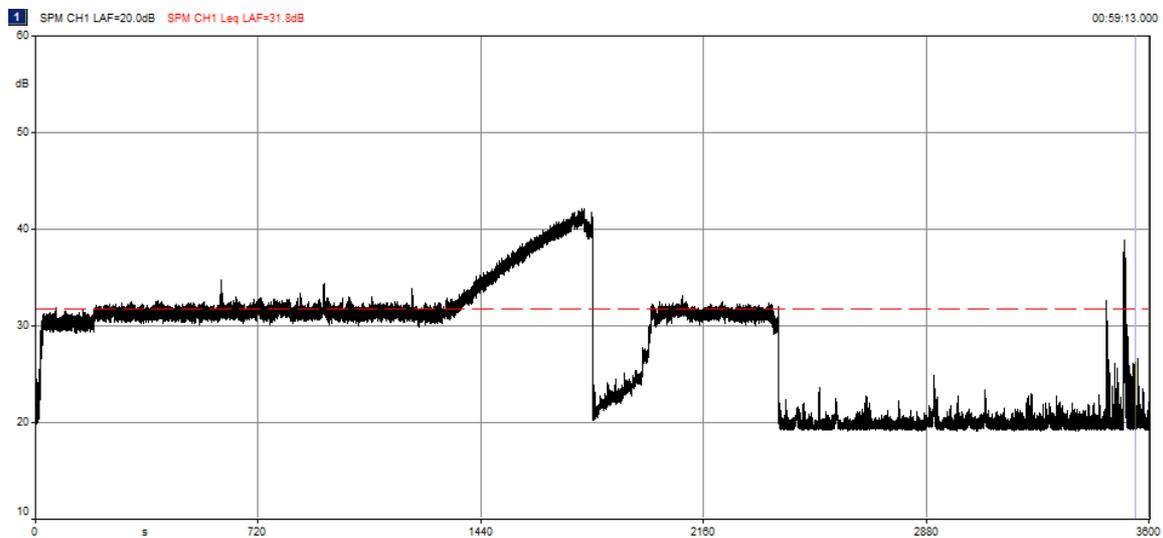
Über die Dauer der Geräuschkonstellationen entwickelten sich die Atemgeräusche zu einer konstanten Störgeräuschquelle, die die Stimuliwiedergabe überlagert (Vgl. Abbildung A 17, Abbildung A 18, Abbildung A 19). Der gemessene (Ruhe-)Geräuschpegel und zwischen den Geräuscharbietungen ist daher stark von den Schlafgeräuschen der Versuchspersonen abhängig (Schnarchen, Bewegung, etc.). Durch regelmäßige Kontrollmessungen ohne Personen im Raum wurde jedoch sichergestellt, dass die gemessenen Pegelabweichungen auf die Störgeräusche zurückzuführen waren. Die Wiedergabepegel der dargebotenen Stimuli zeigten hingegen keine kritischen Abweichungen.

Abbildung A 16: Pegel-Zeit-Verlauf am Messmikrofon (Ausschnitt), ohne Geräuschwiedergabe, jedoch mit deutlichen Atemgeräuschen der schlafenden Person



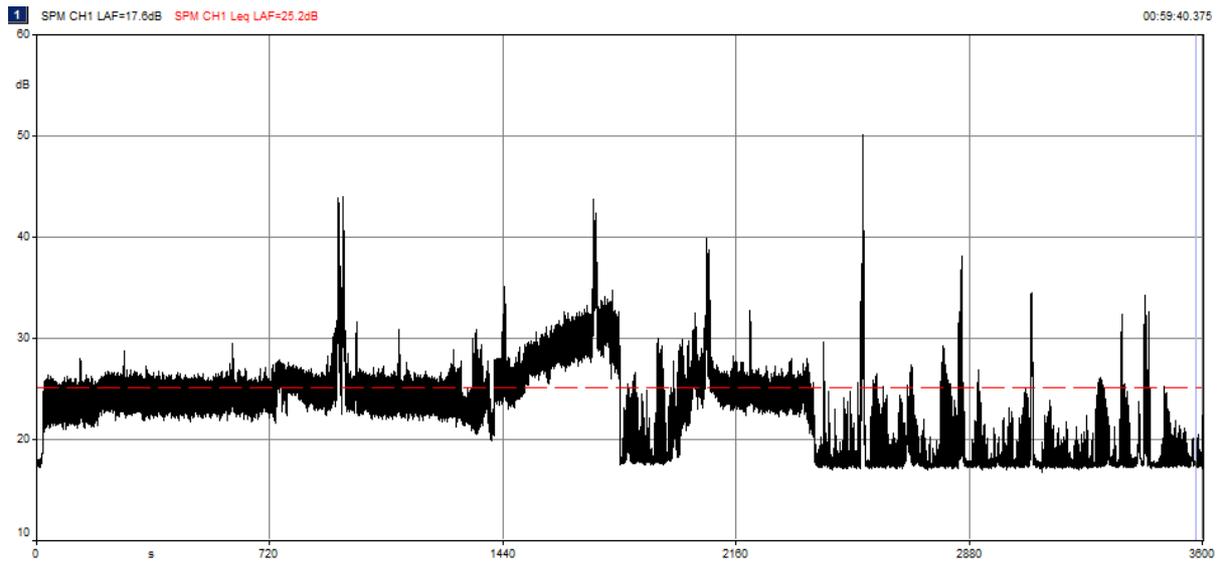
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 17: Pegel-Zeit-Verlauf am Messmikrofon (1 Std), Wiedergabe „gekipptes Fenster“ mit geringen Störgeräuschen durch die Versuchsperson



