

TEXTE

82/2026

Abschlussbericht

Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen

geplanter Überschall-Verkehrsflugzeuge bzw. -
Geschäftsreiseflugzeuge

von:

Daniel Aeschbach, Susanne Bartels, Sarah Weidenfeld
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln
Julia Kuhlmann, Dirk Schreckenber
ZEUS GmbH, Hagen
Steven van de Par, Stephan Töpken
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 82/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 56 103 0

Abschlussbericht

Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen

geplanter Überschall-Verkehrsflugzeuge bzw. -
Geschäftsreiseflugzeuge

von

Daniel Aeschbach, Susanne Bartels, Sarah Weidenfeld

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Köln

Julia Kuhlmann, Dirk Schreckenber

ZEUS GmbH, Hagen

Steven van de Par, Stephan Töpken

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg

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:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Linder Höhe
51147 Köln

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

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

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8100>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2026

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

Kurzbeschreibung: Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen geplanter Überschall-Verkehrsflugzeuge bzw. -Geschäftsreiseflugzeuge

Zukünftige zivile Überschallflugzeuge, sogenannte Low-Boom-Flugzeuge, sollen deutlich leisere Überschallknalle verursachen, um Überschallflüge über bewohntem Gebiet zu ermöglichen. Die Wirkung dieser neuartigen Überschallknalle auf den Menschen, insbesondere auf den Schlaf, ist bisher unklar. In einer Studie wurden 37 gesunde Personen (Alter $M = 35 \pm 12$ Jahre SD, 18 Frauen) drei Nächte im Schlaflabor untersucht. Die erste Nacht diente als Kontrollbedingung, in den zwei folgenden Nächten wurden je 40 simulierte Überschallknalle von entweder Low-Boom-Flugzeugen (Low-Boom-Bedingung) oder unter zusätzlicher Anwendung eines lärmindernden Flugverfahrens (Mach-Cut-off-Bedingung) eingespielt. Der Schlaf wurde polysomnografisch untersucht. Am Morgen wurden die Kurzzeit-Belästigung und selbst eingeschätzte Schlafqualität erfasst sowie Herzrate und Blutdruck gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schlaf in der Low-Boom-Bedingung gestörter war, die Belästigung höher und die selbst eingeschätzte Schlafqualität schlechter als in der Mach-Cut-off-Bedingung. Während sich Herzratenvariabilität und Blutdruck nicht nachweisbar zwischen den Bedingungen unterschieden, sank die Herzrate nach den Low-Boom-Ereignissen. Ergänzend wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, aus deren Ergebnissen Kriterien zur Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen durch zukünftige zivile Überschallflugzeuge für die Bevölkerung abgeleitet wurden. Das Projekt liefert wichtige Erkenntnisse zur Prognose der Lärmwirkung von zukünftigen Überschallknallen und ermöglicht deren Einordnung im Vergleich zu konventionellem Verkehrslärm. Obwohl die resultierenden Lärmimmissionen im Vergleich zu denen von konventionellen Überschallflugzeugen niedriger ausfallen, können sie den Schlaf beeinträchtigen und Belästigungsreaktionen hervorrufen. Die Anwendung des lärmindernden Mach-Cut-off-Flugverfahrens kann dazu führen, dass die Beeinträchtigungsreaktionen geringer ausfallen.

Abstract: Assessment of the acceptability of sonic booms of planned supersonic commercial aircraft or business jets

Future civil supersonic aircraft, known as Low-Boom aircraft, are expected to produce significantly quieter sonic booms to enable supersonic flights over populated areas. The effect of these new types of sonic booms on humans, particularly on sleep, is still unclear. In one study, 37 healthy participants (age $M = 35 \pm 12$ years SD, 18 women) were examined in a sleep laboratory for three nights. The first night served as a control condition, in the two following nights 40 simulated sonic booms from either low-boom aircraft (Low-Boom condition) or under additional application of a noise-reducing flight procedure (Mach-Cut-off condition) were played back. Sleep was measured polysomnographically. In the morning, short-term annoyance and self-assessed sleep quality were recorded and heart rate and blood pressure were measured. The results show that sleep was disturbed in the Low-Boom condition, annoyance was higher and self-assessed sleep quality was worse than in the Mach-Cut-off condition. While heart rate variability and blood pressure did not differ detectably between conditions, heart rate decreased after the Low-Boom events. In addition, a literature review was carried out, the results of which were used to derive criteria for assessing the acceptability of sonic booms from future civil supersonic aircraft for the population. The project provides important findings for predicting the noise impact of future sonic booms and enables them to be ranked in comparison with conventional traffic noise. Although the resulting noise immission are lower than those of conventional supersonic aircraft, they can impair sleep and cause annoyance reactions. The use of the noise-reducing Mach cut-off flight procedure can lead to a lower level of adverse reactions.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	16
Summary	24
1 Einleitung und Aufgabenstellung	31
2 Arbeitspaket 1 - Konzeption der Schlafstudie	33
2.1 Simulation und Auswahl der Lärmstimuli	33
2.1.1 Low-Boom Simulation.....	35
2.1.2 Low-Boom-Mach-Cut-off Simulationen (Mach-Cut-off-Simulationen)	36
2.1.3 Outdoor-Indoor Simulation	37
2.2 Erprobungsstudie erreichbarer Überdrücke.....	40
2.3 Vorbereitung und Validierung der Schalldarbietung im Modul 5 (M5) des :envihabs (August 2022).....	42
2.3.1 Hintergrundpegel und Nachhallzeiten in den Schlafräumen im M5	43
2.3.2 Laboraufbau imM5	44
2.3.3 Reproduktion der Signaturen in den Schlafräumen	46
2.3.4 Validierung der Signaldarbietung: Bewertung der Kurzzeit-Lästigkeit und Bestimmung der Detektionsschwelle für eine Hochpassfilterung der Signaturen im Simulator der Universität Oldenburg.....	47
2.4 Literaturbasierte Ableitung der Hypothesen	57
2.5 Bestimmung der Stichprobengröße.....	60
2.6 Konzeption des Studiendesigns	61
3 Arbeitspaket 2 - Durchführung und Auswertung der Schlafstudie	63
3.1 Versuchspersonenakquise und -auswahl.....	63
3.2 Studienprotokoll	68
3.3 Methode zur Einspielung der Signaturen	69
3.4 Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Schlaf	70
3.4.1 Makroparameter des Schlafs.....	72
3.4.2 EEG-Spektralanalyse	73
3.4.3 Ereignisbezogene Analysen	74
3.4.3.1 Aufwachereignisse.....	74
3.4.3.2 Arousals	76
3.4.3.3 Schlaf-Enttiefungen	76

3.4.3.4	Veränderungen im EEG-Spektrum.....	77
3.5	Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Wachzustand.....	77
3.5.1.1	Herzratenvariabilität.....	78
3.5.1.2	Herzrate.....	79
3.5.1.3	Blutdruck.....	80
3.6	Methode zur Messung der subjektiven Beurteilung.....	81
3.6.1	Fragebögen.....	81
3.6.1.1	Eingangsfragebogen.....	81
3.6.1.2	Abendfragebogen.....	82
3.6.1.3	Morgenfragebogen.....	83
3.6.1.4	Abschlussfragebogen.....	83
3.6.2	Statistische Auswertung der Fragebögen.....	86
3.6.2.1	Belästigung.....	86
3.6.2.2	Selbst eingeschätzte Schlafqualität und morgendliche Schläfrigkeit.....	87
3.7	Beschreibung der Stichprobe.....	87
3.8	Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf.....	90
3.8.1	Makroparameter des Schlafs.....	90
3.8.2	EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf.....	93
3.8.3	Ereignisbezogene Analysen.....	93
3.8.3.1	Aufwachereignisse.....	93
3.8.3.2	Arousals.....	100
3.8.3.3	Schlaf-Enttiefungen.....	104
3.8.3.4	Veränderungen im EEG-Spektrum.....	106
3.9	Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf.....	106
3.9.1	Makroparameter und EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf.....	106
3.9.2	Lärmassoziierte Aufwachereignisse, Arousals, Schlaf-Enttiefungen und Veränderungen des EEG-Spektrums.....	108
3.10	Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand.....	112
3.10.1	Herzratenvariabilität.....	112
3.10.2	Herzrate.....	112
3.10.3	Blutdruck.....	114
3.11	Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand.....	115
3.12	Ergebnisse der subjektiven Beurteilung.....	116
3.12.1	Kurzzeitbelästigung.....	116

3.12.2	Selbst eingeschätzte Schlafqualität und morgendliche Schläfrigkeit	119
3.13	Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der subjektiven Beurteilung	123
4	Arbeitspaket 3 - Entwicklung und Anwendung von Zumutbarkeitskriterien	126
4.1	Literaturanalyse	126
4.1.1	Literaturanalyse nach dem Konzept von ‚Scoping Reviews‘	126
4.1.2	Zielsetzung und Fragestellung der Literaturanalyse	126
4.1.3	Ein- und Ausschlusskriterien der Literatúrauswahl	127
4.1.4	Vorgehen bei der Literatursuche (Fachdatenbanken, Suchstrings)	127
4.1.5	Literatúrauswahl und Extraktion von Informationen	128
4.2	Berücksichtigung kürzlich abgeschlossener und laufender Forschungsarbeiten	129
4.3	Ergebnisse der Literaturanalyse.....	130
4.3.1	Reviews	131
4.3.2	Studien zu Lärmbelästigung, Schlafstörungen und Startle-Reaktionen durch Überschallknalle.....	133
4.3.3	Studien zu Low Sonic Booms	137
4.4	Fazit aus der Literaturanalyse	141
5	Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie und der Literaturanalyse sowie Ableitung von Zumutbarkeitskriterien.....	143
5.1	Akustische Parameter als Zumutbarkeitskriterien.....	145
5.2	Lärmwirkungen als Zumutbarkeitskriterien.....	146
5.3	Empfehlungen zur Ableitung von Zumutbarkeitskriterien	149
6	Quellenverzeichnis	151
A	Literaturanalyse.....	162
A.1	Identifizierte Studien in der Literatursuche	162

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schalldruck der Low-Boom-Simulation	36
Abbildung 2:	Schalldruck der Mach-Cut-off-Simulationen auf Basis der C608 Low-Boom-Simulation für fünf Abstände unterhalb der „Caustic Line“	36
Abbildung 3:	Übertragungsverlust für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion über der Frequenz sowie einfache Näherung	37
Abbildung 4:	Übertragungsverlust für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion über der Frequenz sowie einfache Näherung	38
Abbildung 5:	Perzentile gemessener Übertragungsverluste für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion DLM über der Frequenz sowie einfache Näherung.....	39
Abbildung 6:	Amplitudenübertragungsfunktion des Tiefpassfilters zur Simulation der Outdoor-Indoor-Übertragungsfunktion.....	39
Abbildung 7:	Schalldruck der Low-Boom-Simulation C608 als Outdoor-Signal und simuliertes Indoor-Signal.....	40
Abbildung 8:	Schalldruck der Mach-Cut-off-Simulationen als Outdoor-Signal und simuliertes Indoor-Signal für eine Entfernung von 100 Metern unterhalb der „Caustic Line“	40
Abbildung 9:	Messaufbau in AMSAN-Schlafräum	41
Abbildung 10:	Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 (indoor, +6dB) in AMSAN-Schlafräum	42
Abbildung 11:	Luft- und raumfahrtmedizinische Forschungsanlage :envihab des DLR in Köln	43
Abbildung 12:	Nachhallzeiten (T20) der drei Schlafräume für Oktavfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz	44
Abbildung 13:	Skizze des Laboraufbaus während der Messungen im M5	45
Abbildung 14:	Laboraufbau während der Messung im M5	45
Abbildung 15:	Blockschaltbild der elektroakustischen Komponenten für die Messungen	46
Abbildung 16:	Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 (indoor) und Mach-Cut-off-Signatur (indoor) simuliert für eine Entfernung von 100 Metern unterhalb der „Caustic Line“	47
Abbildung 17:	Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung.....	48
Abbildung 18:	Zielsignal und Reproduktion der Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung.....	49
Abbildung 19:	Zielsignal und Reproduktion der im Schlaflabor aufgenommenen Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor- Filterung.....	49

Abbildung 20:	Zielsignal und Reproduktion der im Schlaflabor aufgenommenen Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung.....	50
Abbildung 21:	Darstellung der in der Reproduktion in der Druckkammer erreichten ASEL- und Überdruck-Werte über die aus den Signalen berechneten Werte.....	52
Abbildung 22:	Mittelwerte und Standardfehler der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die 16 Signaturen (mit Outdoor-Indoor-Filterung)	54
Abbildung 23:	Mittelwerte der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die 16 Signaturen (mit Outdoor-Indoor-Filterung) über dem A-gewichteten Expositionspegel (ASEL).....	55
Abbildung 24:	Mittelwerte und Standardfehler der Detektionsschwelle der Grenzfrequenz eines Hochpass-Filters für die drei Pegelstufen der Low-Boom-Signatur C608 (Signale Nr. 1, 2 und 3 aus Tabelle 2) sowie die Individualdaten.....	56
Abbildung 25:	Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel ($L_{AS,max}$) eines Verkehrslärmereignisses und der Aufwach-Rate	60
Abbildung 26:	Ergebnisse der Versuchspersonenakquise und -auswahl	66
Abbildung 27:	Elektrodenpositionen	71
Abbildung 28:	Beispielhaftes Hypnogramm einer Versuchsperson aus der Kontrollbedingung	72
Abbildung 29:	Kontinuierliche nicht-invasive Blutdruckmessung mittels Finger-Manschette des Finapres NOVA	80
Abbildung 30:	Altersverteilung der Stichprobe	88
Abbildung 31:	Häufigkeitsverteilung der selbst eingeschätzten Schlafqualität der letzten vier Wochen	88
Abbildung 32:	Häufigkeitsverteilung des selbst eingeschätzten Chronotyps..	89
Abbildung 33:	Schlafeffizienz für zwei verschiedene Altersgruppen für die drei Bedingungen.....	92
Abbildung 34:	EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf während Low-Boom und Mach-Cut-off, gemittelt über die ganze Nacht und dargestellt in Prozent der Kontrollbedingung	93
Abbildung 35:	Relative Rate der lärmassoziierten Aufwachereignisse für jede Bedingung.....	94
Abbildung 36:	Anteil der Versuchspersonen ohne bzw. mit lärmassoziierten Aufwachereignissen	95
Abbildung 37:	Trends der Aufwach-Rate für jede Versuchsperson und jede Bedingung.....	96
Abbildung 38:	Lärminduzierte Aufwach-Rate in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung	96
Abbildung 39:	Gemittelte Anzahl der Aufwachereignisse für die drei Bedingungen.....	97
Abbildung 40:	Kumulierte Anzahl der Aufwachereignisse.....	98

Abbildung 41:	Vergleich der lärmassoziierten Aufwach-Rate in der 1., 2. und 3. Epoche nach dem Lärmereignis.....	99
Abbildung 42:	Relative Rate der lärmassoziierten Arousal für jede Bedingung	101
Abbildung 43:	Trends der Arousal-Rate für jede Versuchsperson und jede Bedingung.....	101
Abbildung 44:	Lärminduzierte Arousal-Rate in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung	102
Abbildung 45:	Gemittelte Anzahl der Arousal für die drei Bedingungen.....	103
Abbildung 46:	Relative Rate der lärmassoziierten Schlaf-Enttiefungen für jede Bedingung.....	105
Abbildung 47:	Lärminduzierte Rate der Schlaf-Enttiefungen in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung.....	105
Abbildung 48:	EEG-Leistungsdichte-Spektren im Non-REM-Schlaf in der ersten Minute nach einem Lärmereignis.....	106
Abbildung 49:	Vergleich der Aufwach-Raten durch Überschallknalle mit der Aufwach-Rate durch konventionelle Verkehrsträger.....	110
Abbildung 50:	Vergleich der Arousal-Rate durch Überschallknalle mit der Arousal-Rate durch konventionelle Verkehrsträger.....	111
Abbildung 51:	Prozentuale Veränderung der Herzrate nach den Lärmereignissen für jede Bedingung	113
Abbildung 52:	Beispiel für den Verlauf der Herzrate unter Einspielung von Low-Boom-Ereignissen	114
Abbildung 53:	Prozentuale Veränderung des Blutdrucks nach den Lärmereignissen für jede Bedingung	114
Abbildung 54:	Prozentuale Verteilung der Kurzzeit-Belästigung über die drei Bedingungen.....	116
Abbildung 55:	Effekt der Bedingung auf die Kurzzeit-Belästigung	117
Abbildung 56:	Vergleich der Kurzzeitbelästigungs-Mittelwerte für die Low-Boom und Mach-Cut-off-Signaturen im Schlaflabor und in der Druckkammer	119
Abbildung 57:	Prozentuale Verteilung der selbst eingeschätzten Schlafqualität unterteilt in drei Perzentile über die drei Bedingungen	120
Abbildung 58:	Effekt der Bedingung auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität	121
Abbildung 59:	Prozentuale Verteilung der selbst eingeschätzten Schläfrigkeit (KSS) unterteilt in drei Gruppen über die drei Bedingungen	122
Abbildung 60:	Effekt der Bedingung auf die selbst eingeschätzte morgendliche Schläfrigkeit (KSS).....	123
Abbildung 61:	Flussdiagramm zum Vorgehen zur Literatursuche bei der systematischen Literaturrecherche nach PRISMA (Moher et al. 2009).....	129
Abbildung 62:	Konzeptuelles Modell zur Wirkung von nächtlichem Fluglärm von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000).....	147

Abbildung 63: Adaptiertes Modell (nach Porter, Kershaw & Ollerhead 2000) mit relevanten Lärmwirkungen für Zumutbarkeitskriterien ..148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hintergrundschalldruckpegel in den Schlafräumen des M5	43
Tabelle 2:	A-gewichteter Expositionspegel und maximaler Überdruck für die im Hörexperiment genutzten Signale berechnet aus den Signalen und aus deren Reproduktion in der Druckkammer ...	51
Tabelle 3:	Details zu den sechs Überflugaufnahmen der Mach-Cut-off-Flüge einer F-18 aus der FaINT-Datenbank	52
Tabelle 4:	Erhöhung der Aufwach-Rate in Abhängigkeit der Anzahl der Versuchspersonen und der Lärmereignisse	61
Tabelle 5:	Stufen des Verfahrens zur Akquise und Auswahl der Versuchspersonen	65
Tabelle 6:	Fragebogenbasierte Gründe für den Ausschluss von der Studie und deren Häufigkeiten.....	67
Tabelle 7:	Mathematische Transformationen der HRV-Parameter	79
Tabelle 8:	Fragebögen und Skalen	81
Tabelle 9:	Items zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit durch tieffrequente (LFN) und impulshafte Geräusche (IN).....	85
Tabelle 10:	Deskriptive Daten der Variablen zum Umgang mit Lärm.....	89
Tabelle 11:	Mittelwert und Standardfehler der Schlafparameter über die drei Bedingungen	91
Tabelle 12:	Vorhersagemodell für die lärmassoziierte Aufwachwahrscheinlichkeit.....	100
Tabelle 13:	Vorhersagemodell für die Arousal-Wahrscheinlichkeit	104
Tabelle 14:	Deskriptive Statistik der Herzratenvariabilität (HRV) in den einzelnen Bedingungen	112
Tabelle 15:	Lineares gemischtes Modell zur Belästigung anhand der Bedingung.....	118
Tabelle 16:	Lineares gemischtes Modell zur selbst eingeschätzten Schlafqualität anhand der Bedingung, Referenz: Kontrollbedingung	121
Tabelle 17:	Lineares gemischtes Modell zur Vorhersage der selbst eingeschätzten Schläfrigkeit (KSS) anhand der Bedingung, erweitertes Modell, Referenz: Kontrollbedingung.....	123
Tabelle 18:	Fragestellung der Literaturanalyse aufgegliedert nach der PEOS-Einteilung (Freiberg et al. 2019)	127
Tabelle 19:	Ein- und Ausschlusskriterien für die Literatursuche.....	127
Tabelle 20:	Übersicht über die in der Literatursuche identifizierten relevanten Studien nach PEOS	162

Abkürzungsverzeichnis

%HA	Percent highly annoyed; Prozentanteil hoch belästigter Personen
AFC	Adapted Forced Choice Verfahren zur Variation eines Parameters in einem psychophysikalischen Experiment anhand von Antwortverhalten, z. B. zur Messung von Detektions- und Unterschiedsschwellen
AGL	Above Ground Level, Höhe über Grund, typischerweise angegeben in englischen Fuß (ft)
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics amerikanischer Berufsverband für Luft- und Raumfahrttechnik
AIC	Akaike Information Criterion
AMSAN	Arbeitsmedizinische Simulationsanlage (DLR)
APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
ASCENT	Aviation Sustainability Center Kooperative Luftfahrtforschungsorganisation, die von der Washington State University und dem Massachusetts Institute of Technology gemeinsam geleitet wird
ASEL	A-bewerteter Schallereignispegel Die A-Bewertung ist eine Frequenzgewichtung der Schallpegelwerte
BGBl	Bundesgesetzblatt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie e.V., Düsseldorf
CI	Konfidenzintervall
COVID-19	Coronavirus-Erkrankung-2019
dB	Dezibel
dB(A)	A-bewertete Dezibel Die A-Bewertung ist eine Frequenzgewichtung der Schallpegelwerte angelehnt an die Kurve gleicher Lautheit bei 40 phon
dB/Okt.	Dezibel pro Oktave
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DiätV	Diätverordnung
DLMB	Deutsches Lebensmittelbuch
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyogramm
:envihab	luft- und raumfahrtmedizinischen Forschungsanlage des DLR („environment“ = Umwelt und „habitat“ = Lebensraum)
EOG	Elektrookulogramm
et al.	et alii (und andere)
EU	Europäische Union

FaINT	FArfield Investigation of No boom Threshold
FFP2-Maske	filtering face piece partikelfiltrierenden Atemschutzes der Klasse 2
FluLärmG	Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm
FrSaftErfrischGetrV	Verordnung über Fruchtsaft, einige ähnliche Erzeugnisse, Fruchtnektar und koffeinhaltige Erfrischungsgetränke (Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeverordnung)
ft	Längenmaß „Englisches Fuß“, 1 ft = 30,48 cm
GDB	Genossenschaft Deutscher Brunnen e.G., Bonn
GfK	GfK SE, Nürnberg
GVM	GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Mainz
h	Stunde(n); Uhrzeit
HRV	Herzratenvariabilität
HSD	Honest Significant Difference
Hz	Hertz, Maßeinheit der Frequenz
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICBEN	International Commission on Biological Effects of Noise
ICP	Integrated Circuit Piezoelectric
IN	Impulsive Noise
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
kHz	Kilohertz Maßeinheit der Frequenz
km	Kilometer
KSS	Karolinska Sleepiness Scale
L_{Aeq}	A-gewichteter, äquivalenter Schalldruckpegel
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
L_{AS,max}	A-bewerteter Maximalpegel
LEF-K	Kurzversion der Weinstein-Skala zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit
LFN	Low Noise Frequency
LuftVO	Luftverkehrsordnung
L_{z,eq}	Z-gewichteter (ungewichteter), äquivalenter Schalldruckpegel
M	Mittelwert
M5	Modul 5, Psychologielabor (:envihab, DLR)
MDiff	Mittelwert-Differenz
Möve	Mehrweg- und ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
Mo.	Modus oder Modalwert Wert, der in einer Datenreihe am häufigsten vorkommt
ms	Millisekunde(n)
N	Anzahl der Versuchspersonen
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NREMS	Non-REM-Schlaf
övE	ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
p	Wahrscheinlichkeit
Pa	Pascal Maßeinheit des Drucks
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
p_{peak}	Maximaler Schallüberdruck in Pascal
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index
R	Recodierung
REMS	Rapid Eye Movement-Schlaf
RUMBLE	RegUlation and norM for low sonic Boom LEvels
s	Sekunde(n)
S1 – S4	Schlafstadium 1 bis 4
SD	Standardabweichung
SE	Standard error (Standardfehler)
SENECA	EU-Projekt „noiSe and EmissioNs of supErsoniC Aircraft“
SOL	Sleep Onset Latency (Einschlafdauer)
SWS	Slow Wave Sleep (Tiefschlaf)
TIB	Time in Bed (Bettliegezeit)
TST	Total Sleep Time (Gesamtschlafzeit)
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UOL	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
VdF	Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V., Bonn
VerpackV	Verpackungsverordnung
VDM	Verband Deutscher Mineralbrunnen e.V., Bonn
v. H.	Von Hundert
VIF	Variance Inflation Factor
vs.	versus
wafg	Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e.V., Berlin
WASO	Wake After Sleep Onset ((Wachliegezeit nach dem Einschlafen bis zum Ende der Bettliegezeit)
WHO	World Health Organisation Weltgesundheitsorganisation
z	Abstand zur Caustic line
ZEUS GmbH	Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung

Zusammenfassung

Einleitung und Aufgabenstellung

Überschallflugzeuge die mit Überschallgeschwindigkeit fliegen erzeugen eine Druckwelle, die am Erdboden angekommen als lauter Überschallknall wahrgenommen wird. Um negative Auswirkungen wie Schlafstörungen, Schreckreaktionen und Belästigung zu vermeiden, war das Fliegen mit Überschallgeschwindigkeit über Land in Deutschland bis 2015 ausdrücklich verboten. Derzeit strebt die Industrie die Wiedereinführung ziviler Überschallflüge an. Neue Flugzeugkonfigurationen, sogenannte Low-Boom-Designs, und Flugverfahren wie das Mach-Cut-off-Verfahren werden entwickelt, um die Lärmemissionen von Überschallflugzeugen zu reduzieren und eine Zulassung für den zivilen Einsatz zu erreichen. Während es bislang nur wenige Studien zu der Wirkung dieser Low-Boom-Designs auf das Belästigungsempfinden, die subjektiv wahrgenommene Lautheit sowie auf physiologische Reaktionen gibt (z. B. Töpken & van de Par 2021; Marshall & Davies 2012), wurden noch keine Studien durchgeführt, in denen die Wirkung auf den Schlaf untersucht wurde. Daher besteht Forschungsbedarf, um die Lärmwirkung zukünftiger Überschallknalle zu untersuchen. Im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) sollte im Rahmen eines Forschungsprojekts eine Laborstudie durchgeführt werden, in der die Wirkung von durch Low-Boom-Flugzeuge und durch die Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens erzeugte Überschallknalle, insbesondere auf den Schlaf, untersucht werden. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen und einer Literaturrecherche sollten Kriterien abgeleitet werden, um die Zumutbarkeit von Überschallknallen durch zukünftige zivile Überschallflugzeuge für die Bevölkerung zu beurteilen.

Stimuli und Validierung

Da zum Startzeitpunkt des Projektes keine Aufzeichnungen von realen Low-Boom-Überschallknallen vorhanden waren, wurde zur Bearbeitung der Fragestellung auf simulierte Drucksignaturen zurückgegriffen. Aus verschiedenen Optionen wurde die C608-Signatur aus den Arbeiten des dritten AIAA Sonic Boom Prediction Workshop als Low-Boom-Drucksignatur ausgewählt. Diese soll dem NASA X-59 Demonstrator entsprechen und einem zukünftigen zivilen Überschalljet nahekommen. Durch einen Austausch mit der Pennsylvania State University konnten auf Basis dieser C608-Signatur passende Mach-Cut-off-Simulationen, bzw. Low-Boom-Signatur mit Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens, erstellt werden.

Für die Darbietung der Signaturen im Schlaflabor wurde zusätzlich für beide Signaturen die Transmission von außen nach innen generisch simuliert durch eine frequenzunabhängige Pegelabsenkung und eine Tiefpassfilterung, die dem Massegesetz für Schalltransmission bei einschaligen Bauteilen und senkrechtem Schalleinfall entspricht.

Die Wiedergabe der Low-Boom- und Mach-Cut-off-Signatur im Schlaflabor wurde über bereits existierende Subwoofer realisiert. Aufgrund des Frequenzganges der aktiven Subwoofer zu sehr tiefen Frequenzen hin und der räumlichen Situation im Schlaflabor (größeres Raumvolumen und dauerhafte Belüftung) war davon auszugehen, dass insbesondere sehr tiefe Frequenzen von wenigen Hertz (Hz) nicht reproduziert werden können. Bei sehr tiefen Frequenzen liegt aber ein maßgeblicher Teil der Energie von Low-Boom-Signalen und es war zu erwarten, dass die Wirkung der Schalldarbietung im Schlaflabor niedriger als in spezialisierten Laboren ausfallen würde.

Entsprechend wurde zur Validierung der Schalldarbietung ein Vergleich von Aufnahmen aus dem Schlaflabor und den Originalsignaturen in der Druckkammer der Universität Oldenburg durchgeführt. In zwei separaten Hörexperimente wurde zum einen die Kurzzeit-Lästigkeit beurteilt und zum anderen die Detektionsschwelle für Hochpass-gefilterte Signale bestimmt.

Die Ergebnisse für die Kurzzeit-Lästigkeit ergaben für alle drei Schlafräume des Schlaflabors ähnliche Urteile, was für eine gleichmäßige Beschallung spricht. Im Vergleich zu den Originalsignaturen lagen die Urteile für die Aufnahmen der C608-Signatur aus dem Schlaflabor jedoch höher. Als mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen den Originalsignaturen und den jeweiligen im Schlaflabor aufgenommenen Signaturen können verschiedene Faktoren in Frage kommen, wobei eine genaue Identifikation der Ursachen für diese Urteilsunterschiede schwierig ist. Die Urteile aus den Hörexperimenten sind dennoch sehr ähnlich zu den Kurzzeit-Lästigkeitsurteilen, die am Morgen nach der letzten Nacht von den Versuchspersonen der Schlafstudie erhoben wurden.

Die Detektionsschwelle für die Hochpass-gefilterten Signale lag im Mittel bei 60 Hz und somit deutlich über der unteren Grenzfrequenz der genutzten Subwoofer. Ein potentieller Einfluss der unteren Grenze des Übertragungsbereiches von den genutzten Subwoofern sollte entsprechend den Ergebnissen des Detektionsexperiments nicht detektierbar gewesen sein.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse des Detektionsexperimentes und auch die Kurzzeitlästigkeitsurteile dafür, dass die tieffrequente Schallexposition für beide Signaturen in allen drei Schlafräumen adäquat sowie vergleichbar war und die resultierende Wirkung der im Schlaflabor dargebotenen Signaturen nicht unterschätzt wurde.

Design der Schlafstudie

Vor der Teilnahme an der Schlafstudie durchliefen die Studieninteressierten ein mehrstufiges Auswahlverfahren (Fragebogen, Audiometrie, Probenacht), um sicherzustellen, dass bei den Versuchspersonen keine gesundheitsrelevanten Bedingungen vorlagen, welche die Auswertung und Interpretierbarkeit der Laborergebnisse beeinträchtigen könnten. Studieninteressierte mit Hörstörungen, psychische und physiologische Erkrankungen, insbesondere Schlafstörungen wie schlafbezogene Atemstörungen (Apnoen) oder periodische Beinbewegungen sowie mit bestimmten Medikationen wurden ausgeschlossen.

10 Tage vor ihrer Teilnahme wurden die Versuchspersonen gebeten 8 Stunden Bettzeit einzuhalten und zur Überprüfung ein Aktometer zu tragen, das die körperliche Aktivität aufzeichnet. Diese Vorbereitung diente der Adaptation und sollte sicherstellen, dass bei allen Versuchspersonen die gleichen Ausgangsbedingungen im Hinblick auf den Schlafdruck und den Schlafrhythmus vorlagen. Die Versuchspersonen verbrachten drei aufeinanderfolgende Nächte im Schlaflabor, darunter eine ruhige Kontrollnacht ohne Wiedergabe von Lärmereignissen (Kontrollbedingung) sowie zwei Nächte mit jeweils 40 eingespielten Überschallknallen. Während der beiden Lärmnächte wurden entweder Low-Boom- (Low-Boom-Bedingung) oder Mach-Cut-off-Signaturen (Mach-Cut-off-Bedingung) eingespielt. Während die Kontrollbedingung immer die erste Nacht war, war die Reihenfolge der Lärmbedingungen randomisiert und die Zuteilung der Versuchspersonen erfolgte ausbalanciert. Die Studie wurde doppelblind durchgeführt, d. h. sowohl die Versuchspersonen als auch die Mitarbeitenden und die Datenauswertenden erhielten keine konkreten Informationen über die Art des Lärms oder die Bedingungen. Zur Untersuchung objektiver Schlafbeeinträchtigungen wurden während der drei Studienächte polysomnographische Messungen vorgenommen. Anhand der Polysomnografie wurden Ganznachtparameter (Makroparameter und EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf) sowie ereignisbezogene Aufwachereignisse, Arousals, Schlaf-Enttiefungen und Veränderungen im EEG-Spektrum bestimmt. Zur Quantifizierung der ereignisbezogenen Reaktionen wurde die relative prozentuale Rate bestimmt, mit der die Reaktion unmittelbar nach einem Lärmereignis, d. h. innerhalb einer Epoche von 30 Sekunden, auftrat. Die Rate der spontanen Reaktionen der Kontrollbedingung wurde bestimmt, indem Lärmereignisse zu den gleichen Zeitpunkten wie in den beiden Lärmbedingungen supponiert wurden. Für die ereignisbezogenen Aufwachereignisse und Arousals wurden Vorhersagemodelle abgeleitet und die lärminduzierten

Raten quantifiziert, indem die jeweilige Rate als Differenz zur spontanen Rate in der Kontrollbedingung berechnet wurde. Um subjektive Beeinträchtigungen zu erfassen, beantworteten die Versuchspersonen nach jeder Nacht Fragebögen zur Schlafqualität, zur Schläfrigkeit sowie zur lärmbezogenen Belästigung. Am dritten Morgen, wurden zudem in einer ruhigen Kontrollbedingung ohne Wiedergabe von Lärmereignissen und unter Einspielung von jeweils 5 der beiden Lärmsignaturen (Low-Boom- und Mach-Cut-off-Bedingung) physiologische Reaktionen (Herzrate und Blutdruck) im Wachzustand über einen Zeitraum von jeweils 13,5 Minuten gemessen. Anhand dieser Daten wurde die Herzratenvariabilität über die drei Messzeiträume und die ereignisbezogene Veränderung des Blutdrucks und der Herzrate bestimmt. Für die Kontrollbedingung wurden auch hier Lärmereignisse zu den gleichen Zeitpunkten wie in den beiden Lärmbedingungen supponiert. Für die ereignisbezogene Veränderung des Blutdrucks wurde die Differenz zwischen dem diastolischen und systolischen Blutdruck-Wert gemittelt über 30 Sekunden vor dem Lärmereignis und den jeweiligen Werten in den 30 Sekunden nach dem Lärmereignis berechnet. Für die ereignisbezogene Veränderung der Herzrate wurde die Differenz zwischen dem gemittelten bpm-Wert über die 10 Sekunden vor dem Lärmereignis und dem gemittelten Wert über die 10 Sekunden nach dem Lärmereignis berechnet. Für alle Zielvariablen wurde untersucht, ob es einen Effekt der Bedingung (Kontrolle, Low-Boom, Mach-Cut-off) gab.

Ergebnisse der Schlafstudie

Insgesamt wurden die Daten von 37 Versuchspersonen (18 Frauen, 19 Männer) ausgewertet. Die Versuchspersonen waren im Mittel ca. 35 Jahre alt ($M = 34,54$; $SD = 12,05$) und lagen zwischen 20 und 64 Jahren.

Die Analyse der 10 Parameter für die Schlaf-Makrostruktur zeigte, dass die Bedingung lediglich auf die Schlafeffizienz und die Gesamtschlafzeit (TST) einen signifikanten Effekt hatte. Während sich die Low-Boom-Bedingung nicht von der Kontrollbedingung unterschied, ergab sich in der Low-Boom-Bedingung eine signifikant niedrigere Schlafeffizienz von 88,5 % und TST von ca. 425 Minuten als in der Mach-Cut-off-Bedingung mit einer Schlafeffizienz von 91,4 % und einer TST von ca. 439 Minuten. Die EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf (NREMS) über die ganze Nacht unterschieden sich nicht signifikant zwischen den drei Bedingungen. Die ereignisbezogenen Analysen zeigten, dass die Aufwach-Rate mit 9 % in der Low-Boom-Bedingung am höchsten war und sich signifikant von der Kontrollbedingung mit 2,6 % und von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 4,3 % unterschied. Abzüglich der spontanen Aufwach-Rate der Kontrollbedingung ergab sich für die Low-Boom-Bedingung eine lärminduzierte Aufwach-Rate von 6,4 % und für die Mach-Cut-off-Bedingung 1,7 %. Die höchste Arousal-Rate von 16,6 % ergab sich für die Low-Boom-Bedingung und unterschied sich signifikant von der Kontrollbedingung mit 8,9 % und von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 11,6 %. Nach Abzug der spontanen Arousal-Rate der Kontrollbedingung ergab sich für die Low-Boom-Bedingung eine lärminduzierte Arousal-Rate von 7,8 % und für die Mach-Cut-off-Bedingung 2,8 %. Die Analyse der Schlaf-Enttiefungen, definiert als Wechsel von Tiefschlaf (S4 oder S3) zu REM-Schlaf oder stabilem Schlaf (S2), zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen. Jedoch gab es einen deutlichen Effekt auf die langsamwellige Aktivität (LWA) im NREMS in der ersten Minute unmittelbar nach einem Low-Boom-Ereignis: Die spektrale Leistung war im Delta-Frequenzband signifikant niedriger und im Beta-Band signifikant höher als in der Kontroll- und der Mach-Cut-off-Bedingung.

Die Analysen der physiologischen Messungen im Wachzustand zeigten keinen Effekt der Bedingung auf die Herzratenvariabilität. Während sich der diastolische und systolische Blutdruck nicht zwischen den Bedingungen unterschied, führten die Low-Boom-Ereignisse zu einer signifikanten Reduktion der Herzrate von 2 % im Vergleich zur Kontrollbedingung mit einer Reduktion von 0,3 % und zur Mach-Cut-off-Bedingung mit 0,2 %.

Die Analysen der subjektiven Beurteilungen zeigten, dass die Belästigung auf der Skala von 0 bis 10 nach der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Ereignissen mit einem Wert von 4,8 signifikant höher war als nach der Mach-Cut-off-Bedingung mit einem Wert von 1,0 und der Kontrollbedingung mit der Bewertung von 0,8. Die Belästigungsreaktionen auf die nächtlichen Lärmereignisse entsprachen in etwa den Kurzzeit-Lästigkeits-Urteilen der Hörexperimente der Universität Oldenburg (Low-Boom = ca. 5,3; Mach-Cut-off = ca. 1,4). Die Einschätzung der Schlafqualität auf der Skala von 0 bis 60 unterschied sich nicht zwischen der Low-Boom-Bedingung mit einem Wert von 31,1 und der Kontrollbedingung mit einem Wert von 29,8. Jedoch wurde die Schlafqualität nach der Low-Boom-Bedingung signifikant schlechter eingeschätzt als nach der Mach-Cut-off-Bedingung mit dem höchsten Wert von 38,5. Auf der Skala von 1 bis 9 ergab sich eine signifikant höhere Einschätzung der Schläfrigkeit für die Low-Boom-Bedingung mit einem Wert von 5,0 als für die Kontrollbedingung mit 4,1 und für die Mach-Cut-off-Bedingung mit einem Wert von 3,8.

Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der Schlafstudie

Die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität (z. B. Gesamtschlafzeit, Schlaffeffizienz, Wachliegezeit nach Schlafbeginn) ließ keinen eindeutigen Effekt der Low-Boom-Ereignisse auf die Gesamtnacht-Parameter erkennen. Es kann jedoch vermutet werden, dass die Anwendung des Mach-Cut-off-Flugverfahrens die negativen Auswirkungen der Überschallknalle auf die Schlafqualität zumindest in Bezug auf die Schlafdauer und die Schlaffeffizienz abschwächen kann. Im Gegensatz dazu zeigten die ereignisbezogenen Analysen, dass die Low-Boom-Ereignisse im Vergleich zu einer lärmfreien Nacht zu deutlich mehr Aufwachreaktionen und Arousals führten und die LWA im NREMS reduzierten. Demnach können Low-Boom-Flugzeuge, trotz geringerer Lärmemissionen als konventionelle Überschallflugzeuge, zu Schlafstörungen führen. Die Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens kann diesen Effekt abschwächen.

Um die Auswirkungen von nächtlichen Überschallknallen auf den Schlaf einordnen zu können, wurde ein Vergleich zu anderen konventionellen Verkehrsträgern (Schiene, Luft, Straße) gezogen. In einer anderen Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011) wurde durch subsonischen Fluglärm sowie durch Bahn- und Straßenverkehrslärm bei Maximalschalldruckpegeln ($L_{AS,max}$) zwischen ca. 55 bis 60 dB eine durch Low-Boom-induzierte vergleichbare Aufwach-Rate von 6,4 % gefunden. Die durch Low-Boom-Ereignisse induzierte Arousal-Rate von 7,8 % ist vergleichbar mit der durch konventionellen Verkehrslärm verursachten Rate durch Maximalpegel von ca. 45 dB(A) (Straßenverkehrslärm), 50 dB(A) (Bahnlärm) und 55 bis 60 dB(A) (Fluglärm). Die deutlich geringere durch Mach-Cut-off-Ereignisse induzierte Aufwach-Rate von 1,7 %, war durch Flug- und Straßenverkehrslärm bei einem Pegel von 50 dB(A) bereits überschritten, für Bahnlärm lag der korrespondierende Pegel zwischen 50 und 55 dB(A). Eine durch Mach-Cut-off-induzierte entsprechende Arousal-Rate von 2,8 % wurde durch Schienen- und Straßenverkehrslärm bei Pegeln von 45 dB(A) bereits überschritten, wohingegen diese Rate durch Fluglärm bei Maximalpegel zwischen 45 und 50 dB(A) gefunden wurde.

Auch wenn der Effekt von Low-Boom-Ereignissen auf die Aufwachwahrscheinlichkeit geringer ist als der von konventionellen Fluglärmereignissen, wäre der Expositionsbereich unterhalb der Flug-Trajektorie größer (ca. 40 km zu beiden Seiten) und damit auch die Anzahl der Betroffenen. Die lärminduzierte Aufwach-Rate von 6,4 % würde bedeuten, dass es bei etwa 16 Überflügen durch Low-Boom-Flugzeuge mit Überschallgeschwindigkeit pro Nacht zu einer lärminduzierten Aufwachreaktion kommen könnte. Bei dieser Annahme ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in Laborstudien gefundenen Effekte etwas überschätzt werden und nur bedingt übertragbar sind auf die Allgemeinbevölkerung, da in dieser Studie ausschließlich gesunde und altersentsprechend normal hörende Versuchspersonen untersucht wurden. Zudem wurde die

Wirkung von weiteren durch Überschallknalle erzeugte Expositionen wie Rattle (Deutsch: *Klappern*) und Vibration nicht berücksichtigt, welche den Effekt wiederum verstärken könnten.

Die Ergebnisse zu den physiologischen Reaktionen im Wachzustand zeigten, dass die Low-Boom-Ereignisse zu einem Absinken der Herzrate geführt haben. Das lässt vermuten, dass diese Überschallknalle eher mit Eigenschaften einhergehen, die bei bewusster Wahrnehmung nicht zu einer Schreckreaktionen führen, sondern zu einer Orientierungsreaktion, die durch Lärm geringer Intensität ausgelöst werden kann (Shoushtarian et al. 2019).

Anhand der Ergebnisse zu den subjektiven Beurteilungen kann geschlussfolgert werden, dass obwohl die Lärmemissionen von Low-Boom-Flugzeugen geringer sein werden als die von konventionellen Überschallflugzeugen, die nächtlichen Überschallknalle dennoch zu Belästigungsreaktionen im mittleren Bereich und zu einer leicht erhöhten Schläfrigkeit führen können. Die Anwendung des Mach-Cut-off-Flugverfahrens kann die negative Wirkung der Überschallknalle von Low-Boom-Flugzeugen auf das Belästigungsempfinden, die Schläfrigkeit und die selbst eingeschätzte Schlafqualität abschwächen.

Entwicklung und Anwendung von Zumutbarkeitskriterien

Um geeignete Kriterien zur Bestimmung der Zumutbarkeit von zukünftigen zivilen Überschallflügen abzuleiten, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. ausführliche Recherche und -auswertung der nationalen und internationalen, einschlägigen Fachliteratur über die Lärmwirkungen von zivilen Überschallflügen;
2. das Verfolgen laufender nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten zu dem Thema;
3. das Aufgreifen und die Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie;
4. daraus ableitend die Erarbeitung eines Vorschlags für Kriterien, um die Zumutbarkeit von Überschallknallen durch zukünftige zivile Überschallflugzeuge für die Bevölkerung in Europa zu beurteilen.

Die Literaturanalyse wurde methodisch an die Vorgehensweise eines ‚Scoping Reviews‘ angelehnt (von Elm, Schreiber & Haupt 2019) und ihre Fragestellung gliederte sich nach der PEOS-Einteilung (Freiberg et al. 2019). Es wurden Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt, anhand derer Suchbegriffe abgeleitet wurden. Die Literatursuche erfolgte in verschiedenen Datenbanken: PsychINFO, Psyn dex, PubMed, BASE, relevante Tagungsbände. Der Prozess der Literatursuche und -analyse wurde angelehnt an das sogenannte PRISMA-Statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; Moher et al. 2009).

Neben der Literatursuche wurden die Arbeiten von abgeschlossenen und laufenden relevanten Forschungsprojekten berücksichtigt: das abgeschlossene EU-Horizon-2020-Vorhaben RUMBLE (<https://rumble-project.eu/i/>), laufende und abgeschlossene NASA (National Aeronautics and Space Administration) Projekte, wie die Studie QSF18 (Quiet Supersonic Flights 2018; Page et al. 2020; Fidell et al. 2020), Forschungsaktivitäten des Forschungsverbundes Aviation Sustainable Center (ASCENT; <https://ascent.aero>) zu Mach-Cut-off Flügen (z. B. Sparrow & Vigeant 2019), sowie die Forschungsaktivitäten der japanischen Luft- und Raumfahrtforschungseinrichtung JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency).

Ergebnisse der Literaturanalyse

In der Literatursuche konnten 61 relevante Publikationen identifiziert werden, darunter 12 Reviews. Zusätzlich wurden 21 weitere Publikationen berücksichtigt.

Die ersten Studien zu Überschallknallen untersuchten zunächst eine etwaige direkte Wirkung der Überschallknalle auf die physische Gesundheit von Menschen, z. B. direkte Wirkungen auf

das Gehör (Maglieri, Huckel & Parrott 1961). Erst mit der Zeit wurde der Fokus auf weitere mögliche Lärmwirkungen gelegt, wie Lärmbelästigung, Startle-Effekt (Deutsch: *Aufschrecken*) und Schlafstörungen. Neben dem Geräusch der Überschallknalle ist ein weiteres wichtiges Phänomen das mit der Schockwelle einhergehende Rattle (Deutsch: *Klappern*) von Gegenständen oder Fenstern innerhalb eines Hauses. Zusätzlich können bei geringer Frequenz spürbare taktile Vibrationen auftreten. Sowohl die Wirkungen von Überschallknallen als auch die von Rattle und Vibrationen wurden daher in zahlreichen Studien untersucht. Die älteren Studien untersuchten die Wirkungen von herkömmlichen Überschallknallen auf den Menschen. Erst um die Jahrtausendwende wurden erstmals Studien mit simulierten „Low“ Sonic Booms durchgeführt; also mit Überschallknallen, die geringere Amplituden aufwiesen.