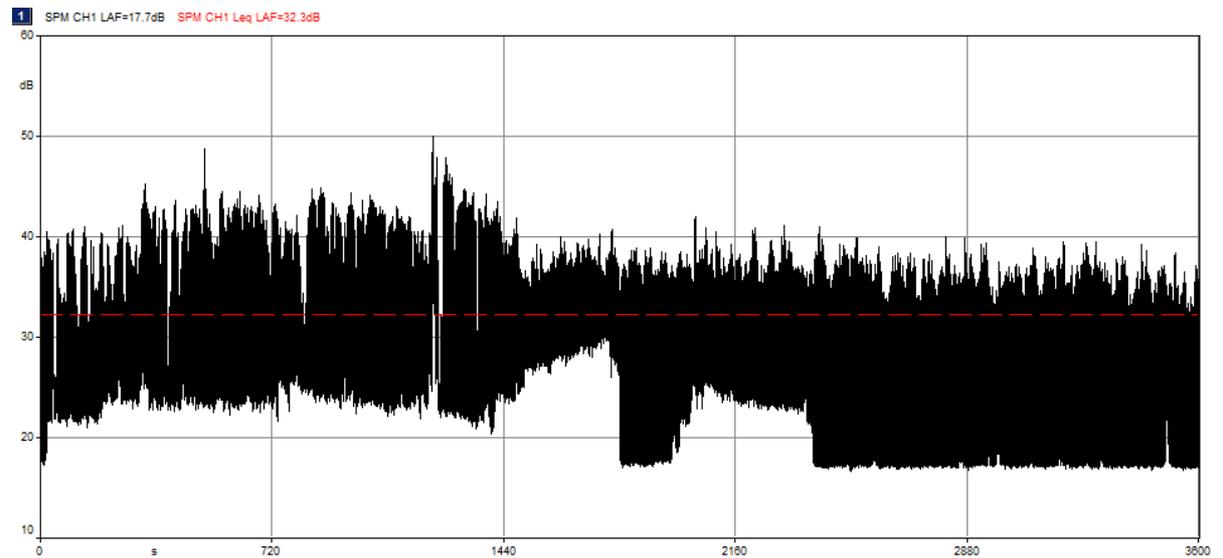
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 18: Pegel-Zeit-Verlauf am Messmikrofon (1 Std), Wiedergabe „gekipptes Fenster“ mit mäßigen Störgeräuschen durch die Versuchsperson



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 19: Pegel-Zeit-Verlauf am Messmikrofon (1 Std), Wiedergabe „gekipptes Fenster“ mit starkem Störgeräusch durch die Versuchsperson

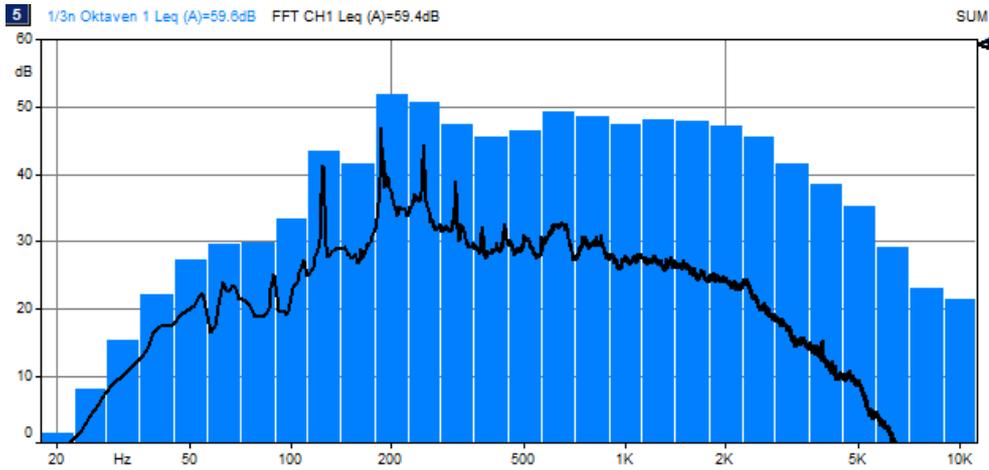


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner.

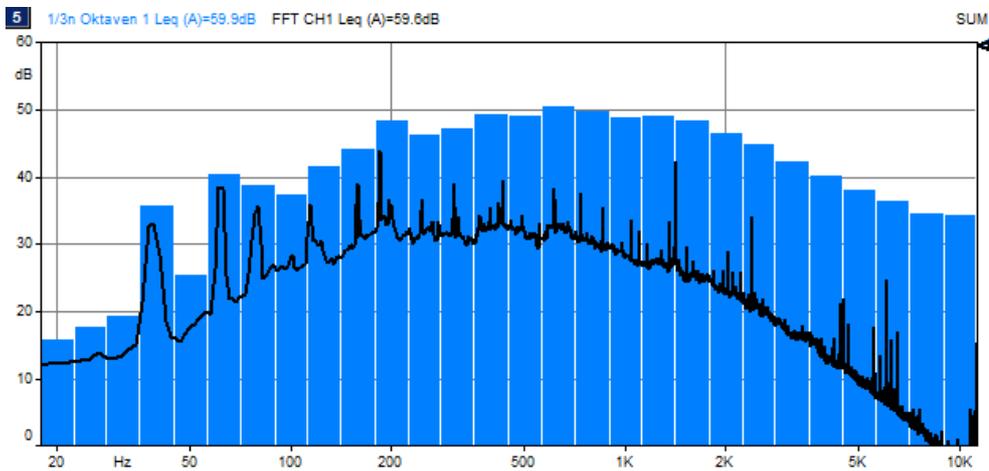
A.10 Messergebnisse

Abbildung A 20: Drittes Oktav- (blau) und Schmalbandspektrum (schwarz) im Dauerbetrieb