Die Lärmwirkungen werden in den verschiedenen Studien teilweise sehr unterschiedlich erfasst und die Stichprobengrößen variieren sehr stark. Insgesamt werden Überschallknalle und auch Low Sonic Booms in der Regel innerhalb eines Gebäudes als belästigender wahrgenommen als im Freien, was unter anderem auf begleitende Vibrationen und Rattle zurückzuführen ist, die das Belästigungsempfinden verstärken können (z. B. Kryter 1966; Miller 2011). Einige Studien ermittelten dB Zuschläge bei Vorhandensein von Rattle und Vibrationen (z. B. Sullivan et al. 2010). Für Rattle fanden sich dB-Zuschlagswerte (vgl. auch Sullivan et al. 2010) von 0 dB bis 20 dB (z. B. Pearsons et al. 1993; Fidell, Silvati & Pearsons 2002; Schomer & Averbuch 1989). Für Vibrationen ergaben zwei Studien Zuschlagswerte von 0 dB bis 8 dB (Carr & Davies 2015; Rathsam, Klos & Loubeau 2015; Rathsam & Klos 2016). Die Anstiegszeit zeigte sich ebenfalls als relevanter Einflussfaktor auf die Belästigung und wahrgenommene Lautheit (z. B. May 1972). Bei der Untersuchung und Vorhersage von Lärmbelästigung durch Überschallknalle und Low Sonic Booms scheint daher die Berücksichtigung von Rattle und Vibrationen relevant zu sein. Beim Vergleich verschiedener akustischer Metriken zeigt sich PL (Perceived Level) häufig als bester Prädiktor für Lärmbelästigung (vgl. McCurdy, Brown & Hilliard 2004; Rathsam, Loubeau & Klos 2012; Rathsam, Loubeau & Klos 2015; Carr & Davies 2015; Carr et al. 2020). Insgesamt liegen noch relativ wenig Forschungsergebnisse, insbesondere zur Langzeitwirkung von Low Sonic Booms vor. Anders als bei Unterschallflügen, bei denen Anwohnende in Flughafennähe Fluglärm ausgesetzt sind, wäre eine breite Masse an Menschen Low Sonic Booms sowie den damit verbundenen Vibrationen und Rattle ausgesetzt, die während des gesamten Fluges mit Überschallgeschwindigkeit auftreten können.

Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie und der Literaturanalyse

Zur Ableitung von Zumutbarkeitskriterien für Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flüge zum Schutz der Bevölkerung werden die Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie und der Literaturanalyse aufgegriffen und im Hinblick auf etwaige Zumutbarkeitskriterien diskutiert.

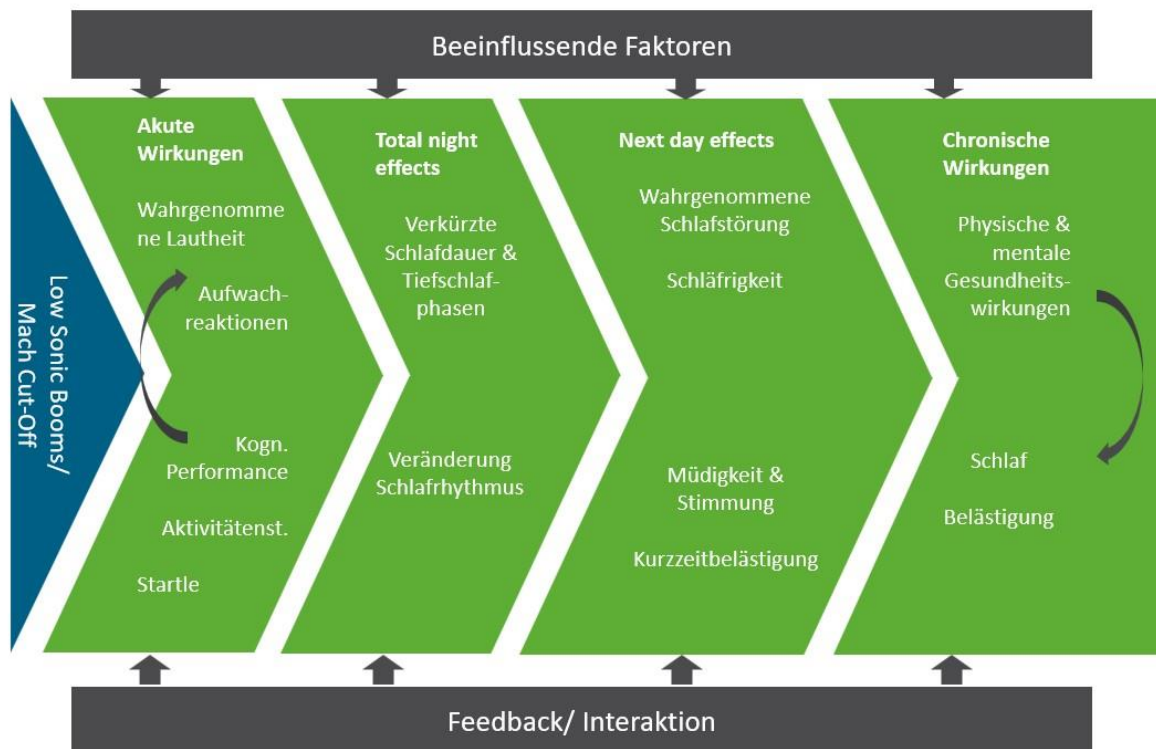
Grundsätzlich können die aus der Schlafstudie und Literatur identifizierten Kriterien in akustische Parameter und Lärmwirkungen unterteilt werden. Akustische Parameter beinhalten verschiedene akustische Metriken (z. B. ASEL & PL), die Begleiterscheinung von Überschallflügen Rattle (Deutsch: *Klappern*) und Vibrationen, sowie die Anzahl der Lärmereignisse.

Lärmwirkungen sind ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung von Zumutbarkeiten. Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) entwickelten ein Modell, welches verschiedene Lärmwirkungen von nächtlicher Fluglärmexposition nach ihrem zeitlichen Auftreten in vier Wirkungslevel differenziert: Akute Wirkungen, Wirkungen über die gesamte Nacht (Total night effects), Wirkungen am darauffolgenden Tag (next day effects) und chronische Wirkungen. Akute Wirkungen sind hierbei direkte physiologische und psychische Wirkungen. Die „Total night effects“ beinhalten Wirkungen, die sich durch die akuten Wirkungen über die gesamte Nachtzeit akkumulieren. „Next day effects“ beziehen sich auf Wirkungen, die am nächsten Tag

spürbar werden und durch die ersten beiden Wirkungslevel entstehen. Das letzte Wirkungslevel umfasst langfristige, chronische Wirkungen („chronic effects“), die aufgrund der ersten drei Wirkungslevel auftreten können. Zwischen den Lärmwirkungen kommt es laut Autor*innen zusätzlich zu Interaktionen und Wechselwirkungen. Des Weiteren haben Faktoren, wie Einstellungen, Vertrauen in Verantwortliche oder die individuelle Lärmempfindlichkeit einen Einfluss (Porter, Kershaw & Ollerhead 2000).

Auf Basis der im Rahmen der Schlafstudie verwendeten und der Literaturanalyse identifizierten Lärmwirkungen wurde ein adaptiertes Modell entwickelt, welches neben der nächtlichen Exposition auch die Exposition tagsüber berücksichtigt. Die für Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flüge identifizierten Lärmwirkungen wurden somit den vier Wirkungsleveln nach Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) zugeordnet (siehe Abbildung Z 1). In Bezug auf Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flüge beinhalten akute Lärmwirkungen beispielsweise die wahrgenommene Lautheit, Aufwachreaktionen und die Startle-Reaktion (Deutsch: *Aufschrecken*). Die total nights effects umfassen eine verkürzte Schlafdauer und verkürzte Tiefschlafphasen sowie eine durch die Störungen hervorgerufene Änderung des Schlafrhythmus. Nach einer lärmgestörten Nacht (next day effects) kann es unter anderem zu Schläfrigkeit und Belästigung (Kurzzeitbelästigung) kommen. Im Zusammenhang mit Fluglärm fanden sich langfristige Wirkungen wie chronische Schlafstörungen, langfristige Belästigung sowie erhöhte physische und psychische Erkrankungsrisiken. Diese langfristigen Wirkungen könnten auch bei Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen eine Rolle spielen, wobei zu den langfristigen Wirkungen von Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen noch keine Forschungsergebnisse vorliegen.

Abbildung Z 1: Adaptiertes Modell (nach Porter, Kershaw & Ollerhead 2000) mit relevanten Lärmwirkungen für Zumutbarkeitskriterien



Anmerkung: Angepasstes Modell nach Porter, Kershaw und Ollerhead (2000), Quelle: eigene Darstellung, ZEUS.

Empfehlungen zur Ableitung von Zumutbarkeitskriterien

Ziel dieses Forschungsprojekts war unter anderem die Erarbeitung von geeigneten Zumutbarkeitskriterien für die Beurteilung von Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen.

Es bietet sich beispielsweise für die Beurteilung von Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen an, die unterschiedlichen Lärmwirkungen einem Ranking zu unterziehen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO 2018) hat dies bereits für andere Lärmquellen getan und diese in entscheidende, relevante und nicht relevante Wirkungen unterschieden. Für mittel- bis langfristige Lärmwirkungen anderer Umgebungslärmquellen werden zudem sogenannte DALYs (disability adjusted life years) berechnet. Diese ermöglichen die Quantifizierung von – auch im Schweregrad – unterschiedlichen Lärmwirkungen und könnten in Zukunft auch für die Wirkungen von Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen sinnvoll sein.

Zum jetzigen Forschungsstand können keine konkreten Vorschläge für ein Ranking der Zumutbarkeitskriterien oder für etwaige Grenzwerte für die Zumutbarkeitskriterien abgeleitet werden. Die hier durchgeführte Schlafstudie ist ein wichtiger Schritt zur Untersuchung der Lärmwirkung von Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen, wobei anzumerken ist, dass beispielsweise der Effekt von Rattle und Vibrationen im Rahmen der Studie nicht untersucht werden konnte. Ergebnisse der für die Jahre 2026 bis 2028 geplante Feldstudie zu Low Sonic Booms der NASA (NASA's X59 Quesst Community Survey Campaign) können ebenfalls erheblich zum Wissensstand beitragen.

Summary

Introduction and task

Supersonic aircraft flying at supersonic speed generate a pressure wave that is perceived as a loud sonic boom when it reaches the ground. In order to avoid negative effects such as sleep disturbances, startle reactions and annoyance, flying at supersonic speeds over land was explicitly prohibited in Germany until 2015. The industry is currently striving to reintroduce civil supersonic flights. New aircraft configurations, so-called Low-Boom designs, and flight procedures such as the Mach-Cut-off procedure are being developed in order to reduce the noise emissions of supersonic aircraft and achieve certification for civil use. While there are only a few studies to date on the effect of these Low-Boom designs on annoyance, subjectively perceived loudness and physiological reactions (e.g., Töpken & van de Par 2021; Marshall & Davies 2012), no studies have yet been conducted to investigate the effect on sleep. There is therefore a need for research to investigate the noise effects of future sonic booms. On behalf of the Federal Environment Agency (UBA), a laboratory study was to be conducted as part of a research project to investigate the effects of sonic booms generated by Low-Boom aircraft and by the application of the Mach-Cut-off procedure, in particular on sleep. Based on the results obtained and a literature review, criteria were to be derived to assess the acceptability of sonic booms from future civil supersonic aircraft for the population.

Stimuli and validation

As no recordings of real low sonic booms were available at the start of the project, simulated pressure signatures were used to address the research question. From various options, the C608 signature from the third AIAA Sonic Boom Prediction Workshop was selected as the Low-Boom pressure signature. This signal is intended to correspond to the NASA X-59 demonstrator and come close to a future civilian supersonic jet. Through an exchange with Pennsylvania State University, the appropriate Mach-Cut-off simulations, more specifically Low-Boom signature with application of the Mach-Cut-off procedure, could be created based on this C608 signature. For the presentation of the signatures in the sleep laboratory, the transmission from the outside to the inside was also generically simulated for both signatures using a frequency-independent level reduction and low-pass filtering that corresponds to the mass law for sound transmission for single-walled structures and vertical sound incidence.

The reproduction of the Low-Boom and Mach-Cut-off signature in the sleep laboratory was realised using existing subwoofers. Due to the frequency response of the active subwoofers towards very low frequencies and the room situation in the sleep laboratory (larger room volume and permanent ventilation), it was expected that particularly very low frequencies of a few Hertz (Hz) would not be reproduced well. However, a significant proportion of the energy of Low-Boom signals lies at very low frequencies and it was to be expected that the effect of the sound presentation in the sleep laboratory would be lower than in specialised laboratories.

Accordingly, a comparison of recordings from the sleep laboratory and the original signatures in the pressure chamber at the University of Oldenburg was carried out to validate the sound presentation. In two separate listening experiments, the short-term annoyance was assessed on the one hand and the detection threshold for high-pass filtered signals was determined on the other.

The results for short-term annoyance yielded similar judgements for all three bedrooms of the sleep laboratory, which suggests a uniform sound exposure across all sleeping rooms. Compared to the original signatures, however, the short-term annoyance ratings for the recordings of the C608 signature from the sleep laboratory were higher. Various factors may explain the differences between the original signatures and the respective signatures recorded in the sleep

laboratory, but it is difficult to identify the exact causes of these differences in the ratings. Nevertheless, the judgements from the listening experiments are very similar to the short-term annoyance judgements made by awake participants in the sleep study after a night.

The detection threshold for the high-pass filtered signals was on average 60 Hz and, thus, significantly above the lower cut-off frequency of the subwoofers used. A potential influence of the lower limit of the frequency range of the subwoofers used should not have been detectable according to the results of the detection experiment.

Overall, the results of the detection experiment as well as the short-term noise judgements indicate that the low-frequency sound exposure was adequate and comparable for both signatures in all three bedrooms and that the resulting effect of the signatures presented in the sleep laboratory was not underestimated.

Design of the sleep study

Prior to participating in the sleep study, the study applicants underwent a multi-stage selection process (questionnaire, audiometry, sample night) to ensure that the participants did not have any health-related conditions that could impair the evaluation and interpretability of the laboratory results. Applicants with hearing disorders, psychological and physiological illnesses, in particular sleep disorders such as sleep-related breathing disorders (apnoea) or periodic leg movements, as well as those taking certain medications were excluded.

10 days before their participation, the participants were asked to stay in bed for 8 hours and to wear an actometer to record their physical activity. This preparation served the purpose of adaptation and was intended to ensure that all participants had the same initial conditions with regard to sleep pressure and sleep rhythm. The participants spent three consecutive nights in the sleep laboratory, including one quiet control night without any noise playback (control condition) and two nights with 40 played back sonic booms each. During the two noise nights, either Low-Boom (Low-Boom condition) or Mach-Cut-off signatures (Mach-Cut-off condition) were played back. While the control condition was always the first night, the order of the noise conditions was randomised and the allocation of participants was counterbalanced. The study was conducted double-blind, i. e. that neither the participants nor the employees and data analysers were given any specific information about the type of noise or the conditions. Polysomnographic measurements were taken during the three nights of the study to analyse objective sleep disturbances. The polysomnography was used to determine whole-night parameters (macroparameters and EEG spectra in non-REM sleep) as well as event-related awakenings, arousals, sleep transitions and changes in the EEG spectrum. To quantify the event-related reactions, the relative percentage rate at which the reaction occurred immediately after a noise event, i. e. within an epoch of 30 seconds, was determined. The rate of spontaneous reactions in the control condition was determined by supposing noise events at the same times as in the two noise conditions. Prediction models were derived for the event-related awakenings and arousals and the noise-induced rates were quantified by calculating the respective rate as the difference to the spontaneous rate in the control condition. In order to record subjective impairments, the participants answered questionnaires on sleep quality, sleepiness and noise-related annoyance after each night. On the third morning physiological responses (heart rate and blood pressure) were also measured while awake over a period of 13.5 minutes in a quiet control condition without playback of noise events and with 5 of each of the two noise signatures (Low-Boom and Mach-Cut-off condition). These data were used to determine the heart rate variability over the three measurement periods and the event-related change in blood pressure and heart rate. For the control condition noise events were also supposed at the same times as in the two noise conditions. For the event-related change in blood pressure, the difference between the diastolic and systolic blood pressure values averaged over 30 seconds

before the noise event and the respective values in the 30 seconds after the noise event was calculated. For the event-related change in heart rate, the difference between the averaged bpm value over the 10 seconds before the noise event and the averaged value over the 10 seconds after the noise event was calculated. For all outcome variables, it was analysed whether there was an effect of the condition (control, Low-Boom, Mach-Cut-off).

Results of the sleep study

In total, the data from 37 participants (18 women, 19 men) were analysed. The subjects were on average around 35 years old ($M = 34.54$; $SD = 12.05$) and ranged from 20 to 64 years.

The analysis of the 10 parameters for the sleep macrostructure showed that the condition only had a significant effect on sleep efficiency and total sleep time (TST). While the Low-Boom condition did not differ from the control condition, the Low-Boom condition showed a significantly lower sleep efficiency of 88.5 % and TST of approximately 425 minutes than the Mach-Cut-off condition with a sleep efficiency of 91.4 % and a TST of approximately 439 minutes. The EEG spectra in non-REM sleep (NREMS) throughout the night did not differ significantly between the three conditions. The event-related analyses showed that the awakening rate was highest in the Low-Boom condition at 9 % and differed significantly from the control condition at 2.6 % and from the Mach-Cut-off condition at 4.3 %. Subtracting the spontaneous awakening rate of the control condition resulted in an awakening rate of 6.4 % for the Low-Boom condition and 1.7 % for the Mach-Cut-off condition. The highest arousal rate of 16.6 % was found for the Low-Boom condition and differed significantly from the control condition with 8.9 % and from the Mach-Cut-off condition with 11.6 %. After subtracting the spontaneous arousal rate of the control condition, the noise-induced arousal rate was 7.8 % for the Low-Boom condition and 2.8 % for the Mach-Cut-off condition. The analysis of sleep transitions, defined as the change from deep sleep (S4 or S3) to REM sleep or stable sleep (S2), showed no significant difference between the conditions. However, there was a significant effect on the slow-wave activity (LWA) in NREMS in the first minute immediately after a Low-Boom event: spectral power was significantly lower in the delta frequency band and significantly higher in the beta band than in the control and Mach-Cut-off condition.

The analyses of the physiological measurements while awake showed no effect of the condition on heart rate variability. While diastolic and systolic blood pressure did not differ between conditions, the Low-Boom events led to a significant reduction in heart rate of 2 % compared to the control condition with a reduction of 0.3 % and the Mach-Cut-off condition with 0.2 %.

The analyses of the subjective judgements showed that the annoyance on the scale from 0 to 10 was significantly higher after the night with played back Low-Boom events with a value of 4.8 than after the Mach-Cut-off condition with a value of 1.0 and the control condition with a value of 0.8. The annoyance reactions to the nocturnal noise events corresponded approximately to the short-term annoyance judgements of the hearing experiments at the University of Oldenburg (Low-Boom = approx. 5.3; Mach-Cut-off = approx. 1.4). The assessment of sleep quality on the scale from 0 to 60 did not differ between the Low-Boom condition with a value of 31.1 and the control condition with a value of 29.8. However, sleep quality was rated significantly worse after the Low-Boom condition than after the Mach-Cut-off condition with the highest value of 38.5. On the scale of 1 to 9, the assessment of sleepiness was significantly higher for the Low-Boom condition with a value of 5.0 than for the control condition with a value of 4.1 and for the Mach-Cut-off condition with a value of 3.8.

Conclusion based on the results of the sleep study

The electrophysiologically measured sleep quality (e. g. total sleep time, sleep efficiency, wake after sleep onset) showed no clear effect of the Low-Boom events on the overall night

parameters. However, it can be assumed that the use of the Mach-Cut-off flight procedure can mitigate the negative effects of the sonic booms on sleep quality, at least in terms of sleep duration and sleep efficiency. In contrast, the event-related analyses showed that the Low-Boom events led to significantly more awakenings and arousals and reduced LWA in NREMS compared to a noise-free night. Accordingly, Low-Boom aircraft can lead to sleep disturbances despite lower noise emissions than conventional supersonic aircraft. The use of the Mach-Cut-off procedure can mitigate this effect.

In order to be able to classify the effects of nocturnal sonic booms on sleep, a comparison was made with other conventional modes of transport (rail, air, road). In another laboratory study by Basner, Müller, and Elmenhorst (2011), subsonic aircraft noise and rail and road traffic noise at maximum sound pressure levels ($L_{AS,max}$) between approximately 55 to 60 dB were found to have a comparable awakening rate of 6.4 % induced by Low-Boom events. The arousal rate of 7.8 % induced by Low-Boom events is comparable to the rate caused by conventional traffic noise due to maximum levels of approximately 45 dB(A) (road traffic noise), 50 dB(A) (railway noise) and 55 to 60 dB(A) (aircraft noise). The significantly lower awakening rate of 1.7 % induced by Mach-Cut-off events was already exceeded by aircraft and road noise at a level of 50 dB(A), while the corresponding level for railway noise was between 50 and 55 dB(A). A corresponding arousal rate of 2.8 % induced by Mach-Cut-off events was already exceeded by rail and road traffic noise at levels of 45 dB(A), whereas this rate was found for aircraft noise at maximum levels between 45 and 50 dB(A).

Even if the effect of Low-Boom events on the awakening probability is lower than that of conventional aircraft noise events, the exposure area below the flight trajectory would be larger (approx. 40 km on both sides) and thus also the number of people affected. The noise induced awakening rate of 6.4 % would mean that a noise induced awakening could occur with around 16 overflights by Low-Boom aircraft at supersonic speed per night. With this assumption, however, it must be considered that the effects found in laboratory studies are somewhat overestimated and can only be transferred to the general population to a limited extent, as only healthy and age-appropriate subjects with normal hearing were examined in this study. In addition, the effect of other exposures generated by sonic booms, such as rattling and vibration, which in turn could strengthen the effect, was not considered.

The results of the physiological reactions while awake showed that the Low-Boom events led to a drop in the heart rate. This suggests that these sonic booms are more likely to be associated with characteristics that do not lead to a startle response when consciously perceived, but to an orientation response that can be triggered by low-intensity noise (Shoushtarian et al. 2019).

Based on the results of the subjective judgements, it can be concluded that although the noise emissions of Low-Boom aircraft will be lower than those of conventional supersonic aircraft, the night-time sonic booms can still lead to annoyance reactions in the medium range and slightly increased sleepiness. The use of the Mach-Cut-off flight procedure can mitigate the negative effect of the sonic booms of Low-Boom aircraft on the perception of annoyance, sleepiness and self-assessed sleep quality.

Development and application of acceptability criteria

To derive suitable criteria for determining the acceptability of future civil supersonic flights, the following steps were carried out:

1. Comprehensive research and evaluation of the relevant national and international literature on the noise impacts of civil supersonic flights;
2. Monitoring ongoing national and international research activities on the topic;
3. Reviewing and summarising the results of the conducted sleep study;

4. Based on this, the development of a proposal for criteria to assess the acceptability of sonic booms from future civil supersonic aircraft for the population in Europe.