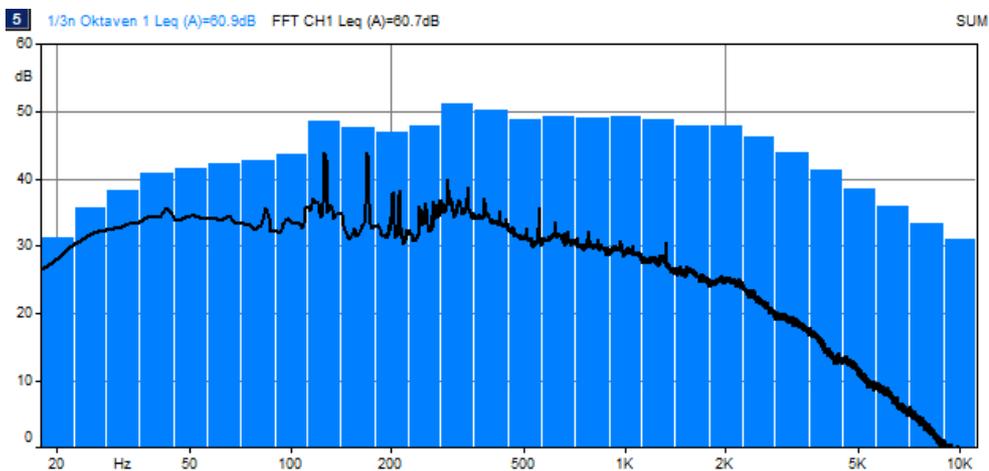
LWP1



LWP2



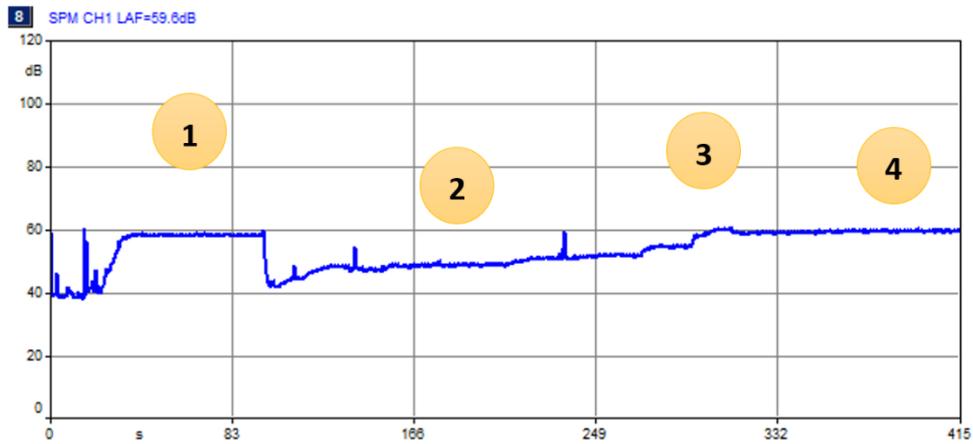
LWP3



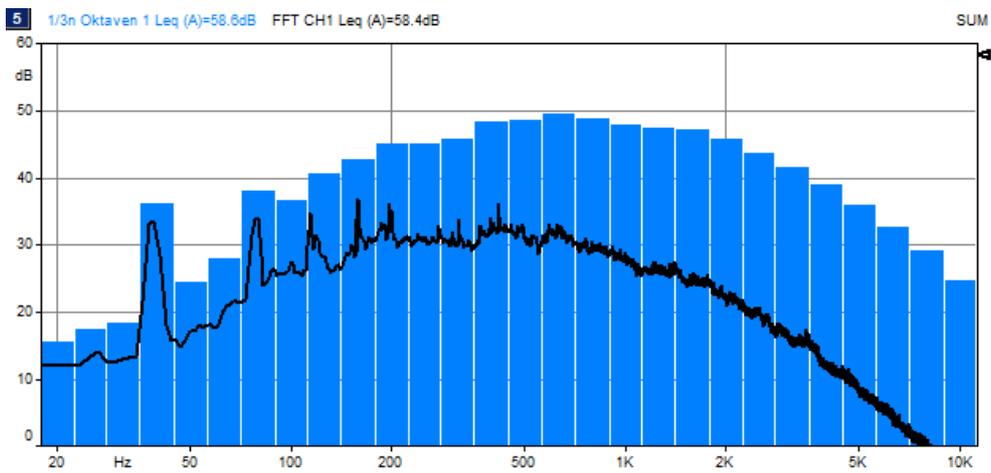
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Abbildung A 21: Verschiedene Betriebszustände der LWP2

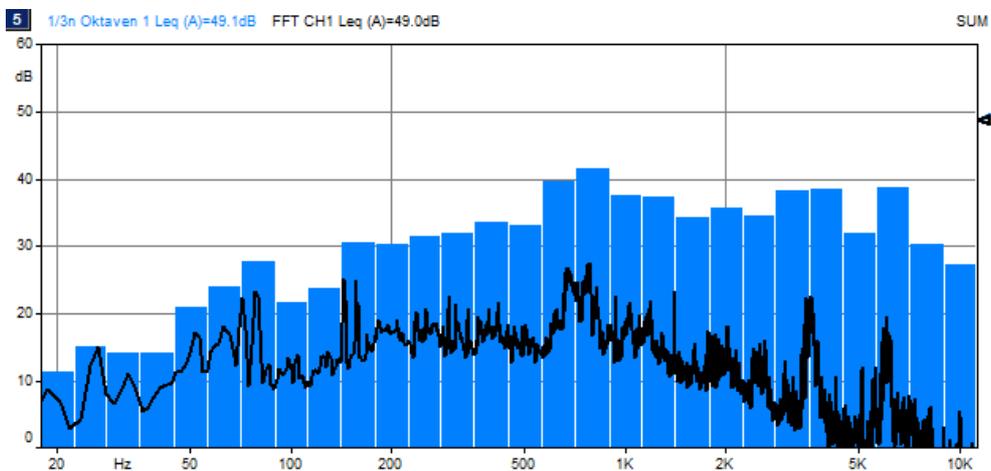
Schalldruckpegel über die Zeit und Marker für verschiedene Betriebszustände



Frequenzspektren in Punkt 1

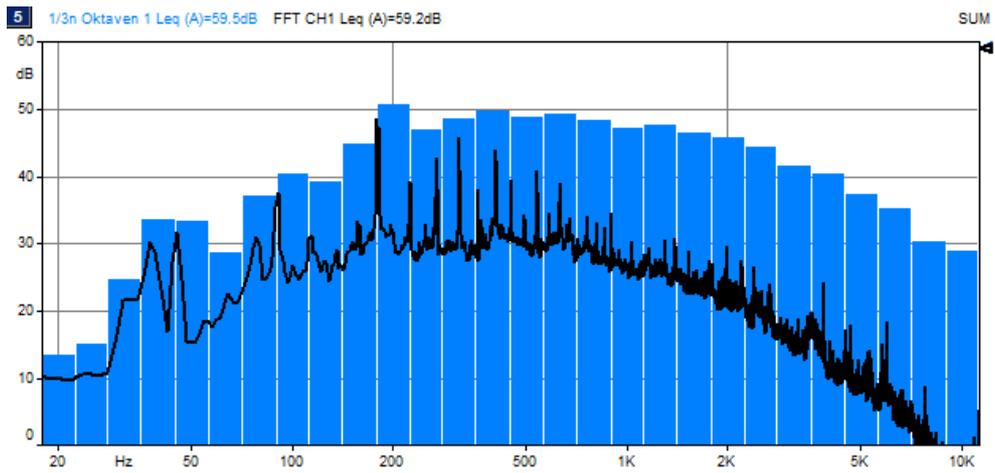


Frequenzspektren in Punkt 2

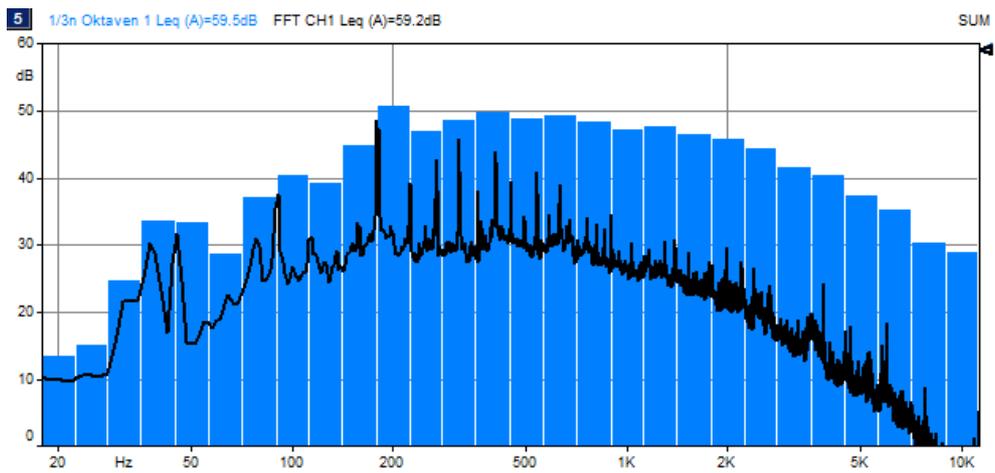


Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

Frequenzspektren in Punkt 3



Frequenzspektren in Punkt 4



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.11 Einrichtung der Untersuchungszimmer

Lautsprecher mit Stoffbezug (Zimmer 3)



Untersuchungszimmer (Raum 4)



Mikrofonabhängung für Pegelkontrolle (Raum 3)