The literature analysis was methodologically based on the approach of a scoping review (von Elm, Schreiber & Haupt 2019) with the research questions structured according to the PEOS classification (Freiberg et al. 2019). Inclusion and exclusion criteria were defined, which were used to derive search terms. The literature search was conducted in various databases: PsychINFO, Psynindex, PubMed, BASE, and relevant conference proceedings. The process of literature selection and analysis was aligned with the so-called PRISMA statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; Moher et al. 2009).

In addition to the literature search, the work of completed and ongoing relevant research projects was considered: the completed EU Horizon 2020 project RUMBLE (<https://rumble-project.eu/i/>), ongoing and completed NASA (National Aeronautics and Space Administration) projects, such as the QSF18 study (Quiet Supersonic Flights 2018; Page et al. 2020; Fidell et al. 2020), research activities of the Aviation Sustainable Centre (ASCENT; <https://ascent.aero>) on Mach cut-off flights (e. g. Sparrow & Vigeant 2019), as well as the research activities of the Japanese aerospace research organisation JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency).

Results of the literature analysis

The literature search identified 61 relevant publications, including 12 reviews. In addition, 21 otherer publications were considered.

The first studies on sonic booms primarily investigated any direct effect of sonic booms on human health, such as direct impacts on hearing (Maglieri, Huckel & Parrott 1961). Over time, the focus shifted to other potential noise effects, such as noise annoyance, startle effect and sleep disturbance. Aside from the sound of sonic booms, another important phenomenon is the rattling of objects or windows inside a house that accompanies the shock wave. Additionally, at low frequencies, noticeable tactile vibrations can occur. Both the effects of sonic booms and those of rattling and vibrations have been investigated in numerous studies. Earlier studies examined the effects of conventional sonic booms on humans. It was not until the turn of the millennium that studies with simulated “low” sonic booms were conducted, i.e. with sonic booms that had lower amplitudes.

The noise effects are assessed very differently across the various studies, and the sample sizes vary greatly. Overall, sonic booms and low sonic booms are generally perceived as more annoying within a building than outdoors, which can be attributed to accompanying vibrations and rattling that can increase the feeling of annoyance (e.g., Kryter 1966; Miller 2011). Some studies determined dB increases when rattle and vibration were present (e.g., Sullivan et al. 2010). For rattle, dB increment values were found (see also Sullivan et al. 2010) ranging from 0 dB to 20 dB (e. g. Pearsons et al. 1993; Fidell, Silvati & Pearsons 2002; Schomer & Averbuch 1989). For vibrations, two studies reported increase values from 0 dB to 8 dB (Carr & Davies 2015; Rathsam, Klos & Loubeau 2015; Rathsam & Klos 2016). The rise time was also shown to be a relevant factor influencing annoyance and perceived loudness (e. g. May 1972). Therefore, accounting for rattling and vibrations seems relevant when investigating and predicting annoyance from sonic booms and low sonic booms. When comparing different acoustic metrics, PL (perceived level) often emerges as the best predictor for noise annoyance (see McCurdy, Brown & Hilliard 2004; Rathsam, Loubeau & Klos 2012; Rathsam, Loubeau & Klos 2015; Carr & Davies 2015; Carr et al. 2020). Overall, there is still relatively little research on the long-term effects of low sonic booms. Unlike subsonic flights, where residents near airports are exposed to aircraft noise, a large number of people would be exposed to low sonic booms and the associated vibrations and rattling, which can occur throughout the entire flight at supersonic speed.

Summary of the results of the conducted sleep study and literature analysis

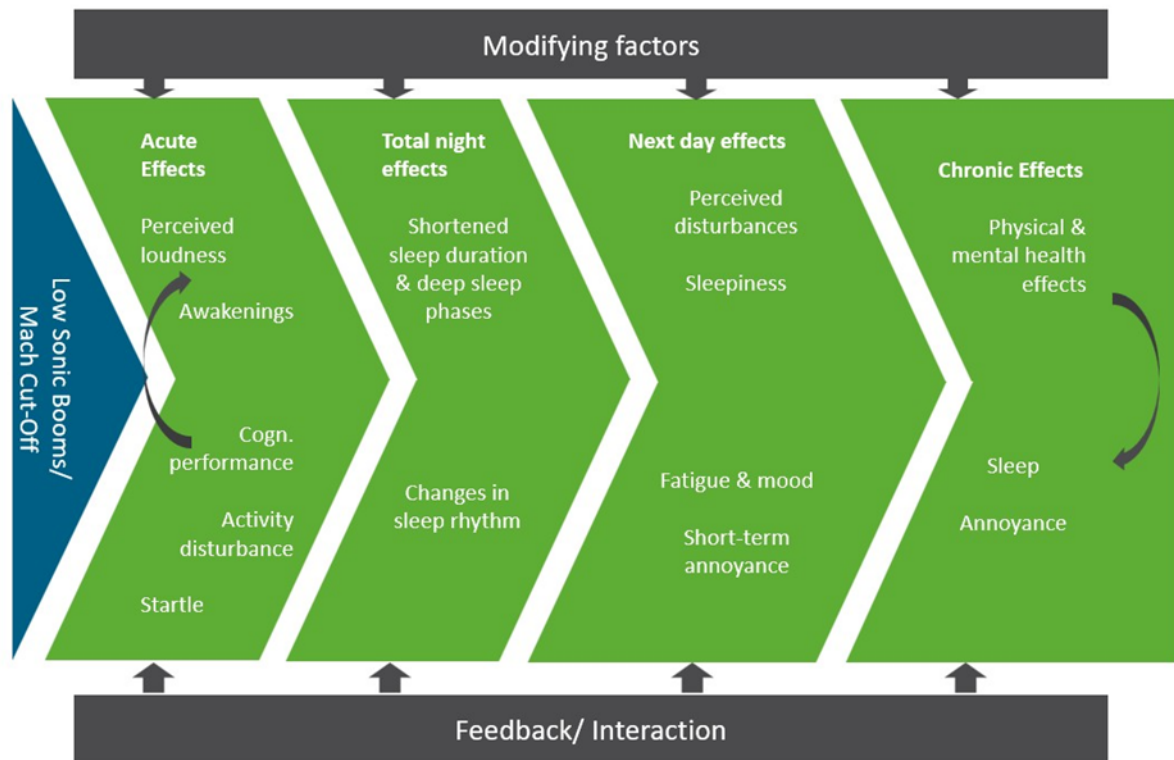
To derive acceptability criteria for low sonic booms and Mach cut-off flights aimed at protecting the population, the results of the sleep study and the literature analysis are discussed in relation to potential acceptability criteria.

In general, the criteria identified from the sleep study and literature can be divided into acoustic parameters and noise effects. Acoustic parameters include various acoustic metrics (e. g. ASEL and PL), the accompanying phenomenon of supersonic flights, rattling and vibrations, as well as the number of noise events.

Noise effects are another important aspect when assessing acceptability. Porter, Kershaw and Ollerhead (2000) developed a model that differentiates various noise effects from nighttime aircraft noise exposure based on their temporal occurrence across four effect levels: Acute effects, total night effects, next day effects, and chronic effects. Acute effects are direct physiological and psychological effects. Total night effects encompass those effects that accumulate over the entire night due to acute effects. Next day effects refer to effects that become noticeable the following day and result from the first two effect levels. The final effect level comprises long-term chronic effects that may occur as a result of the first three effect levels. Additionally, the authors note that there are interactions and interdependencies among the noise effects. Furthermore, factors such as attitudes, trust in authorities and individual noise sensitivity also play a role (Porter, Kershaw & Ollerhead 2000).

Based on the noise effects identified in the sleep study and literature analysis, an adapted model was developed that considers both nighttime and daytime exposure. The identified noise effects for low sonic booms and Mach cut-off flights were thus assigned to the four effect levels according to Porter, Kershaw and Ollerhead (2000) (see Figure 1). With regard to low sonic booms and Mach cut-off flights, acute noise effects include, for example, perceived loudness, awakening reactions and startle responses. Total nights effects encompass shortened sleep duration and reduced deep sleep phases as well as changes in sleep rhythm caused by the disturbance. After a noise-disturbed night (next day effects), sleepiness and short-term annoyance may occur. Long-term effects associated with aircraft noise include chronic sleep disturbances, long-term annoyance, and increased physical and mental health risks. These long-term effects could also play a role with low sonic booms and Mach cut-off flights; however, no research results are currently available on the long-term effects of low sonic booms and Mach cut-off flights.

Figure S 1: Adapted model (after Porter, Kershaw & Ollerhead 2000) with relevant noise effects for acceptability criteria



Note: Model adapted from Porter, Kershaw and Ollerhead (2000). Source: own illustration, ZEUS.

Recommendations for deriving acceptability criteria

One of the aims of this research project was to develop suitable acceptability criteria for the assessment of low sonic booms and Mach cut-off flights.

For the evaluation of low sonic booms and Mach cut-off flights, it makes sense to rank the different noise impact. The World Health Organisation (WHO 2018) has already done this for other noise sources, distinguishing between critical, relevant and non-relevant effects. Additionally, for medium- to long-term noise impacts of other environmental noise sources, so-called DALYs (disability adjusted life years) are calculated. These allow for the quantification of noise impacts that differ in severity and could also be useful in future for assessing the effects of low sonic booms and Mach cut-off flights.

At the current state of research, it is not possible to derive concrete recommendations for a ranking of the acceptability criteria or for any thresholds for the acceptability criteria. The sleep study conducted here is an important step towards investigating the noise impact of low sonic booms and Mach cut-off flights, noting that, for instance, the effect of rattling and vibrations could not be examined within the study. Results from the field study on low sonic booms planned by NASA for 2026 to 2028 (NASA's X59 Quesst Community Survey Campaign) can also significantly contribute to the body of knowledge.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Zeitalter von zivilen Überschallflugzeugen endete 2003 mit dem letzten Überflug der französisch-britischen Concorde. Zu den Emissionen eines Überschallflugzeuges gehört die Erzeugung einer Druckwelle, die erzeugt wird, sobald sich ein Objekt mit Überschallgeschwindigkeit fortbewegt (Sparrow & Vigeant 2019). Diese Druckwelle breitet sich hinter dem Flugzeug aus und wird am Boden als sehr lautes Geräusch wahrgenommen. Dabei handelt es sich um den sogenannten Überschallknall. Da sich ein Flugzeug kontinuierlich mit Überschallgeschwindigkeit fortbewegt und die Druckwelle dementsprechend dauerhaft produziert wird, wird das gesamte Gebiet unterhalb der Flugzeug-Trajektorie (ca. 40 Kilometer auf beiden Seiten) von der Schallausbreitung betroffen sein.

Um Auswirkungen des Überschallknalls auf die Bevölkerung (z. B. Schlafstörungen, Schreckreaktionen, Belästigung) zu vermeiden und um die Belastung für die Umwelt zu reduzieren, war das Fliegen mit Überschallgeschwindigkeit über Land laut §11a der Luftverkehrsordnung (LuftVo) bis November 2015 in Deutschland ausdrücklich verboten. Die darauffolgende Fassung der LuftVo (2015) wurde im Zuge der Harmonisierung der Luftverkehrsregeln im europäischen Luftraum (Standardised European Rules of the Air, SERA) angepasst und beinhaltet dieses Verbot nicht mehr. Laut §11 der LuftVo kann das Bundesamt für Luftsicherung für Luftfahrzeuge, die die vorgegebenen Geschwindigkeitsbeschränkungen (SERA.6001 c-d) nicht einhalten können, Ausnahmen zulassen. §38 der LuftVo regelt die Zulassung von Ausnahmen für Überschallflüge nach Sichtflugregeln. Dies betrifft sowohl Ausnahmen (SERA.5005 d, Nr. 2), sofern bei Flügen mit Überschallgeschwindigkeit kein Überschallknall am Boden feststellbar ist als auch Ausnahmen für Versuchszwecke, wenn sie dazu dienen den Nachweis zu erbringen, dass ein Überschallknall am Boden nicht feststellbar ist.

Die Möglichkeiten neue Marktpotentiale mittels optimierter kosteneffizienterer Flugzeuge und Flugverfahren auszuschöpfen, sind ein Anreiz für die Industrie die Wiedereinführung ziviler Überschallflüge anzustreben. Ein Vorteil liegt in der deutlichen Verkürzung der Reisezeit mittels Überschall-Flugzeuge. Derzeit werden von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) Designs zu leiseren Überschallflugzeugen und Flugverfahren entwickelt um eine Zulassung für den zivilen Einsatz zu ermöglichen (Loubeau et al. 2019).

Ein Konzept zur Verringerung der Exposition der Bevölkerung durch Überschallknalle am Boden, ist das sogenannte „Low-Boom“-Design. Dabei wird die Flugzeuggeometrie so verändert, dass der erzeugte Überschallknall weniger impulshaft und leiser ist. Die neuen Flugzeug-Designs versprechen eine deutliche Reduzierung der Geräusche während des Überschallfluges und des dadurch erzeugten Überschallknalls – so genannte Low-Sonic-Boom-Signaturen (Maglieri et al. 2014).

Neben den neuen Flugzeug-Designs soll ein spezielles Flugverfahren unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen – das so genannte Mach-Cut-off-Verfahren - ebenfalls zu einer deutlichen Lärmreduktion führen. Hierzu wird mit Geschwindigkeiten knapp über Schallgeschwindigkeit, bei etwa 1,0 bis 1,15 Mach in niedriger Atmosphäre geflogen (Sparrow & Vigeant 2019). Die niedrige Atmosphäre bricht die Überschalldruckwellen nach oben. Dadurch erreicht der zentrale Überschallknall den Boden nicht. Die so abgeschwächte Druckwelle soll am Boden nur noch als Donnergrummeln zu hören sein (Loubeau & Page 2018).

Aktuelle Studien zu den Auswirkungen von Low-Boom-Signaturen auf den Menschen berichten über die Auswirkungen auf das Belästigungsempfinden und die subjektiv wahrgenommene Lautheit sowie auf physiologische Reaktionen (z. B. Töpken & van de Par 2021; Marshall & Davies 2012). Bisher existierten jedoch keine Studien zu den Auswirkungen von Low-Sonic-Boom- oder Mach-Cut-off-Signaturen auf den Schlaf. Diese sind jedoch notwendig, um zu

beurteilen, ob Überflüge leiserer Überschallflugzeuge über bewohnte Gebiete, insbesondere in der Nacht, überhaupt zumutbar für die Bevölkerung sind.

Flugzeuge werden von der International Civil Aviation Organization (ICAO) nach bestimmten Zertifizierungs-Kriterien beurteilt und zugelassen. Im Gegensatz zu den Geräuschen, die durch konventionelle Flüge unterhalb der Schallgeschwindigkeit erzeugt werden, handelt es sich bei der Lärm-Emission eines Überschall-Flugzeuges um ein neues Geräusch. Deshalb müssen für die Zertifizierung von Überschallflugzeugen Beurteilungskriterien festgelegt und eingeführt werden. Diese Kriterien basieren sowohl auf dem Effekt von Einzelereignissen als auch auf kumulativen Effekten (Loubeau & Page 2018). Nicht nur die Geräuschpegel, sondern auch die Geräuscheigenschaften werden sich von Überschallflugzeugen der ersten Generation (Concorde, TU144 und Überschall-Militärflugzeuge) unterscheiden. Die menschliche Reaktion im Wachzustand als auch im Schlaf auf diese Geräuschimmissionen am Boden wird vermutlich ebenfalls unterschiedlich sein. Befunde aus der Literatur zur Lärmwirkung auf den Schlaf von Überschallflugzeugen der ersten Generation werden daher nur bedingt anwendbar sein, um die Wirkungen von Low-Boom-Flugzeugsignaturen abschätzen zu können (Griefahn & Jansen 1975; Rylander, Sörensen & Berglund 1972). Eine Quantifizierung der Wirkung von Fluglärm auf den Schlaf anhand von Expositions-Wirkungs-Beziehungen bietet eine wichtige Grundlage für die Entwicklung und Einführung von Nachtschutzkonzepten, wie sie im Bereich konventioneller Flugzeuge beispielsweise am Flughafen Frankfurt/Main und Zürich (Basner, Isermann & Samel 2006; Brink et al. 2010) eingeführt wurden.

Aufgrund der oben genannten Punkte besteht Forschungsbedarf bezüglich der relevanten Lärmwirkungen von Überschallknallen auf den Menschen, insbesondere auf den Schlaf. Ziel ist dabei, die Entwicklung von Kriterien zur Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen zukünftiger ziviler Überschall-Flugzeuge auf die Bevölkerung. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte eine Laborstudie unter kontrollierten Bedingungen konzipiert und durchgeführt werden, um die Auswirkungen von Überschallknallen auf den Schlaf zu untersuchen. Dabei sollten Simulationen von Überschallknallen, wie sie von zukünftigen Low-Boom-Flugzeugen sowie unter Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens in Reisehöhe erwartet werden, berücksichtigt werden.

Des Weiteren sollte eine ausführliche Literaturrecherche und -auswertung über die Lärmwirkungen von zivilen Überschallflugzeugen – einschließlich der Berücksichtigung von laufenden nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten durchgeführt werden. Auf Basis der Literaturanalyse und den in der Schlafstudie gewonnenen Ergebnissen sollten Kriterien zur Beurteilung der Zumutbarkeit von Überschallknallen durch zukünftige zivile Überschallflugzeuge für die Bevölkerung in Europa abgeleitet und ein aus Lärmwirkungssicht anzustrebendes Niveau zum Schutz der Bevölkerung in Deutschland vor Lärm definiert werden. Mit Hilfe der erarbeiteten Kriterien sollte eine Beurteilung der zurzeit diskutierten Konzepte zum Einsatz ziviler Überschallschallflugzeuge erfolgen.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte in fünf Arbeitspaketen:

- ▶ Arbeitspaket 1 - Konzeption einer Schlafstudie,
- ▶ Arbeitspaket 2 - Durchführung und Auswertung der Schlafstudie,
- ▶ Arbeitspaket 3 - Entwicklung und Anwendung von Zumutbarkeitskriterien,
- ▶ Arbeitspaket 4 – Verwertung der Forschungsergebnisse,
- ▶ Arbeitspaket 5 – Abschlussbericht.

2 Arbeitspaket 1 - Konzeption der Schlafstudie

Die Konzeption der Schlafstudie erfolgte auf Basis der Erfahrungen der Auftragnehmenden aus bisherigen Schlaf- und Lärmwirkungsstudien sowie auf Basis einer Literaturrecherche zu den Wirkungen von Verkehrslärm auf den Menschen. Insbesondere wurden hier aktuelle Ergebnisse und Prognosen zu Überschallknallen von zukünftigen zivilen Überschallflugzeugen mit einbezogen. Zunächst wurden die Hypothesen abgeleitet, anschließend die Messgrößen und Erhebungsmethoden bestimmt und das Studiendesign geplant.

Arbeitspaket 1 beinhaltet die folgenden Schritte:

1. Simulation und Auswahl der Lärmstimuli
2. Erprobungsstudie erreichbarer Überdrücke
3. Vorbereitung und Validierung der Schalldarbietung
4. Literaturbasierte Ableitung der Hypothesen
5. Bestimmung der Stichprobengröße
6. Konzeption des Studiendesigns

Ziel dieses vom Umweltbundesamt ausgeschriebenen Forschungsvorhaben war es, die Wirkungen von Überschallknall-Signaturen, wie sie von geplanten zivilen Überschallflugzeugen erwartet werden, auf den Schlaf zu untersuchen. Dafür sollte eine Laborstudie unter kontrollierten Bedingungen konzipiert werden und die folgenden Vorgaben umgesetzt werden:

- ▶ 26 gesunde, normalhörende Personen sollen vier Tage lang untersucht werden, d. h. insgesamt 78 Nächte.
- ▶ Es sollen jeweils dreizehn weibliche und dreizehn männliche Personen in die Untersuchung eingezogen werden.
- ▶ Die Personen sollen zwischen 18 und 65 Jahren alt sein.

Mit diesem Forschungsvorhaben sollten die folgenden Fragen beantwortet werden können:

- ▶ Ändert sich der Schlafrhythmus, treten Schlaftiefenänderungen auf?
- ▶ Gibt es lärmbedingte Aufwachreaktionen?
- ▶ Wie wird die Schlafqualität durch die Versuchspersonen beurteilt?
- ▶ Treten lärmrelevante physiologische Reaktionen im Wachzustand auf?

Zur Beantwortung dieser Fragen sollten Überschallknalle synthetisch generiert und dabei die Charakteristik dieser Geräusche so konzipiert werden, wie sie am Erdboden und innerhalb von Gebäuden erwartet werden. Dabei sollte sowohl die Wirkung von Überschallknallen von zukünftigen zivilen Überschallflugzeugen in Reisehöhe untersucht werden als auch Überschallknalle, die unter Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens entstehen. Es sollten nur die Wirkungen von Einzelereignissen betrachtet werden.

2.1 Simulation und Auswahl der Lärmstimuli

Leise Überschallknalle bestehen im Wesentlichen aus einer Überdruck- und einer Unterdruckwelle mit prognostizierten Amplituden von etwa 20 Pascal (Pa) (Demonstrator, C25D, Ishikawa et al. 2019) bis etwa 40 Pa (Business-Jet, JAXA S4, Liebhardt et al. 2020). Die Dauer einer solchen Drucksignatur hängt maßgeblich von der Länge des Flugzeuges ab und liegt in der Größenordnung von 100 bis 150 Millisekunden (ms). Die Signale sind spektral dominiert

durch ihren tieffrequenten Anteil mit einem Maximum zwischen 5 und 10 Hz und einem Intensitätsabfall zu hohen Frequenzen hin.

Aktuell sind Low-Boom-Demonstratoren (z. B. NASA X-59, Boom XB-1) in der Entwicklung. Diese werden deutlich kleiner sein als Business- oder Passagierjets und können nur einen Piloten transportieren. Da noch keiner dieser Demonstratoren fliegt, sind nur Geräuschsimulationen von potentiellen zukünftigen Low-Booms verfügbar. Bei den Simulationen handelt es sich hauptsächlich um Demonstrator-Flugzeuge. Es ist bisher nur eine veröffentlichte Simulation eines zukünftigen Business-Jets in der Literatur gefunden worden (JAXA S4, Liebhardt et al. 2020). Es gibt auch Versuche, Low-Boom-Geräusche durch spezielle Flugmanöver zu erzeugen. Hierzu gab es schon eine größere Feldstudie der NASA in Galveston 2018 (Page et al. 2018). Inwiefern die durch Flugmanöver erzeugten Geräusche mit denen von zukünftigen Low-Boom-Jets übereinstimmen, ist bisher unklar.

Die Geräusch-Signaturen von Mach-Cut-off-Flügen wurde bisher häufig mit Flügen von Kampjets untersucht (Cliatt et al. 2016; Sparrow & Vigeant 2019). Mach-Cut-off-Geräusche bestehen aus Druckschwankungen mit einer Amplitude von etwa 2 Pa bis 4 Pa über eine Dauer von 2 bis 4 Sekunden. Es gibt erste Ansätze zur Simulation der Bodengeräusche von Mach-Cut-off-Flügen, aber es finden sich nach aktuellem Wissen des Auftragnehmers weder für konventionelle Überschallflugzeuge/Kampjets noch für zukünftige Low-Boom-Konfigurationen Publikationen dazu in der wissenschaftlichen Literatur.

Als Stimuli für die Wiedergabe von Low-Boom-Signalen und Mach-Cut-off-Signalen stehen mehrere Quellen zur Verfügung, die im Rahmen der Konzipierung der Laborstudie eruiert wurden. Es fand ebenfalls ein interner Austausch bezüglich verwendbarer Signaturen innerhalb des DLR (z. B. EU-Projekt [Europäische Union] „noiSe and EmissioNs of supERsoniC Aircraft“ [SENECA]) statt. Die endgültige Auswahl der Lärmstimuli erfolgte dann in Rücksprache mit dem Auftraggeber.