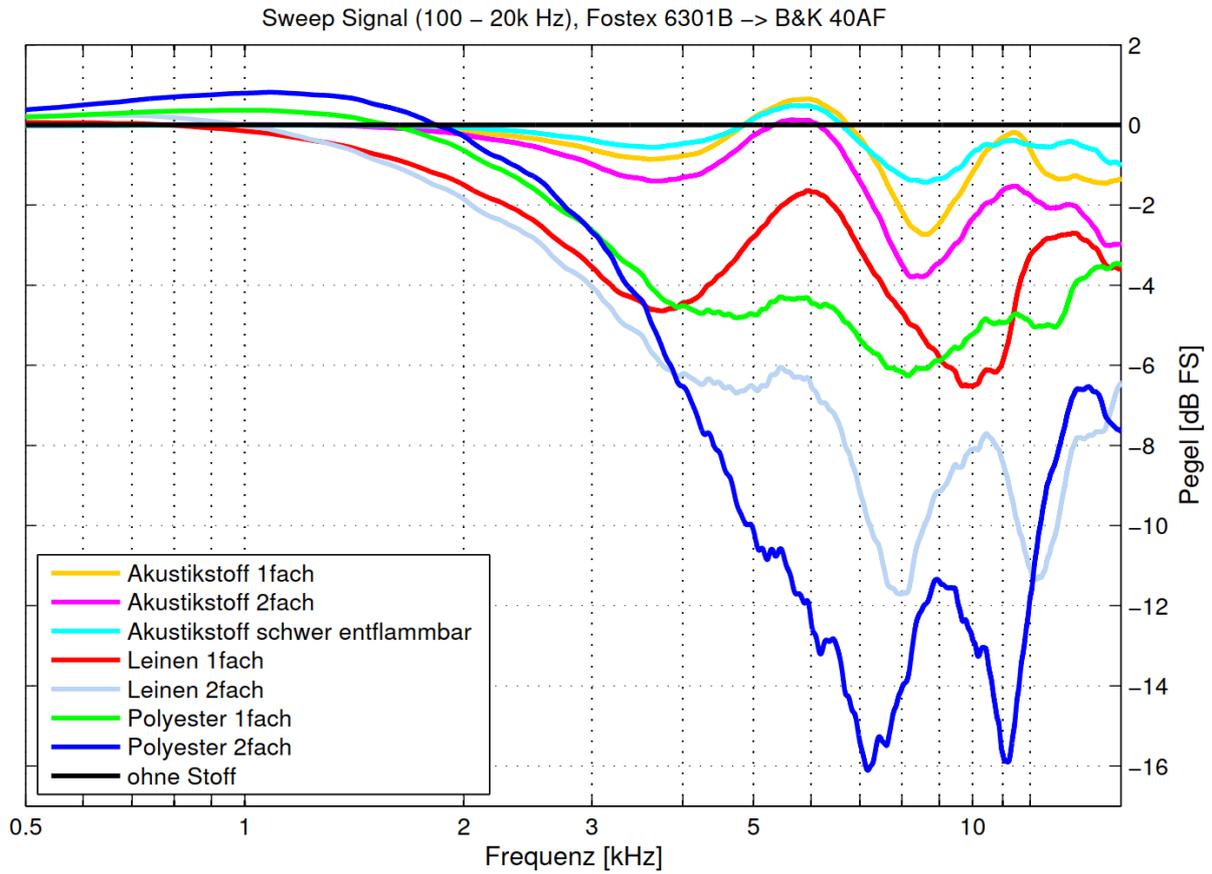
Einrichtung des Kontrollraums (MacBook + Schnittstelle)



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner.

A.12 Spektrale Eigenschaften des für die Lautsprecherabdeckungen verwendeten Gewebes

Verwendeter Stoff = gelbe Kurve



Quelle: <https://www.akustikstoff.com/>

A.13 Faktorenanalysen zu den Items des Tagesfragebogens

A.13.1 Stimmung

	Stimmung Baseline Bedingung			Stimmung Geräuschbedingung	
	Faktor			Faktor	
Items	1	2	3	1	2
Erklärte Varianz	46,30%			52,50%	
Ich bin aufmerksam	0,942			0,785	
Ich bin entspannt	0,614			0,554	
Ich bin abgelenkt	0,585			0,754	
Ich bin in schlechter Stimmung	0,403			0,494	-0,401
Ich fühle mich unwohl		0,586		-0,501	
Ich fühle mich wohl	0,427	-0,484		0,832	
Ich bin besorgt			0,608		0,862
Ich bin nervös			0,590		0,512

Anmerkung. Faktorenladungen < 0,40 nicht dargestellt.

Faktorenanalyse: Hauptachsen-Faktorenanalyse (PFA) mit Promax-Rotation

A.13.2 Schwierigkeiten, sich auf den Text zu konzentrieren

Items	Baseline Bedingung	Geräuschbedingung
Erklärte Varianz	52,70%	62,20%
	Faktor	Faktor
Items	1	1
Es hat mich angestrengt, den Text zu lesen.	0,969	0,821
Ich musste den Text mehrmals lesen, um ihn zu verstehen.	0,739	0,965
Ich konnte mich nicht auf den Text konzentrieren.	0,313	0,510

Anmerkung. Faktorenladungen < 0,40 nicht dargestellt.

Faktorenanalyse: Hauptachsen-Faktorenanalyse (PFA) mit Promax-Rotation