Folgende Quellen für eine Low-Boom-Signatur kamen grundsätzlich in Frage:

- a) Die Bodensignatur einer Simulation des JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) S4 Business Jet, skaliert auf einen maximalen Überdruck von 43 Pascal (Pa) (Liebhardt 2020).
- b) Die Bodensignatur einer Simulation des NASA (National Aeronautics and Space Administration) C25D-Demonstrators. Diese entstammt den Arbeiten des Projekts “RegUlation and norM for low sonic Boom Levels” (RUMBLE)/ Sonic Boom Prediction Workshop 2 des American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) (NASA 2017; Park & Nemeč 2017; Ishikawa et al. 2019).
- c) Die Bodensignatur einer Simulation des NASA C608-Demonstrators. Diese entstammt den Arbeiten des AIAA Sonic Boom Prediction Workshop 3 (NASA 2020). Die Simulation soll dem X-59 Demonstrator entsprechen und einem zukünftigen zivilen Überschalljet nahekommen.

Folgende Quellen für eine Mach-Cut-off-Signatur kommen in Frage:

- d) Die Aufnahme eines Militärjets F18 im Mach-Cut-off-Flug aus der NASA Studie „FARfield Investigation of No boom Threshold“ (Cliatt et al. 2016; Sparrow & Vigeant 2019). Eine Anfrage zu den Signaturen wurde Mitte 2021 an die NASA gestellt und Mitte 2022 wurde ein Zugang ermöglicht.

Das Fliegen eines Überschallflugzeuges unter Anwendung des Mach-Cut-off-Flugverfahrens führt dazu, dass die Überschalldruckwellen ab einer bestimmten Linie nach oben abgelenkt werden, wodurch der zentrale Überschallknall den Boden nicht erreicht. Bei dieser Linie handelt

es sich um die sogenannte Caustic line. An dieser Linie kommt es zu einer sehr starken Druckfokussierung mit Druckmaxima bis zu mehr als 100 Pa. Die Caustic line kann als Worst case-Szenario betrachtet werden, was es unbedingt zu vermeiden gilt. In dem Bereich von $z = -100$ bis $z = -500$ Meter unterhalb der Caustic line ergeben sich sehr unterschiedliche Geräuschsignaturen. Der maximale Überdruck nimmt mit zunehmender Entfernung von der Caustic line generell ab, d. h., welches Geräusch von einer Person wahrgenommen wird, hängt von der Entfernung der Person (Höhe über dem Boden) zur Caustic line ab. Unter der Caustic line ist ab einer Entfernung von $z = -400$ Meter (fast) kein Geräuschaufkommen mehr zu erwarten. Aufgrund von Geländeformation und -bebauungen kann die relative Höhe zur Caustic line geringer sein als $z = -400$ Meter.

- e) Simulation eines Mach-Cut-off-Fluges der Pennsylvania State University. Es wurde ein Datensatz (Case A) mit Signaturen für fünf verschiedene Abstände von der Caustic line ($z = -100$ Meter bis $z = -500$ Meter), von der Pennsylvania State University geliefert.
- f) Eigensynthetisierte Signale: Konstruktion eines Zeitsignals durch Ablesen der Abbildungen aus dem ASCENT (Aviation Sustainability Center)-042-Report (Sparrow & Vigeant 2019). Die Synthetisierung ist aus Sicht der auftragnehmenden Institutionen (AN) mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden, insbesondere im Bereich hoher Frequenzen.

Aufgrund eines Austausches mit der Pennsylvania State University ergab sich auch die Möglichkeit einer Low-Boom-Mach-Cut-off-Simulation:

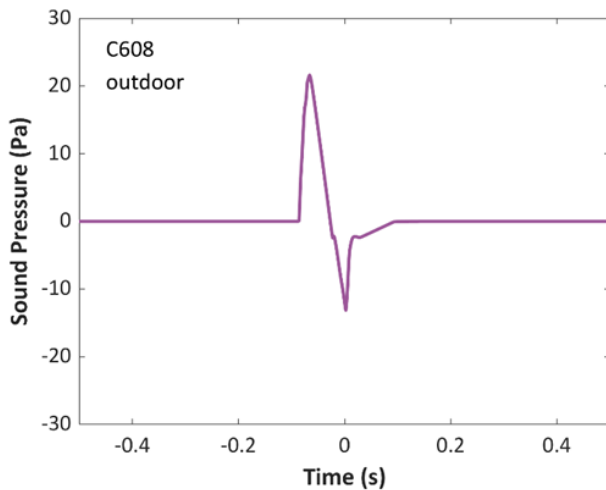
- g) Simulation eines Mach-Cut-off-Fluges auf Basis der C608 Outdoor-Signatur. Es wurde ein Datensatz mit Signaturen für fünf verschiedene Abstände von der sog. „Caustic Line“, an der es zur Druckfokussierung kommt, von der Pennsylvania State University geliefert.

Diese Option g) für das Mach-Cut-off Signal zusammen mit Option c) für das Low-Boom-Signal adressieren die Fragestellungen der Primär- und der Sekundärhypothesen (Unterschied zwischen Low Boom und Mach-Cut-off) am besten und wurden entsprechend weiterverfolgt.

2.1.1 Low-Boom Simulation

Die Low-Boom Simulation (c) entspricht einer Signatur aus dem AIAA Sonic Boom Prediction Workshop 3 (NASA, 2020). Die Signatur (Abbildung 1) entstammt dem Datensatz „c608groundKirzc608viscmixed064MaTRe“, in dem ein Druckverlauf und ein Zeitvektor gegeben sind. Die Signatur hat im Original eine Samplingrate von etwa 146,52 Kilohertz und eine Dauer von etwa 0,26 Sekunden. Aufgrund der sehr hohen Samplingrate wurde die Signatur interpoliert und auf eine Samplingrate von 48 Kilohertz (kHz) gebracht (Downsampling). Die Signaturen wurden für eine Wiedergabe im Simulator als Wave-Datei (.wav) exportiert.

Abbildung 1: Schalldruck der Low-Boom-Simulation



Anmerkung: Option (c) bzw. Signatur C608 vom AIAA Sonic Boom Prediction Workshop 3 (NASA 2020) dargestellt als Schalldruck über die Zeit. Quelle: eigene Darstellung, UOL.

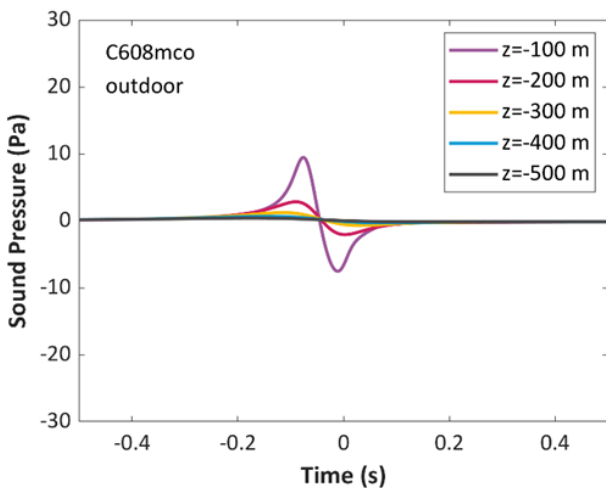
2.1.2 Low-Boom-Mach-Cut-off Simulationen (Mach-Cut-off-Simulationen)

Die Low-Boom-Mach-Cut-off-Simulationen der Option (g) wurden von der Pennsylvania State University als MATLAB-File Datei geliefert. Als Basis für die Simulation diente das Signal der Low-Boom-Simulation aus Option (c). Die Ausgangsbodensignatur (C608) wurde von UOL an die Pennsylvania State University geliefert. Die daraus erstellten Mach-Cut-off-Simulationen enthielten wieder Signaturen bei unterschiedlichen Abständen zur „Caustic Line“ (Abbildung 2).

Mit der Option (g) war ein direkter Vergleich der zusätzlichen Wirkung eines (simulierten) Mach-Cut-off-Verfahrens für eine simulierte Low-Boom-Konfiguration möglich. Da die Überdrücke im Fall (g) insgesamt sehr niedrig sind, kann in der Studie eine Entfernung von $z = -100$ Metern unterhalb der „Caustic Line“ als „Worst Case“ in die Studie einbezogen werden.

Die von der Pennsylvania State University gelieferten Signaturen wurden für eine Wiedergabe im Simulator als Wave-Datei. (.wav)-Files exportiert.

Abbildung 2: Schalldruck der Mach-Cut-off-Simulationen auf Basis der C608 Low-Boom-Simulation für fünf Abstände unterhalb der „Caustic Line“



Anmerkung: Option (g) auf Basis der C608 Low-Boom-Simulation der Pennsylvania State University. Dargestellt ist der Schalldruck über die Zeit für fünf Abstände z unterhalb der sogenannten „Caustic Line“. Quelle: eigene Darstellung, UOL

In den folgenden Abschnitten wird zur Differenzierung der beiden Signaturen (Low-Boom-Signatur und Low-Boom-Mach-Cut-off-Signatur) nur noch der Begriff Mach-Cut-off-Simulation verwendet.

2.1.3 Outdoor-Indoor Simulation

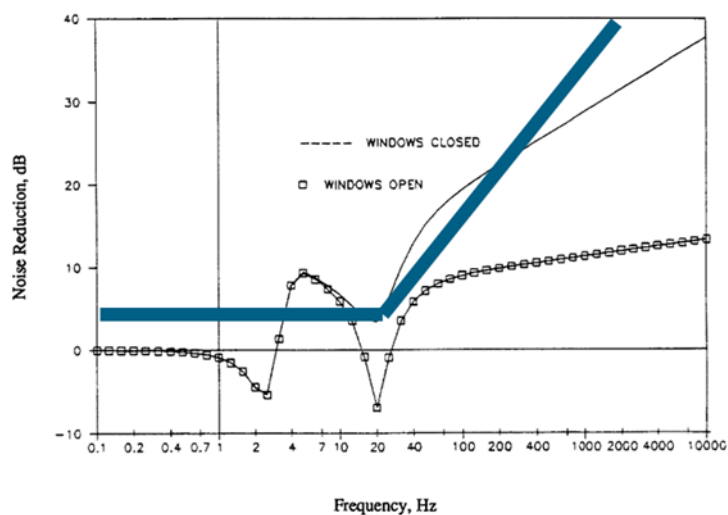
Für eine Wiedergabe der Signale im Schlaflabor wurde eine Übertragung der Bodensignaturen von außen nach innen in ein Gebäude simuliert. In der Literatur finden sich zum Teil gemessene Übertragungsverluste für die Schalltransmission bei Gebäuden von außen nach innen auch für sehr tiefe Frequenzen.

In Brown und Sutherland (1992) wurde für die Schalltransmission bei reduzierten Überschallknallen ein Modell für typische Wohngebäude für eine Vorhersage des Überschallknalls im Gebäude eingesetzt. In Abbildung 3 ist die Schalldruckpegelreduktion für offene und geschlossene Fenster aus Brown und Sutherland (1992) dargestellt.

Sparrow und Vigeant (2019) nutzen ein Modell zur Simulation der Schalltransmission von außen nach innen auf Basis einer Holzkonstruktion (violette Kurve in Abbildung 4). Vergleiche mit Messungen typischer Gebäude ergaben, dass die real erreichten Übertragungsverluste insbesondere für Frequenzen über 500 Hz nahezu frequenzunabhängig bei etwa 20 Dezibel (dB) lagen (gelbe Kurve in Abbildung 4). Diese Frequenzunabhängigkeit bei höheren Frequenzen wurde auch für deren Untersuchungen angenommen (schwarze Kurve in Abbildung 4).

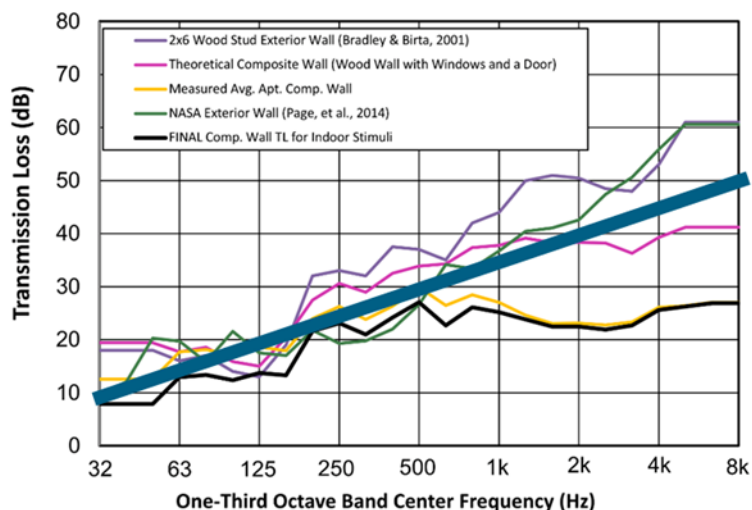
In Keränen et al. (2019) finden sich Messungen der Pegelreduktion für eine Transmission von außen nach innen für 13 verschiedene Häuser in Finnland mit insgesamt 26 verschiedenen Außenwandkonstruktionen. Für die Messungen wurde jeweils die Fassade mit Lautsprechern beschallt und Schalldruckpegel vor der Fassade und innerhalb des Gebäudes gemessen. Abbildung 5 zeigt verschiedene Perzentile des Übertragungsverlustes für Messpositionen in der Mitte eines Raumes.

Abbildung 3: Übertragungsverlust für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion über der Frequenz sowie einfache Näherung



Anmerkung: Die blaue Linie stellt die einfache Näherung dar. Quelle: Brown und Sutherland (1992), adaptiert.

Abbildung 4: Übertragungsverlust für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion über der Frequenz sowie einfache Näherung

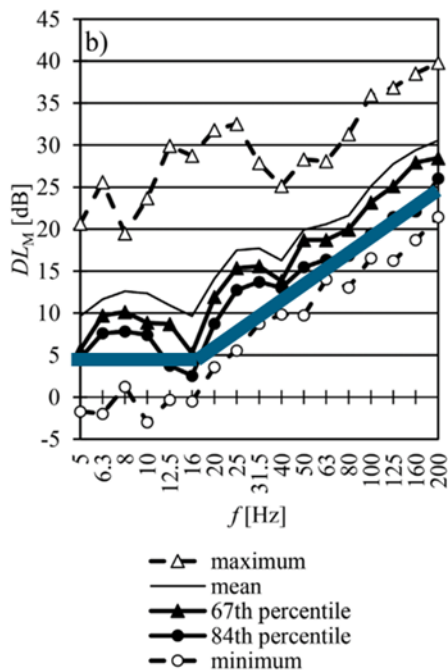


Anmerkung: Die blaue Linie stellt die einfache Näherung dar. Quelle: Sparrow und Vigeant (2019), adaptiert.

Generell zeigen die Daten aus der Literatur lokale Minima des Übertragungsverlustes bei etwa 3 Hz (Brown & Sutherland 1992) bzw. 5 Hz (Keränen et al. 2019) und bei 20 Hz (Brown & Sutherland 1992) bzw. 16 Hz (Keränen et al. 2019) mit einem lokalen Maximum von etwa 10 dB dazwischen. Der reduzierte Übertragungsverlust für die Frequenzen ist wahrscheinlich auf Spuranpassungseffekte an den Koinzidenzfrequenzen zurückzuführen, die von der jeweiligen Wandkonstruktion abhängen. Im Gegensatz zu der Modellierung von Brown und Sutherland (1992) liegt in den Messungen von Keränen et al. (2019) in den lokalen Minima nur für die niedrigste Perzentilkurve auch wirklich negative Übertragungsverluste vor. Ab dem 67-Perzentil liegen die Minima immer noch bei mindestens 5 dB Übertragungsverlust. Für höhere Frequenzen zeigt sich in allen Studien eine mit der Frequenz wachsende Pegelreduktion ab etwa 20 Hz. Diese steigt für die Gebäude europäischer geprägter Bauart (Keränen et al. 2019) stärker an als für die Gebäude der amerikanischen Studien und deren Modellen (Brown & Sutherland, 1992, Sparrow & Vigeant 2019).

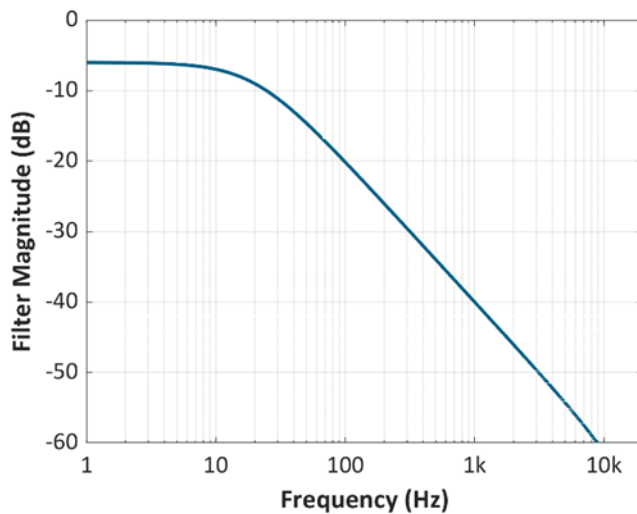
Als eine generische, konservative Näherung des Übertragungsverlustes bietet sich entsprechend ein Tiefpassfilter mit einem Abfall von -6 Dezibel/Oktave (dB/Okt.) und einer Grenzfrequenz von etwa 20 Hz sowie eine zusätzliche frequenzunabhängige Pegelabsenkung um 6 dB an (Abbildung 6). Diese Näherung entspricht in etwa dem 84-Perzentil der Studie von Keränen et al. (2019). Sie ist für einen Vergleich mit den Literaturdaten in Abbildung 3 bis Abbildung 5 jeweils als blaue Linie miteingezeichnet. Ein Abfall von -6 dB/Okt. entspricht dabei auch dem sogenannten Massegesetz für Schalltransmission bei einschaligen Bauteilen und senkrechtem Schalleinfall (Kuttruff 2004). Als erste Näherung wird der Frequenzbereich bis zur Koinzidenzfrequenz als Konstant betrachtet und hierfür eine feste Reduktion von 6 dB angesetzt, die den Messungen von Keränen et al. (2019) nahekommt.

Abbildung 5: Perzentile gemessener Übertragungsverluste für Schalltransmission von außen nach innen als Pegelreduktion DLM über der Frequenz sowie einfache Näherung



Anmerkung: Die blaue Linie stellt die einfache Näherung dar Quelle: Keränen et al. (2019), adaptiert.

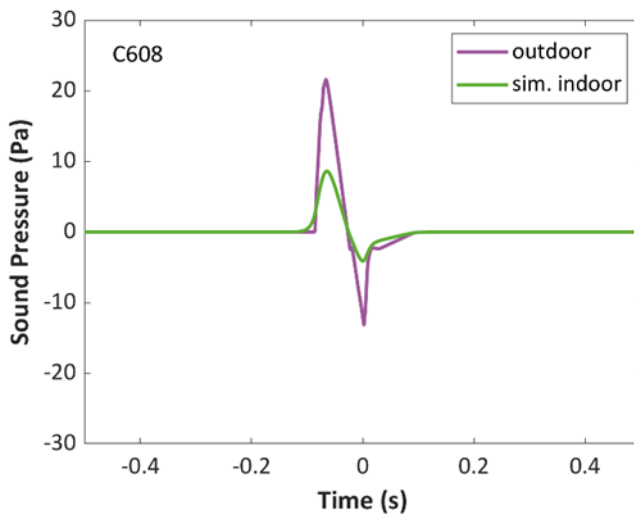
Abbildung 6: Amplitudenübertragungsfunktion des Tiefpassfilters zur Simulation der Outdoor-Indoor-Übertragungsfunktion



Anmerkung: Quelle: eigene Darstellung, UOL.

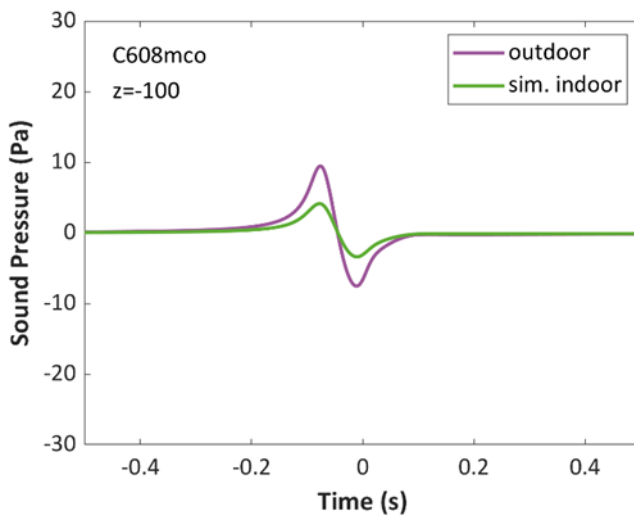
In Abbildung 7 ist die Low-Boom-Signatur (Option c) und in Abbildung 8 die Mach-Cut-off-Simulation (Option g) als Indoor-Signaturen, die in der Schlafstudie genutzt werden soll, zusammen mit der jeweils zugrundeliegenden Outdoor-Signatur dargestellt.

Abbildung 7: Schalldruck der Low-Boom-Simulation C608 als Outdoor-Signal und simuliertes Indoor-Signal



Anmerkung: Low-Boom-Signatur (Option c) als Outdoor-Signal (lila) und simuliertes Indoor-Signal (grün). Dargestellt ist der Schalldruck über die Zeit. Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Abbildung 8: Schalldruck der Mach-Cut-off-Simulationen als Outdoor-Signal und simuliertes Indoor-Signal für eine Entfernung von 100 Metern unterhalb der „Caustic Line“



Anmerkung: Mach-Cut-off-Simulationen (Option g auf Basis der C608 Low-Boom-Simulation, Pennsylvania State University) als Outdoor-Signal (lila) und simuliertes Indoor-Signal (grün). Dargestellt ist der Schalldruck über der Zeit für einen Abstand von $z = -100$ m unterhalb der sog. „Caustic Line“. Quelle: eigene Darstellung, UOL.

2.2 Erprobungsstudie erreichbarer Überdrücke

Eine Darbietung hoher Schalldrücke bei tiefen Frequenzen wird im Labor häufig in einer sogenannten Druckkammer, also einem kleinen, luftdicht abgeschlossenen Raum realisiert, bei dem das Luftvolumen in dem Raum z. B. durch in die Wand eingelassene Lautsprecherchassis komprimiert wird. Da die Räume für die Schlafstudie eine deutlich größere Grundfläche als so eine Druckkammer hatten und auch eine ständige Be- und Entlüftung gewährleistet sein muss, war zunächst unklar, welche Überdrücke mit konventionellen Subwoofer-Lautsprechern erreicht werden können. In einer Erprobungsstudie im Juni 2022 wurden deswegen in den Schlafräumen der AMSAN (Arbeitsmedizinische Simulationsanlage) des DLR in Köln die

erreichbaren Überdrücke in einem typischen Schlaflaborraum mit den vorhandenen Subwoofer-Lautsprechern getestet.

Der getestete AMSAN-Schlafraum C (Abbildung 9) hat eine Grundfläche von etwa 5,5 Quadratmeter (etwa 2,6 Meter * 2,4 Meter mit diagonal in der Ecke liegender Tür) und einen Deckenhöhe von 2,6 Meter, was ein Raumvolumen von etwa 14 Kubikmeter ergibt. Der Raum hat eine einfache einflügelige Tür mit einer einfachen Dichtung und Lüftungsschlitzen im unteren Bereich.

In dem Raum wurden drei vorhandene Subwoofer (Typ SVSound SB-2000) in der hinteren rechten Raumecke im Abstand von etwa 20 Zentimeter von den Wänden übereinander aufgestellt (Abbildung 9). Die Einstellungen der Subwoofer waren jeweils: Volumen: maximal, Phase: 0, Low Pass Filter: 50 Hz. Der technische Messaufbau entspricht bis auf die Anzahl der Lautsprecher und ihrer Verteilung auf Räume dem in Abbildung 15 dargestellten Blockschaltbild. Die Reproduktion von verschiedenen Low-Boom-Signaturen wurde an der Hörposition über dem Kopfkissen gemessen. Grundsätzlich konnten mit verschiedenen Low-Boom-Signaturen Überdrücke von bis zu etwa 15 Pa erreicht werden. Es gab keine hörbaren Klappergeräusche (Rattle-Noise) durch Lampen, Lüftungsgitter oder ähnlichem.

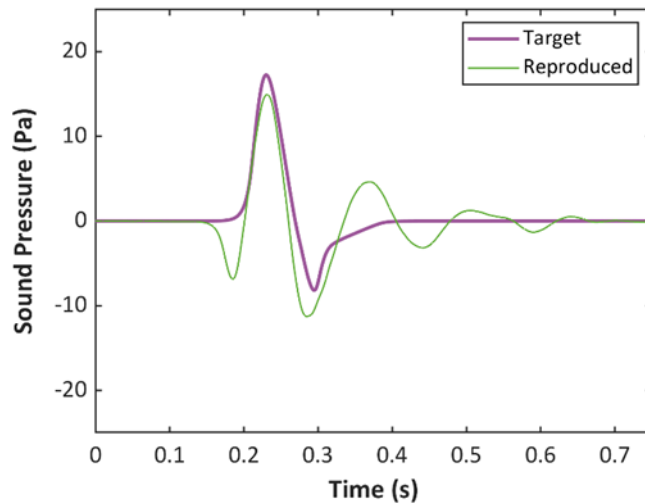
Es zeigten sich aber Abweichungen von der Zielsignatur mit einer Unterschwingung vor dem maximalen Überdruck und einigen Nachschwingungen, die durch die genutzten Lautsprechersysteme (insb. deren integrierten Hoch- und Tiefpassfilter) und den Raumeinfluss zu Stande kommen können (Abbildung 10). Die Abweichungen konnten durch eine digitale Vorfilterung der Signaturen nicht kompensiert werden, so dass darauf im Folgenden verzichtet wurde.

Abbildung 9: Messaufbau in AMSAN-Schlafraum



Anmerkung: Drei gestapelte Subwoofer in Raumecke und Messmikrofon an der Hörposition. Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Abbildung 10: Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 (indoor, +6dB) in AMSAN-Schlafraum



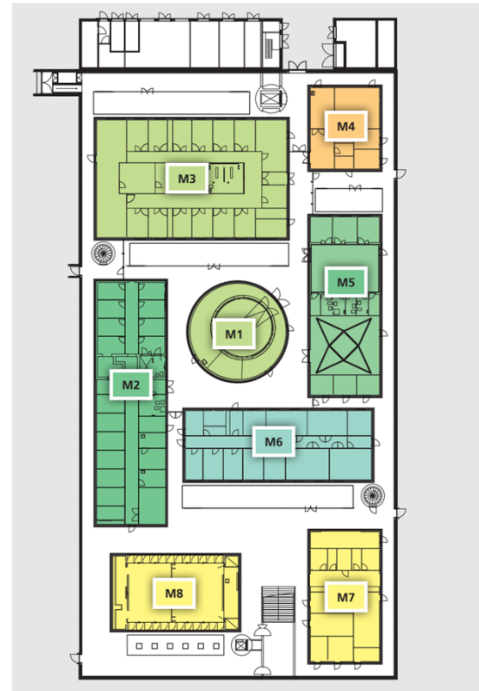
Anmerkung: Dargestellt ist das Zielsignal (lila) und dessen Reproduktion in Raum C (grün) als Schalldruck über die Zeit.
 Quelle: eigene Darstellung, UOL.

2.3 Vorbereitung und Validierung der Schalldarbietung im Modul 5 (M5) des :envihabs (August 2022)

Die Schlafstudie sollte im Modul 5 (M5, Psychologielabor) der luft- und raumfahrtmedizinischen Forschungsanlage :envihab („environment“ = Umwelt und „habitat“ = Lebensraum) des DLR in Köln stattfinden (Abbildung 11). Das Psychologielabor ist ein 130 Quadratmeter großer Teilbereich des :envihabs für Untersuchungen am Menschen. Dort können drei Versuchspersonen für mehrere Tage oder auch Wochen unter kontrollierten Umweltbedingungen untergebracht werden. Es handelt sich um ein geschlossenes vollklimatisiertes schallisoliertes System. Der Versuchspersonenbereich besteht aus einem Aufenthaltsraum, drei Schlafräumen, einer Küche und drei Baderäumen.

Für die Darbietung der Signaturen in der Schlafstudie wurden die drei Schlafräume (im folgenden A, B und C) im M5 mit Lautsprechern ausgestattet. In den Schlafräumen wurden die Signaturen wiedergegeben und an der Hörposition aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Signale dienen für eine Validierung der Schalldarbietung in weiteren Hörexperimenten im Labor an der Uni Oldenburg.

Abbildung 11: Luft- und raumfahrtmedizinische Forschungsanlage :envihabs des DLR in Köln



Anmerkung: Außenaufnahme (links) und Grundriss (rechts) des :envihabs (links). M1 = DLR-Kurzarmzentrifuge, M2 = Prävention- und Rehabilitationslabor, M3 = Schlaf- und Physiologielabor, M4 = PET-MRT, M5 = Psychologielabor, M6 = Biologie-Labor, M7 = Infrastruktur, M8 = Auditorium, Quelle: eigene Darstellung, DLR (CC BY-NC-ND 3.0).

Die Schlafräume im M5 sind jeweils etwas mehr als doppelt so groß wie die in der AMSAN. Sie haben jeweils eine Grundfläche von 12,6 Quadratmeter (etwa 3,3 Meter * 3,8 Meter) und eine Deckenhöhe von 2,8 Meter, was ein Raumvolumen von jeweils etwa 35 Kubikmeter ergibt. Jeder Raum hat eine zweiflügelige Schallschutztür mit doppelter Tür- und Bodendichtung.

2.3.1 Hintergrundpegel und Nachhallzeiten in den Schlafräumen im M5

Der Hintergrundpegel wurde in allen drei Schlafräumen mit einem Handschallpegelmesser (Norsonic, Nor 140) an der Hörposition über dem Kissen im Bett über eine Dauer von 10 Sekunden gemessen. In allen Räumen gab es aufgrund der dauerhaft laufenden Lüftungs- und Klimaanlage einen A-bewerteten Schalldruckpegel von etwa 30 dB(A) mit Unterschieden von etwa 3 dB zwischen den Räumen (Tabelle 1). Der unbewertete Schalldruckpegel lag höher als der A-bewertete, was darauf schließen lässt, dass der Geräuschhintergrund insbesondere von tieffrequenten Frequenzanteilen geprägt war, was typisch für Klimatisierungsgeräusche ist.

Tabelle 1: Hintergrundschalldruckpegel in den Schlafräumen des M5

Schlafräum	$L_{z,eq}$	L_{Aeq}
Raum A	43,2 dB	33,2 dB(A)
Raum B	40,4 dB	29,9 dB(A)
Raum C	53,0 dB	27,4 dB(A)

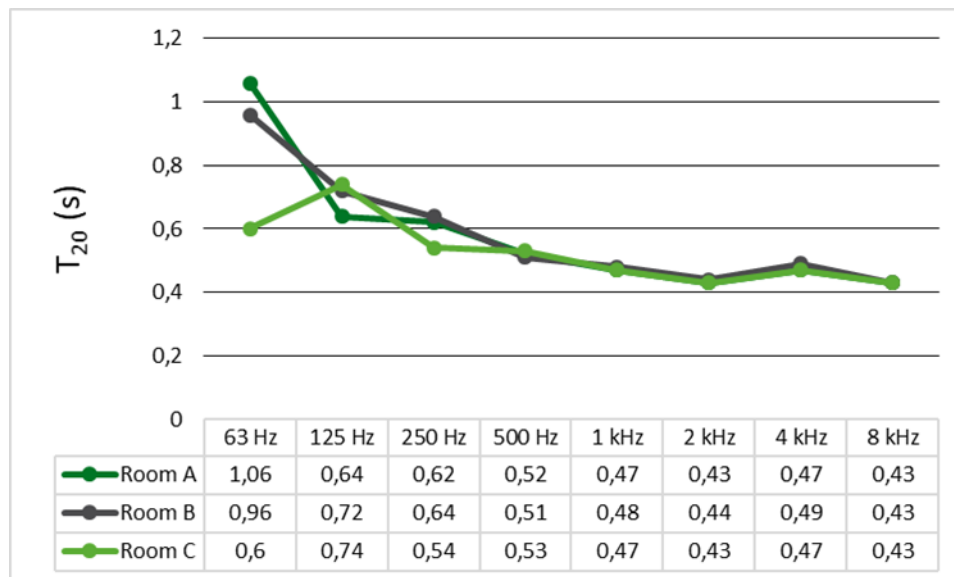
Anmerkung: Mittelwert über zwei Messungen über jeweils 10 Sekunden, ungewichtet (Z) und inklusive einer A-Bewertung.

Eine orientierende Messung der Nachhallzeiten erfolgte mit einem Handschallpegelmesser (Norsonic, Nor 140) und einer impulshaften Anregung (Handklatschen). Die Nachhallzeiten der drei Schlafräume sind in Abbildung 12 über den Oktavfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz

dargestellt. Die Messposition war jeweils auf einem Stativ auf in etwa Ohrhöhe am Fußende des Bettes. Die Nachhallzeit liegt für 500 Hz und höhere Oktavfrequenzen zwischen 0,4 Sekunden und 0,5 Sekunden. Für tiefere Oktavfrequenzen steigt die Nachhallzeit für alle drei Räume auf bis zu 1 Sekunde bei 63 Hz an. Die recht niedrige Nachhallzeit bei 63 Hz in Raum C könnte an einer eingeschränkten Anregung tiefer Frequenzen bei der Impulsanregung liegen.

Aufgrund der relativ hohen Nachhallzeit insbesondere bei tiefen Frequenzen unterhalb von 250 Hz ist von einer Auswirkung auf die Reproduktion der Signaturen auszugehen. Eine Reduktion der Nachhallzeit bei so tiefen Frequenzen wäre nur mit sehr hohem baulichem Aufwand zu realisieren. Deswegen und aufgrund der Erprobungsstudie wurde auf eine weitere Optimierung der Darbietung durch eine Filterung verzichtet und die eingeschränkte Reproduktionsgenauigkeit in Messungen dokumentiert.

Abbildung 12: Nachhallzeiten (T₂₀) der drei Schlafräume für Oktavfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz



Anmerkung: Quelle: eigene Darstellung, UOL.

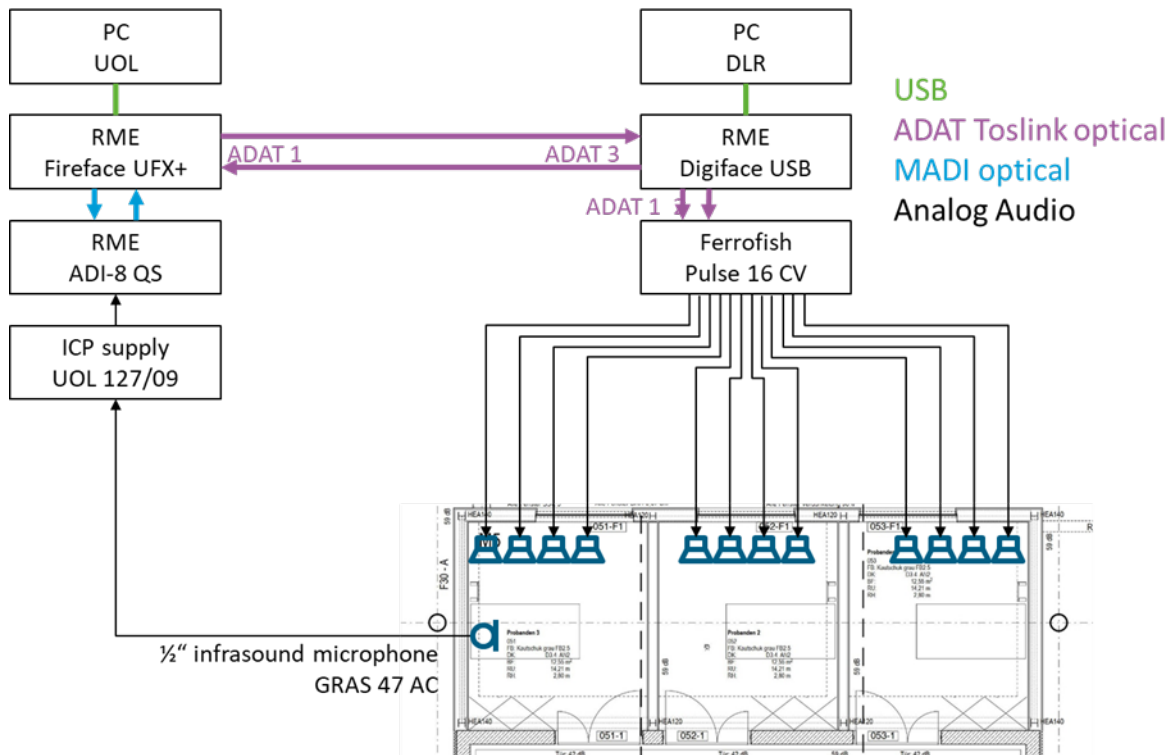
2.3.2 Laboraufbau imM5

Für die Darbietung der Signaturen wurde jeder der drei Schlafräume im M5 (A, B und C) mit 4 Subwoofern (Typ SVSound SB-2000) ausgestattet. Die Subwoofer waren parallel zum Bett im Abstand von etwa 17 Zentimeter von der Außenwand auf dem Boden platziert (Abbildung 13), um den visuellen Eindruck zu minimieren. Abbildung 14 zeigt beispielhaft den Aufbau im Raum A mit den Lausprechern und dem Messmikrofon positioniert an der Ohrposition über dem Bett. Abbildung 15 zeigt ein Blockschaltbild der genutzten elektroakustischen Komponenten.

Die Signale wurden über das Haupt-Audio-Interface (RME, Digiface USB) und den Digital-Analog-Wandler (Ferrofish, Pulse 16 CV) an die Subwoofer geführt. Als Signalquelle diente entweder der Computer vom DLR oder der Computer von UOL, der über ein Audio-Interface (RME, Fireface UFX+) per ADAT digital an das Haupt-Interface angebunden werden konnte. Jeder Subwoofer wurde von einem eigenen Ausgang des Digital-Analog-Wandlers in den LFE-Eingang gespeist.

Die Einstellungen der Subwoofer waren jeweils: Volumen: maximal, Phase: 0, Low Pass Filter: 50 Hz. In Messungen zeigte sich keine deutliche Auswirkung des Tiefpassfilters auf die Reproduktion der Signaturen, da für die Low-Boom-Signaturen ein Großteil der Energie im Bereich unterhalb von 10 Hz liegt. Zur Unterdrückung etwaiger hochfrequenter

Abbildung 15: Blockschaltbild der elektroakustischen Komponenten für die Messungen



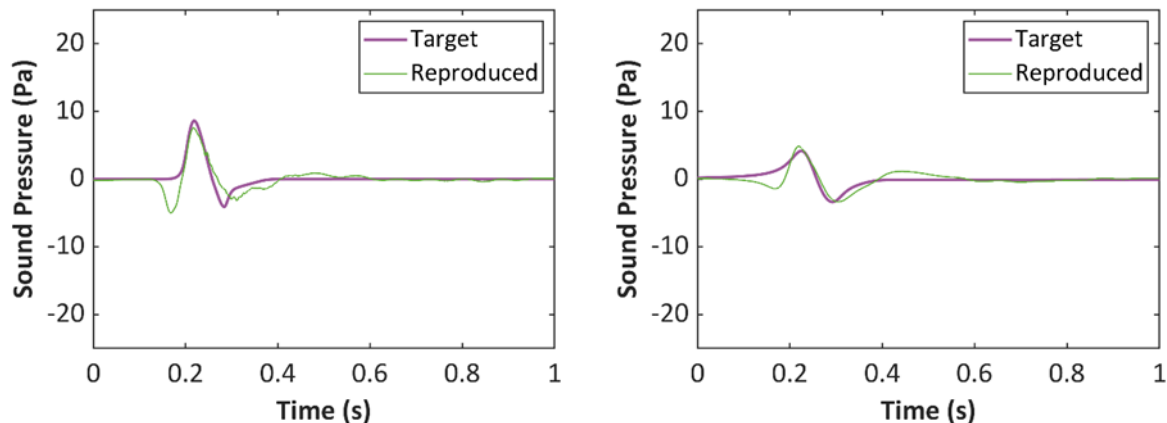
Quelle: eigene Darstellung, DLR/UOL.

2.3.3 Reproduktion der Signaturen in den Schlafräumen

Aufgrund der begrenzten Anzahl verfügbarer Lautsprecher und einer unbekanntenen Signalverarbeitungskette in den genutzten aktiven Subwoofern (z. B. Hoch- und Tiefpässe) sowie eines unbekanntenen Einflusses des Raumes hinsichtlich größeren Raumvolumens und Nachhallzeit war mit Beschränkungen in der Reproduktionsgenauigkeit für die Drucksignaturen zu rechnen.

Die Messungen in Abbildung 16 zeigen, dass der Spitzenüberdruck für die zwei für die Schlafstudie vorgesehenen Signaturen annähernd erreicht wurde. Es zeigt sich auch eine deutliche Abweichung im Signal (Unterdruck vor Peak), die von dem genutzten Lautsprechersystem stammen kann. Tieffrequente Nachschwingungen, wie sie bei der AMSAN-Testmessung aufgetreten sind, sind hier nicht zu sehen. Aufgrund des Raumeinflusses mit einer recht hohen Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen, ist es von einer entsprechenden Verhallung der Drucksignaturen auszugehen. Wegen der linearen Darstellung des Schalldrucks ist der Nachhall in Abbildung 16 aber nur begrenzt zu erkennen. In den Schlafräumen gab es auch leise Klappergeräusche (Rattle-Noise) durch die Deckenlampen, die zum Teil durch Fixierung von losen Teilen reduziert werden konnten.

Abbildung 16: Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 (indoor) und Mach-Cut-off-Signatur (indoor) simuliert für eine Entfernung von 100 Metern unterhalb der „Caustic Line“



Anmerkung: Indoor-Low-Boom-Signatur C608 (links) und Indoor-Mach-Cut-off-Signatur simuliert für eine Entfernung von 100 Metern unterhalb der „Caustic Line“ (rechts). Zielsignal (blau) und Reproduktion in Raum A (rot). Quelle: eigene Darstellung, UOL.

2.3.4 Validierung der Signaldarbietung: Bewertung der Kurzzeit-Lästigkeit und Bestimmung der Detektionsschwelle für eine Hochpassfilterung der Signaturen im Simulator der Universität Oldenburg

Bei der Wiedergabe der Low-Boom- und Mach-Cut-off-Signaturen im Schlaflabor war aufgrund der baulichen Situation des Raumes und des genutzten Wiedergabesystems auf Basis von kommerziellen Subwoofern davon auszugehen, dass sehr tiefe Frequenzen in dem Frequenzbereich von wenigen Hz, in dem die meiste Energie der Low-Boom-Signaturen liegt, nicht mehr ausreichend wiedergegeben werden konnten. Neben der begrenzten Anzahl der Subwoofer und damit limitierten Membranfläche, war die genaue Signalverarbeitung in den Subwoofern nicht bekannt und auch eine Hochpassfilterung im elektrischen Signalweg konnte nicht ausgeschlossen werden. Es war unklar ob diese Einschränkung des Wiedergabesystems im Schlaflabor überhaupt detektierbar sein würde und die Bewertung der Geräusche potentiell niedriger ausfallen würde als in einem Simulator.

Das Ziel dieses Validierungsexperiments war eine Erhebung von Kurzzeitlästigkeiturteilen sowie eine Bestimmung der Detektionsschwelle für eine Hochpassfilterung der Signaturen im Simulator in Oldenburg, da dieser die Signaturen bis zu 2 Hz herunter reproduzieren kann.

Stimuli: Kurzzeitlästigkeit

Insgesamt wurden 16 Signale hinsichtlich der Kurzzeitlästigkeit in Hörexperimenten bewertet. Eine Übersicht aller Signale findet sich in Tabelle 2. Die Signale enthielten die C608-Signatur (C608) und eine darauf basierende Mach-Cut-off-Simulation (C608_MCO100, geliefert von Pennsylvania State University). Zusätzlich wurden Pegelvariationen der C608-Signatur um 3 Dezibel (dB) nach oben (C608_p3dB) und 3 dB nach unten (C608_m3dB) untersucht. Es wurden auch Aufnahmen der im Schlaflabor M5 wiedergegebenen Signaturen untersucht. Für jeden Schlafraum (A, B und C) gab es jeweils eine Aufnahme der wiedergegebenen C608-Signatur und der C608-Mach-Cut-off-Signatur.

Sowohl die Originalsignale als auch Aufnahmen der im Schlaflabor wiedergegebenen Signaturen wurden im Labor in Oldenburg in einer Druckkammer reproduziert. Beispielhaft finden sich in Abbildung 17 die C608 Originalsignatur, in Abbildung 18 die Mach-Cut-off-Simulation und in

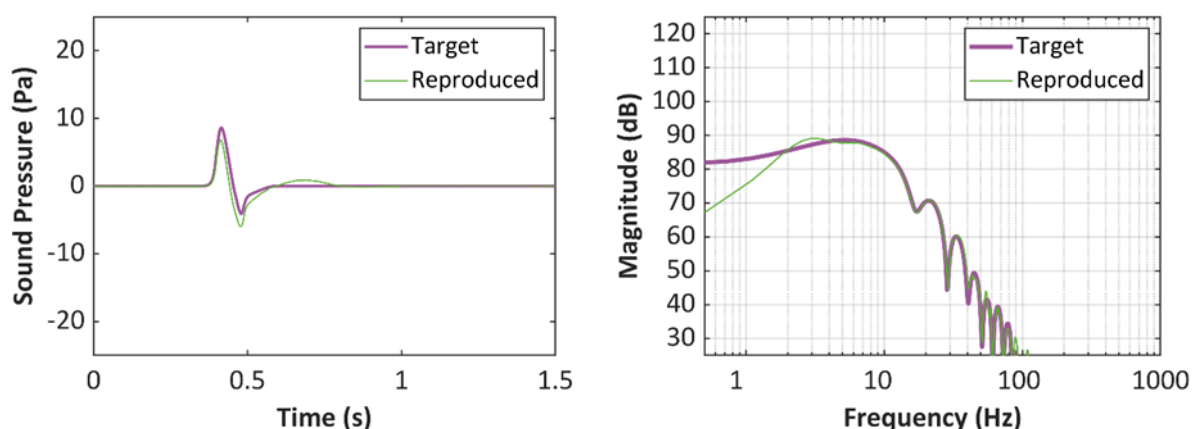
Abbildung 19 und Abbildung 20 die jeweiligen Aufnahmen aus einem Laborraums des Schlaflabors. Es ist jeweils das gewünschte Zielsignal (Target) und die erreichte Reproduktion in der Druckkammer (Reproduced) als Zeitsignal und Spektrum dargestellt. Sowohl die C608-Originalsignatur (Abbildung 17) als auch deren Mach-Cut-off-Simulation (Abbildung 18) und die beispielhaften Aufnahmen aus Raum A des Schlaflabors (Abbildung 19 und Abbildung 20) konnten in der Druckkammer akkurat reproduziert und so für die Hörexperimente genutzt werden. Der Verlauf für die anderen Schlafräume B und C ist ähnlich zu denen von Raum A und deshalb hier nicht dargestellt.

Ein Vergleich der C608-Originalsignatur (Abbildung 17, blaue Kurve) und der Aufnahme aus dem Schlaflabor (Abbildung 19, blaue Kurve) zeigt sowohl im Zeitsignal als auch in der spektralen Darstellung einige Unterschiede. Die im Schlaflabor wiedergegebene Signatur enthält weniger Energie bei sehr tiefen Frequenzen unterhalb von 5 Hz, was durch schon vermutete Hochpass-Filter im Signalweg und Limitationen der Subwoofer begründet sein kann. Es zeigen sich auch zusätzliche Anteile im Bereich von 50 Hz bis etwa 150 Hz. Mögliche Ursachen hierfür können der Einfluss des Raumes (angeregte Raummoden), externe Hintergrundgeräusche, Anregung und Klappern von Bauteilen im Raum (abgehängte Decke, Lampen) und potentiellen Verzerrungen des Signals durch die genutzten Lautsprecher sein.

In Tabelle 2 finden sich die aus den Signalen berechneten Werte für den A-bewerteten Schallexpositionspegel (ASEL) und den maximalen Überdruck sowie die in der Reproduktion in der Druckkammer erreichten Werte.

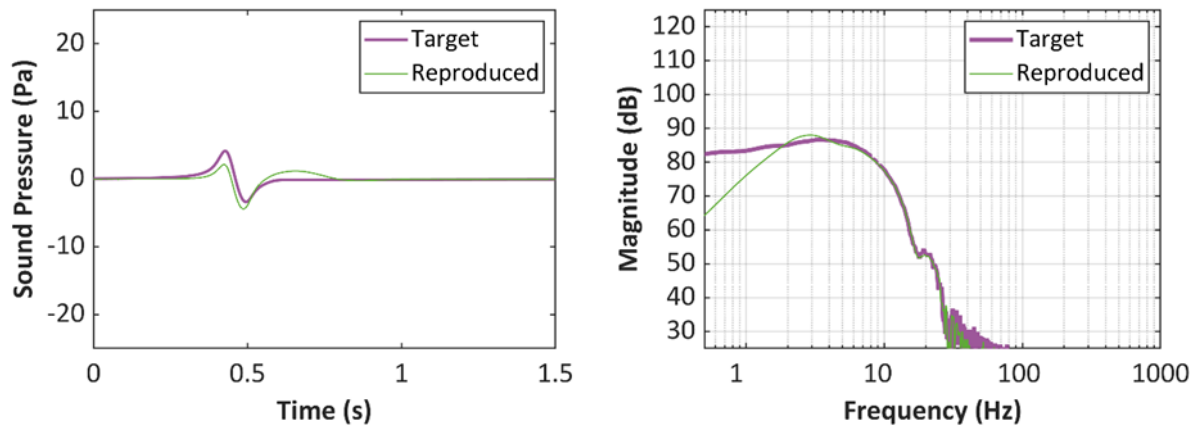
Zusätzlich wurden sechs Signale aus der Farfield Investigation of No boom Threshold (FaINT)-Datenbank entnommen, die auch schon im Aviation Sustainability Center (ASCENT)-Project 42 in Hörexperimenten genutzt wurden (Sparrow & Vigeant 2019). Diese Signaturen sind Aufnahmen von Mach-Cut-off-Flügen einer F-18 parallel zu einem linearen Mikrofonarray am Boden. Die maximalen Überdrücke dieser Originalsignaturen haben 4 Pascal (Pa) nicht überschritten und lagen nach der Outdoor-Indoor-Filterung entsprechend noch deutlich darunter. Details zu der Flughöhe und Geschwindigkeit aus den FaINT-Ground Reports (Cliatt et al. 2013) und den jeweiligen Fluginformationen für diese 6 Signaturen finden sich in Tabelle 3.

Abbildung 17: Zielsignal und Reproduktion der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung



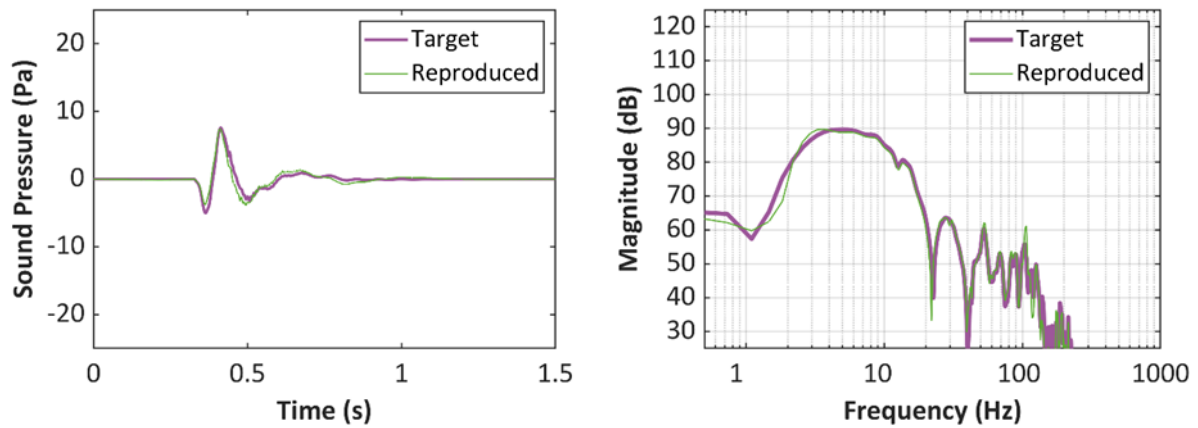
Anmerkung: Dargestellt ist das Zielsignal der Low-Boom-Signatur C608 (AIAA Sonic Boom Prediction Workshop 3, NASA, 2020) mit Indoor-Filterung und dessen Reproduktion als Schalldruck über die Zeit (links) und Spektrum (rechts). Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Abbildung 18: Zielsignal und Reproduktion der Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung



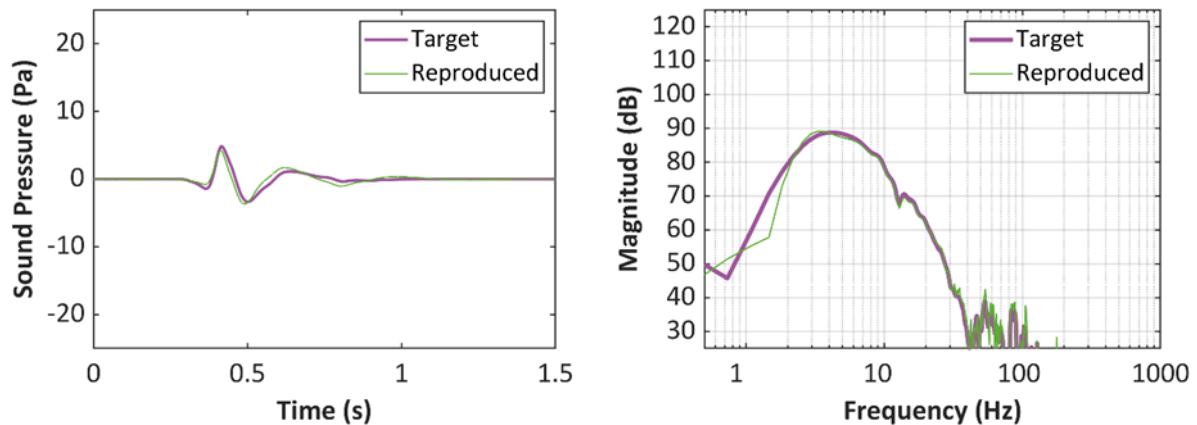
Anmerkung: Dargestellt ist das Zielsignal der Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung und dessen Reproduktion als Schalldruck über die Zeit (links) und Spektrum (rechts). Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Abbildung 19: Zielsignal und Reproduktion der im Schlaflabor aufgenommenen Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung



Anmerkung: Dargestellt ist das Zielsignal und dessen Reproduktion der im Schlaflabor (M5, Raum A) aufgenommenen Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung als Schalldruck über die Zeit (links) und Spektrum (rechts). Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Abbildung 20: Zielsignal und Reproduktion der im Schlaflabor aufgenommenen Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung



Anmerkung: Dargestellt ist das Zielsignal und dessen Reproduktion der im Schlaflabor (M5, Raum A) aufgenommenen Mach-Cut-off-Simulation von der Low-Boom-Signatur C608 mit Indoor-Filterung als Schalldruck über die Zeit (links) und Spektrum (rechts). Quelle: eigene Darstellung, UOL

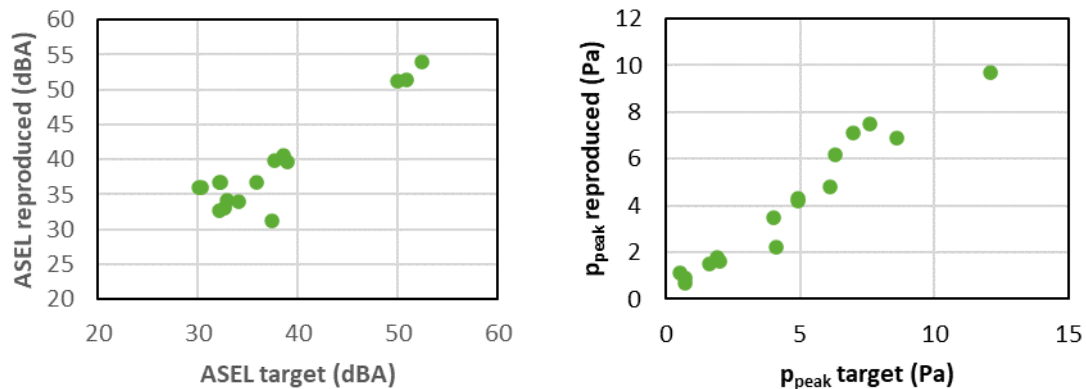
Sämtliche 16 Signaturen beinhalteten eine generische Simulation der Übertragung von außen nach innen in Form einer Pegelabsenkung um 6 dB und eine Tiefpassfilterung mit einem Abfall von -6 dB/Oktave ab einer Grenzfrequenz von 20 Hz. Abbildung 21 zeigt die in der Druckkammer reproduzierten Wert für den A-gewichteten Expositionspegel (ASEL) und den maximalen Überdruck (p_{peak}) über den Zielwerten.

Tabelle 2: A-gewichteter Expositionspegel und maximaler Überdruck für die im Hörexperiment genutzten Signale berechnet aus den Signalen und aus deren Reproduktion in der Druckkammer

Nummer	Signatur	ASEL-Wert (dB) des Signals	Maximaler Überdruck p_{peak} (Pa) des Signals	ASEL (dB) der Reproduktion	Maximaler Überdruck p_{peak} (Pa) der Reproduktion
1	C608_p3dB	38,9	12,1	39,7	9,7
2	C608	35,9	8,6	36,7	6,9
3	C608_m3dB	32,9	6,1	34,1	4,8
4	C608_MCO100	37,4	4,1	31,2	2,2
5	C608_recM5A	50,0	7,6	51,3	7,5
6	C608_MCO100_recM5A	34,1	4,9	34,0	4,3
7	C608_recM5B	50,8	6,3	51,4	6,2
8	C608_MCO100_recM5B	32,1	4,0	32,6	3,5
9	C608_recM5C	52,4	7,0	53,9	7,1
10	C608_MCO100_recM5C	32,6	4,9	33,1	4,2
11	Soft1	30,1	0,7	35,9	0,7
12	Soft2	30,3	0,7	36,0	0,9
13	Loud1	37,6	1,9	39,8	1,8
14	Loud2	38,6	1,6	40,6	1,5
15	Highfreq1	32,2	2,0	36,7	1,6
16	Highfreq2	32,3	0,5	36,8	1,1

Anmerkung: Die Signale 1 bis 4 sind die Low-Boom-Signatur, die Low-Boom-Signatur mit Pegelvariation von +3 dB und -3 dB und die Mach-Cut-off Signatur mit Indoor-Filterung. Die Signale 5 bis 10 sind Aufnahmen der in Raum A, B und C des Schlaflabors wiedergegebenen Signale 2 und 4. Die Signale 11 bis 16 sind die Aufnahmen von Mach-Cut-off-Flügen einer F-18 aus dem FaINT-Datensatz / ASCENT Project 42 mit Indoor-Filterung.

Abbildung 21: Darstellung der in der Reproduktion in der Druckkammer erreichten ASEL- und Überdruck-Werte über die aus den Signalen berechneten Werte



Anmerkung: ASEL (dB) = A-gewichteter Expositionspegel (links), p_{peak} (Pa) = maximaler Überdruck in Pascal (rechts), Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Tabelle 3: Details zu den sechs Überflugaufnahmen der Mach-Cut-off-Flüge einer F-18 aus der FaINT-Datenbank

Label (Sparrow & Vigeant 2019)	Flight Number (Cliatt et al. 2016)	Project Flight	DFRC Flight	Pass	Mic. Chan.	Speed (Mach)	Goal	Description by field personnel	
Soft1	5	12	1392	3	46	1,137	Mach Cut-off 10000, 7500, 3300 ft AGL	whoosh	Low Rumble
Soft2	2	9	1389	4	32	1,154	Mach Cut-off altitudes of 7300 and 9800 ft AGL	---	Distant Thunder
Loud1	2	9	1389	1	6	1,154	Mach Cut-off altitudes of 7300 and 9800 ft AGL	rumble	Distant Thunder
Loud2	6	13	1393	3	37	1,149	Mach Cut-off at 8300 ft AGL	rumble	Distant Thunder
Highf1	2	9	1389	5	26	1,157	Mach Cut-off altitudes of 7300 and 9800 ft AGL	whoosh	Distant Thunder
Highf2	3	10	1390	4	43	1,154	Mach Cut-off altitude at 5000 ft AGL	whoosh	Rumble > Distant Thunder

Anmerkung: Zuordnung der Lable aus Sparrow & Vigeant (2019) und der Flugnummern aus Cliatt et al. (2016) zu den Originalangaben aus FaINT Ground Reports (Cliatt et al. 2013), Mic. Chan. = Microphone Channel, ft = feet, AGL = Above Ground Level.

Stimuli: Detektionsschwelle

Für die Bestimmung der Detektionsschwelle wurden als Ausgangssignale für die adaptive Filterung die Pegelvariationen des C608-Signals (Signale 1-3 in Tabelle 1) genutzt.

Ablauf

Die Hörexperimente wurden von einzelnen Personen durchgeführt und der Ablauf der Experimente war für alle Versuchspersonen gleich. Nach einer allgemeinen Einführung und schriftlichen Einwilligung fanden die zwei Experimente nacheinander in der Druckkammer statt. Das erste Experiment war immer die Beurteilung der Kurzzeitlästigkeit und das zweite Experiment war immer die Bestimmung der Detektionsschwelle. Vor jedem Experiment wurde die Versuchsperson einheitlich über eine schriftliche Versuchsanleitung instruiert. Nach Abschluss der Bewertung der Kurzzeitlästigkeit wurde eine kurze Pause gemacht, in der erste Eindrücke und lästigkeits-/unangenehmkeitsrelevante Aspekte der Geräusche offen erfragt wurden. Es wurde auch abgefragt, wie bekannt die gehörten Geräusche der Versuchsperson vorkam und wie akzeptabel die Geräusche im Allgemeinen wären, wenn diese mehrfach am Tag zu hören wären. Nach der Pause wurde im zweiten Experiment die Detektionsschwelle für eine Hochpass-Filterung der Low-Boom-Signale bestimmt. Nach Abschluss des Experiments erfolgte wieder eine offene Abfrage erster Eindrücke. Insgesamt dauerte ein Versuchstermin etwa eine Stunde wobei die beiden Experimente jeweils etwa 10 Minuten in Anspruch nahmen.

Methode: Kurzzeitlästigkeit

Das Experiment startete immer mit einer Orientierungsphase in der sämtliche 16 Signale dargeboten und von der Versuchsperson gehört wurde. Danach erfolgte die Bewertung der Kurzzeitlästigkeit der 16 Signale über eine 11-stufige kategoriale Skala von 0 bis 10. Die Endpunkte der Skala waren beschriftet und die Frage an die Versuchspersonen lautete: „Wie lästig war das Geräusch auf einer Skala von 0 (überhaupt nicht lästig) bis 10 (extrem lästig)“. Die Reihenfolge der 16 Signale war in der Orientierungsphase und in der Bewertung individuell randomisiert.

Methode: Detektionsschwelle

Die Detektionsschwelle für eine Hochpass-Filterung erfolgte für jedes der drei Ausgangssignale mit einem separaten 3-Intervall, 3-AFC (Adaptive Forced Choice) Verfahren. Den Versuchspersonen wurden nacheinander jeweils drei Intervalle präsentiert, von denen zwei das ungefilterte Signal als Referenz enthielten und ein Intervall das zu detektierende Hochpass-gefilterte Signal. Die Grenzfrequenz des Hochpass-Filters wurde abhängig von der Antwort der Versuchsperson mit einer 1-up, 2-down Regel variiert. Bei einer falschen Entscheidung wurde die Grenzfrequenz erhöht und nach zwei aufeinanderfolgenden richtigen Entscheidungen wurde die Grenzfrequenz reduziert. Die Grenzfrequenz des Hochpass-Filters lag zu Beginn des adaptiven Verfahrens bei 100 Hz und die Startschrittweite betrug 40 Hz. Diese wurde nach jedem oberen Umkehrpunkt des adaptiven Tracks halbiert bis eine Endschnittweite von 10 Hz erreicht war. Das Verfahren wurde nach sechs Umkehrpunkten mit der Endschnittweite abgeschlossen und die individuelle Detektionsschwelle ergibt sich als Mittelwert über die sechs letzten Umkehrpunkte. Die adaptiven Tracks der Messungen für die drei Ausgangssignale liefen innerhalb des Experiments verschachtelt ab.

Versuchspersonen

An dem Hörversuch nahmen insgesamt 19 freiwillige Versuchspersonen (10 weiblich, 9 männlich) teil. Das mittlere Alter lag bei 25,5 Jahren (SD = 3,6 Jahre) und 15 Versuchspersonen hatten bereits Erfahrung mit anderen Hörexperimenten. Sämtliche teilnehmenden Personen waren Studierende oder Mitarbeitende der Universität Oldenburg. Alle Versuchspersonen waren nach Selbstaussage normalhörend.

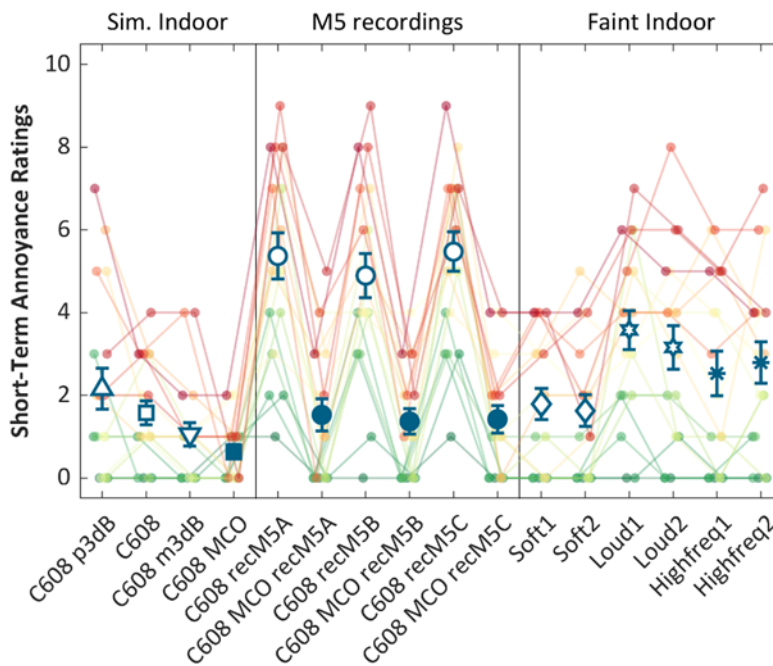
Für die Validierungsexperimente in Oldenburg wurde ein Ethikvotum der Kommission für Forschungsfolgenabschätzung und Ethik der Universität Oldenburg eingeholt.

Ergebnisse: Kurzzeitlästigkeit

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die 16 getesteten Signaturen. Neben den Mittelwerten und Standardfehlern (blaue Symbole) sind im Hintergrund auch die Individualdaten der 19 Versuchspersonen dargestellt. Die Individualdaten sind anhand des mittleren Urteils von rot (hohes mittleres Urteil) bis grün (niedriges mittleres Urteil) farbig codiert. Die Ergebnisse wurden mit einer Varianzanalyse mit Messwiederholung (RM-ANOVA) ausgewertet. Insgesamt zeigte sich ein signifikanter Effekt des Stimulus auf die bewertete Kurzzeit-Lästigkeit ($F(5,3; 95,4) = 29,3, p < 0,05, \varepsilon_{GG} = 0,35, \eta^2 = 0,40$). Die einzelnen Signalkonditionen wurden mittels einem Tukey HSD Post-hoc-Test miteinander verglichen.

Die C608-Signatur wurde im Mittel als wenig lästig beurteilt ($M = 1,6; SE = 0,3$). Die Pegelerhöhung um 3 dB führte zu einem leicht höheren Urteil ($M = 2,1; SE = 0,5$), die Pegelreduktion um 3 dB führte zu einem leicht niedrigeren Urteil ($M = 1,1; SE = 0,3$). Die Mach-Cut-off-Simulation für die C608-Signatur, mit nochmals niedrigerem maximalem Überdruck, erreichte ebenso leicht niedrigere Lästigkeitsurteile ($M = 0,6; SE = 0,2$). Die Unterschiede zwischen diesen Signalkonditionen waren aber jeweils statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$).

Abbildung 22: Mittelwerte und Standardfehler der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die 16 Signaturen (mit Outdoor-Indoor-Filterung)



Anmerkung: Individualdaten mit kleinen Symbolen im Hintergrund (rot: Personen mit hohem Mittelwert über alle Geräusche, grün: Personen mit niedrigem Mittelwert über alle Geräusche), Standardfehler in blau, N = 19, Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Die im Schlaflabor M5 aufgenommenen Signaturen wurden im Mittel insgesamt als lästiger gegenüber den Originalsignaturen bewertet. Die Urteile für die C608-Aufnahmen lagen auf der Skala bei etwa 5,3 und damit 3,7 Kategorien über der Originalsignatur. Der Unterschied zwischen C608-Originalsignatur und den M5-Aufnahmen war für alle drei Räume (A, B und C) jeweils statistisch signifikant ($p < 0,05$). Die Urteile für die Aufnahmen der C608-Mach-Cut-off-Simulation lagen bei etwa 1,4 und 0,8 Kategorien über dem Original. Der Unterschied gegenüber dem Original war für alle drei Räume (A, B und C) jeweils nicht statistisch signifikant ($p > 0,05$).

Die M5-Aufnahmen in den drei Schlafräumen (A, B und C) führten für jedes der zwei Signale zu sehr ähnlichen Kurzzeit-Lästigkeitsurteilen. Diese Unterschiede zwischen den Räumen waren

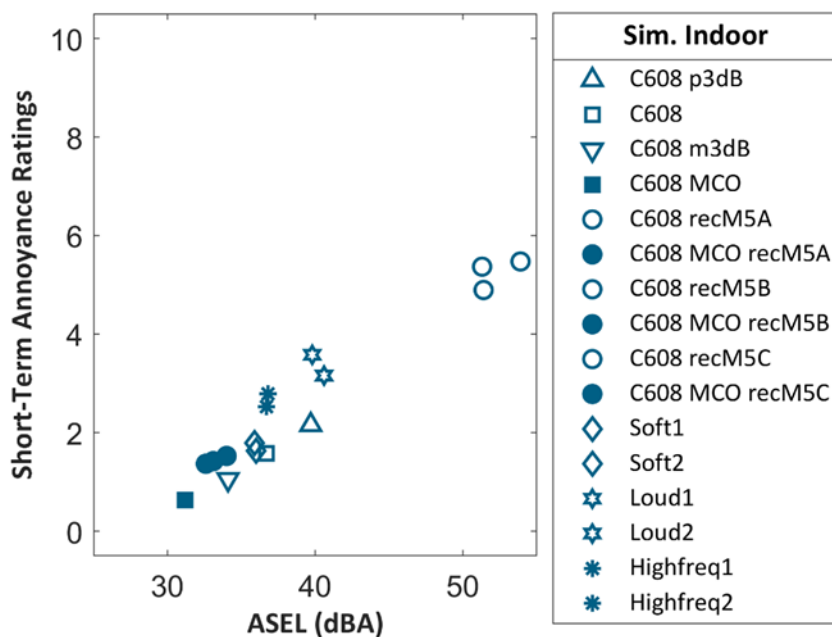
für das C608 Signal und auch das C60-Mach-Cut-off Signal statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$), was für eine vergleichbare Schallexposition in den drei Schlafräumen spricht.

Die Urteile für die Signale aus der FaINT-Datenbank lagen zwischen 1,6 und 3,6 auf der 11-stufigen Lästigkeitsskala von 0 bis 10. Die sechs FaINT Signale waren also im Mittel etwas lästiger als die originale C608-Signatur und die C608 Mach Cut-off Signatur (jeweils mit outdoor/indoor-Filter). Zwei Signaturen (Loud1, Loud2) unterschieden sich jeweils signifikant von der um 3 dB abgesenkten C608-Signatur und der C608-Mach-Cut-off-Signatur. Das Signal „Highfreq2“ unterschied sich ebenfalls signifikant von der C608-Mach-Cut-off-Signatur. Die FaINT-Signaturen hatten alle eine deutlich längere Signaldauer von mehreren Sekunden, waren ähnlich einem Donner während eines Gewitters und beinhalteten im Hintergrund zum Teil auch leise Vegetationsgeräusche (Vögel, Insekten) nach dem eigentlichen Donner, die diese Geräusche bekannter und „natürlicher“ klingen ließen als die synthetischen C608 Drucksignaturen.

Trotz Orientierungsphase vor der eigentlichen Beurteilung, wurde die Skala von den Versuchspersonen unterschiedlich stark ausgenutzt. Ein Teil der Versuchspersonen (grüne Individualdaten in Abbildung 22) hat alle Geräusche im Mittel als sehr wenig lästig und einige Geräusche auch als gar nicht lästig (Skalenwert 0) beurteilt. Von diesen Versuchspersonen wurde auch nur der untere Teil der Skala genutzt. Versuchspersonen, die im Mittel höhere Ratings abgegeben haben (rote Individualdaten in Abbildung 22) haben die Skala auch stärker ausgenutzt.

In Abbildung 23 sind die mittleren Kurzzeit-Lästigkeitsurteile über dem A-bewerteten Schallexpositionspegel (ASEL) aufgetragen. Die Korrelationskoeffizient zwischen den Kurzzeit-Lästigkeitsurteilen und dem ASEL betrug $r = 0,96$.

Abbildung 23: Mittelwerte der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die 16 Signaturen (mit Outdoor-Indoor-Filterung) über dem A-gewichteten Expositionspegel (ASEL)



Anmerkung: Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Ergebnisse: Detektionsschwelle

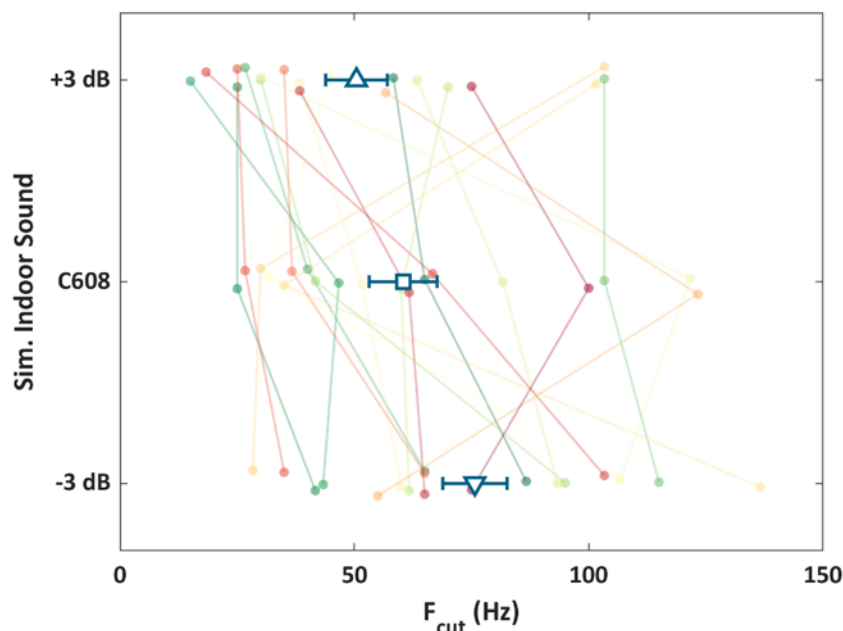
Abbildung 24 zeigt die Mittelwerte der Detektionsschwelle für eine Hochpass-Filterung der C608-Signatur sowie der Varianten mit um 3 dB erhöhtem und um 3 dB reduziertem Pegel. Die

Abbildung enthält im Hintergrund ebenfalls die Individualdaten in der gleichen Farbcodierung wie in Abbildung 22.

Für die C608-Signatur lag die Detektionsschwelle für eine Hochpass-Filterung im Mittel bei 60,4 Hz (SE = 7,3). Für die um 3 dB erhöhte C608-Signatur lag die mittlere Schwelle bei 50,4 Hz (SE = 6,6), für die um 3 dB reduzierte C608-Signatur lag die mittlere Schwelle bei 75,7 Hz (SE = 6,9). Der Effekt der Hochpass-Filterung war statistisch signifikant ($F(2,36) = 4,563$; $p < 0,05$; $\eta^2 = 0,11$). Post-hoc Vergleiche (Tukey HSD) zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen der Kondition mit einem um 3 dB erhöhtem und der Kondition mit einem um 3 dB reduziertem Pegel ($p < 0,05$). Die restlichen Vergleiche waren statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$).

Zu tiefen Frequenzen hin steigen die Hörschwelle und die Kurven gleicher Lautheit stark an und der Anstieg wurde mit fallendem Pegel auch steiler. Entsprechend waren für höhere Pegel niedrigere Frequenzen besser detektierbar. Der Anstieg der Detektionsschwelle mit Abnahme des Signalpegels stimmt entsprechend qualitativ mit dem Verlauf der Kurven gleicher Lautheit bzw. der Hörschwelle bei tiefen Frequenzen überein.

Abbildung 24: Mittelwerte und Standardfehler der Detektionsschwelle der Grenzfrequenz eines Hochpass-Filters für die drei Pegelstufen der Low-Boom-Signatur C608 (Signale Nr. 1, 2 und 3 aus Tabelle 2) sowie die Individualdaten



Anmerkung: Standardfehler in blau, F_{cut} = Grenzfrequenz des Hochpass-Filters, kleine Symbole im Hintergrund = Individualdaten (Farbzuordnung wie in Abbildung 22), N = 19, Quelle: eigene Darstellung, UOL.

Schlussfolgerung: Validierung der Schalldarbietung

Für die Wiedergabe von Low-Boom- und Mach-Cut-off-Signaturen im Schlaflabor wurden zur Beschallung bereits existierende Subwoofer SVSound, SB-2000 genutzt, deren Frequenzgang mit 19 bis 220 Hz angegeben ist (SVSound 2014). Aufgrund der Limitationen der benutzten Lautsprecher zu sehr tiefen Frequenzen hin und der räumlichen Situation im Schlaflabor (größeres Raumvolumen und dauerhafte Belüftung) war von einer niedrigeren Exposition der Versuchspersonen mit tieffrequentem Schall, im Vergleich zu Simulationen in einer Druckkammer, auszugehen. Entsprechend waren auch niedrigere Kurzzeitlästigkeitsurteile für die Reproduktion der Aufnahmen aus dem Schlaflabor gegenüber den Originalsignaturen in der Druckkammer in Oldenburg erwartet worden.

Entgegen dieser Erwartung lagen die Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die Aufnahmen der C608-Signatur aus dem Schlaflabor höher als für die „trockenen“ Originalsignale. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen den Originalsignaturen und den jeweiligen im Schlaflabor aufgenommenen Signaturen können in Veränderungen der Signale durch die Darbietung im Schlaflabor (z. B. durch Verzerrungen und Anregung von klappernden Teilen), die Aufnahme der Signaturen mittels eines Low-Frequency-Mikrofons an der Hörposition (z. B. Hintergrundgeräusche im Labor und Aufnahmeauschen) und der Wiedergabekette in der Druckkammer liegen. Die Unterschiede zeigten sich in einer Erhöhung des ASELs für die aufgenommenen Signale gegenüber der Originalsignatur, wohingegen der maximale Überdruck der Signaturen bei Original und Aufnahme nahezu passte. Zusammen spricht dies für Unterschiede eher im hochfrequenten Bereich, auf den die A-Gewichtung ausgelegt ist. Entsprechend der höheren ASEL-Werte erscheinen auch die höheren Kurzzeitlästigkeitsurteile plausibel. Durch die nominelle obere Grenzfrequenz der genutzten Subwoofer von 220 Hz ist auch, bis auf minimale Verzerrungsprodukte, nicht von einer übermäßigen Abstrahlung hoher Frequenzen auszugehen. Eine genaue Identifikation der Ursachen für diese Unterschiede ist jedoch schwierig.

Für die Subwoofer, die zur Beschallung im Schlaflabor eingesetzt wurden, war davon auszugehen, dass insbesondere sehr tiefe Frequenzen von wenigen Hz, aufgrund des Frequenzganges der aktiven Subwoofer nicht reproduziert werden können. Die experimentell bestimmte Detektionsschwelle für Hochpass-gefilterte Signale lag für das C608-Signal jedoch im Mittel bei 60 Hz und somit deutlich über der unteren Grenzfrequenz der genutzten Subwoofer. Ein potentieller Einfluss der unteren Grenze des Übertragungsbereiches von den genutzten Subwoofern sollte entsprechend den Ergebnissen des Detektionsexperiments nicht detektierbar gewesen sein.

Insgesamt sprechen insbesondere die Ergebnisse des Detektionsexperimentes aber auch die Kurzzeitlästigkeitsurteile dafür, dass die tieffrequente Schallexposition für die C608-Signatur und die C608-MCO-Signatur im Schlaflabor adäquat war und die resultierende Wirkung der im Schlaflabor dargebotenen Signaturen nicht unterschätzt wurde.

2.4 Literaturbasierte Ableitung der Hypothesen

Ausgehend von den Ergebnissen aus vorherigen Fluglärmstudien, wonach Reaktionen im Schlaf bereits bei sehr niedrigen Maximalpegeln beginnend ab ca. 33 dB(A) zu beobachten sind (Basner, Isermann, Samel 2006), wurde angenommen, dass sowohl die Low-Boom-Signale als auch Mach-Cut-off-Signale (bzw. Low-Boom-Mach-Cut-off-Signale) im Vergleich zu einer ruhigen Kontrollbedingung den Schlaf beeinträchtigen können. Zudem war zu erwarten, dass die Low-Boom-Signale den Schlaf mehr stören als die Mach-Cut-off-Signale.

Außerdem wurde davon ausgegangen, dass auch im Wachzustand während der Darbietung von Low-Boom- bzw. Mach-Cut-off-Signalen stärkere kardiovaskuläre Reaktionen zu beobachten sind als während einer ruhigen Kontrollperiode. Zudem war zu erwarten, dass Low-Boom-Signale stärkere kardiovaskuläre Reaktionen hervorrufen als Mach-Cut-off-Signale.

Folgende Hypothesen sollen anhand der geplanten Laborstudie überprüft werden:

► Primäre Hypothese:

- a) Die prozentuale Aufwach-Rate in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die spontane Aufwach-Rate in der Kontrollbedingung ohne Lärmereignisse.

Es gilt:

- $\text{Aufwach-Rate}_{\text{Low-Boom}} > \text{Aufwach-Rate}_{\text{Kontrolle}}$

► Sekundäre Hypothesen:

- b) Die prozentuale Aufwach-Rate in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Aufwach-Rate in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- Aufwach-Rate_{Low-Boom} > Aufwach-Rate_{Mach-Cut-off}

- c) Die prozentuale Rate der EEG-Arousals in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Rate der spontanen EEG-Arousals in der ruhigen Kontrollnacht. Zudem ist die Arousal-Rate in der Low-Boom-Bedingung größer als die Rate in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- Arousal-Rate_{Low-Boom} > Arousal-Rate_{Kontrolle}
- Arousal-Rate_{Low-Boom} > Arousal-Rate_{Mach-Cut-off}

- d) Die prozentuale Rate der Schlaf-Enttiefungen, d. h. der Wechsel von S4 zu S3, S2 oder REM-Schlaf bzw. von S3 zu S2 oder REM-Schlaf, in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Rate der spontanen Enttiefungen in der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die Rate der Enttiefungen in der Low-Boom-Bedingung größer als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

- Rate der Schlaf-Enttiefungen_{Low-Boom} > Rate der Schlaf-Enttiefungen_{Kontrolle}
- Rate der Schlaf-Enttiefungen_{Low-Boom} > Rate der Schlaf-Enttiefungen_{Mach-Cut-off}

- e) Die langsamwellige Aktivität (LWA) im EEG des Non-REM-Schlafs (NREMS) unmittelbar, d. h. innerhalb 1 Minute, nach einem Low-Boom-Ereignis ist niedriger als die LWA in einer 1-minütigen ruhigen Situation der Kontrollbedingung. Zudem ist die LWA im EEG des NREMS 1 Minute nach einem Low-Boom-Ereignis niedriger als nach einem Mach-Cut-off-Ereignis.

Es gilt:

- LWA des NREMS_{1 min nach Low-Boom} < LWA des NREMS_{1min nach Kontrolle}
- LWA des NREMS_{1min nach Low-Boom} < LWA des NREMS_{1min nach Mach-Cut-off}

- f) Die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität über die gesamte Nacht, ausgedrückt anhand der Parameter a) Schlafeffizienz, b) Einschlafdauer, c) Anteil des Tiefschlafs an der im Bett verbrachten Zeit, d) Anteil der Wachliegezeit an der im Bett verbrachten Zeit, e) Anzahl der Aufwachereignisse ist in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- physiologische Schlafqualität_{Low-Boom} < physiolog. Schlafqualität_{Kontrolle}
- physiologische Schlafqualität_{Low-Boom} < physiolog. Schlafqualität_{Mach-Cut-off}

- g) Die LWA im EEG des NREMS in der Low-Boom-Bedingung ist niedriger als die LWA in der ruhigen Kontrollnacht. Zudem ist die LWA im EEG des NREMS in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- $LWA_{\text{des NREMS Low-Boom}} < LWA_{\text{des NREMS Kontrolle}}$
- $LWA_{\text{des NREMS Low-Boom}} < LWA_{\text{des NREMS Mach-Cut-off}}$

- h) Die Herzratenvariabilität (HRV) ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen niedriger als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist die Herzratenvariabilität während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen niedriger als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.

Es gilt:

- $HRV_{\text{Low-Boom}} < HRV_{\text{Kontrolle}}$
- $HRV_{\text{Low-Boom}} < HRV_{\text{Mach-Cut-off}}$

- i) Die Herzrate ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist die Herzrate während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.

Es gilt:

- $Herzrate_{\text{Low-Boom}} > Herzrate_{\text{Kontrolle}}$
- $Herzrate_{\text{Low-Boom}} > Herzrate_{\text{Mach-Cut-off}}$

- j) Der Blutdruck ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist der Blutdruck während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.

Es gilt:

- $Blutdruck_{\text{Low-Boom}} > Blutdruck_{\text{Kontrolle}}$
- $Blutdruck_{\text{Low-Boom}} > Blutdruck_{\text{Mach-Cut-off}}$

- k) Die von den Versuchspersonen selbst eingeschätzte Schlafqualität ist in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die selbst eingeschätzte Schlafqualität in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- $\text{eingeschätzte Schlafqualität}_{\text{Low-Boom}} < \text{eingeschätzte Schlafqualität}_{\text{Kontrolle}}$
- $\text{eingeschätzte Schlafqualität}_{\text{Low-Boom}} < \text{eingeschätzte Schlafqualität}_{\text{Mach-Cut-off}}$

- l) Die morgendliche Schläfrigkeit ist nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die morgendliche Schläfrigkeit nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der Mach-Cut-off-Bedingung.

Es gilt:

- $Schläfrigkeit_{\text{Low-Boom}} > Schläfrigkeit_{\text{Kontrolle}}$
- $Schläfrigkeit_{\text{Low-Boom}} > Schläfrigkeit_{\text{Mach-Cut-off}}$

- m) Die lärmbedingte Kurzzeit-Belastigung ist nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die Kurzzeit-Belastigung nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der Mach-Cut-off-Bedingung.

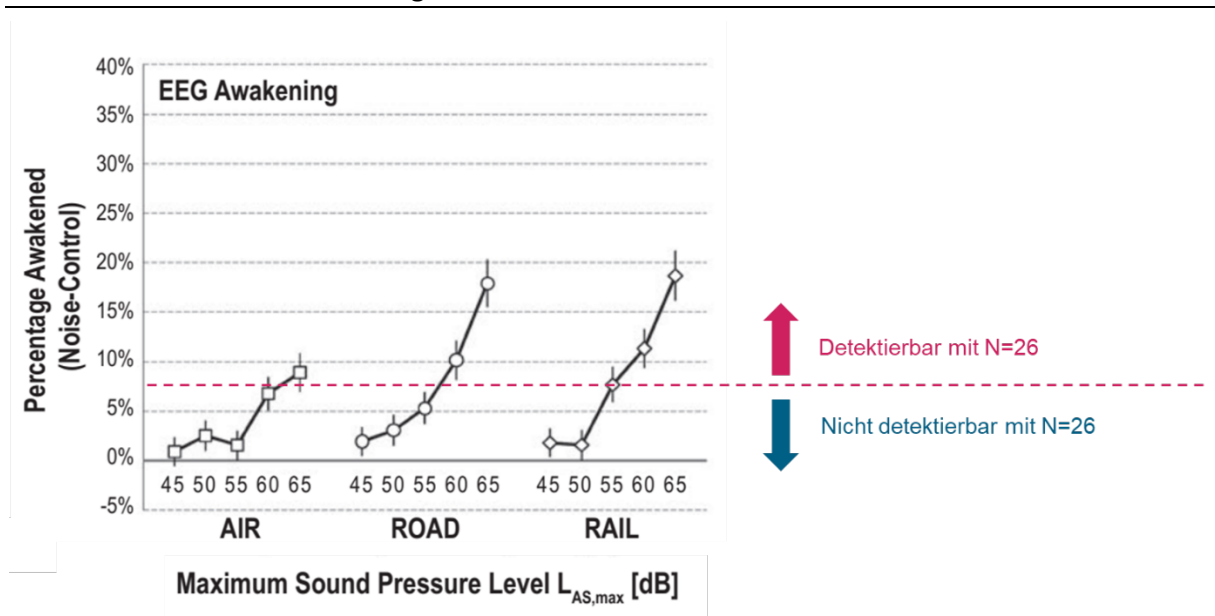
Es gilt:

- Belästigung_{Low-Boom} > Belästigung_{Kontrolle}
- Belästigung_{Low-Boom} > Belästigung_{Mach-Cut-off}

2.5 Bestimmung der Stichprobengröße

Ausgangspunkt für die Poweranalyse war die primäre Forschungsfrage bezüglich der Aufwach-Rate durch Low-Boom-Ereignisse im Vergleich zur spontanen Aufwachrate in einer ruhigen Kontrollnacht. Da die Versuchspersonenzahl vom Umweltbundesamt zunächst auf 26 Personen festgelegt war, wurde für die Poweranalyse auf dieser Basis betrachtet, in wie weit das geplante Studiendesign in der Lage wäre, einen gegebenenfalls vorhandenen Effekt zu detektieren. Dafür wurde der minimal detektierbare Unterschied in der Aufwach-Rate zwischen der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Ereignissen und der ruhigen Kontrollnacht abgeschätzt. Die Analyse ergab einen detektierbaren Unterschied von 7,56 %. Ausgehend von Erfahrungen aus vorausgegangenen Lärmwirkungsstudien erschien dieser Unterschied sehr hoch. Betrachtet man zum Vergleich den Effekt von konventionellem Fluglärm (Basner, Müller & Elmenhorst 2011), so würde eine Erhöhung der Aufwach-Rate um ca. 7,5 % nur für sehr hohe Innenschallpegel (> 60 db[A]) erwartet werden (Abbildung 25).

Abbildung 25: Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel ($L_{AS,max}$) eines Verkehrslärmereignisses und der Aufwach-Rate



Anmerkung: Unterscheidung von Flug- (AIR), Straßen-(ROAD) und Schienenverkehrslärm (RAIL). Der Bereich oberhalb der rot-gepunktete Linie gibt die Aufwach-Rate in Abhängigkeit des Maximalpegels an, die mit einer Anzahl von 26 Versuchspersonen (N) detektierbar wäre, während der Bereich darunter mit der gleichen Versuchspersonenanzahl nicht detektierbar wäre. Quelle: Basner, Müller und Elmenhorst (2011), adaptiert.

Bei der Powerberechnung musste berücksichtigt werden, dass die Anzahl von Lärmereignissen nicht zu hoch angesetzt werden sollte, da es sonst zu Interaktionseffekten kommen könnte, z. B. weil die Person zwischen den Ereignissen unter Umständen gar nicht mehr einschlft. Aus

diesem Grund wurden für den geplanten Versuch die Zahl der präsentierten Lärmereignisse pro Nacht auf 40 begrenzt.

Wie oben beschrieben, wäre eine Erhöhung der Aufwach-Rate durch ein Lärmereignis um 7,56 % im Vergleich zur spontanen Aufwach-Rate in der Kontrollbedingung vergleichsweise hoch gewesen. Um auch kleinere Erhöhungen in der Aufwach-Rate detektieren zu können, könnte die Anzahl der Versuchspersonen erhöht werden (Tabelle 4). Aus medizinischer Sicht erschien es sinnvoll, dass aber bereits Erhöhungen um 6 %, entsprechend der Wirkung von mittleren bis hohen Schalldruckpegeln, detektierbar sein sollten. Um eine Erhöhung der Aufwach-Rate um 6 % messen zu können, war gemäß der Poweranalyse eine Erhöhung der Versuchspersonenzahl auf mindestens 41 notwendig.

Tabelle 4: Erhöhung der Aufwach-Rate in Abhängigkeit der Anzahl der Versuchspersonen und der Lärmereignisse

Detektierbarer Effekt: Erhöhung der Aufwach- Rate um ...%	Alpha-Level (5 %)	Power (%)	Benötigte Anzahl Versuchspersonen (N)	Benötigte Anzahl Lärmereignisse pro Nacht
7,56	5	80	26	29
7,00	5	80	30	30
6,00	5	80	41	32
5,00	5	80	57	35

Anmerkung: Nullhypothese: Die Aufwach-Rate durch Low-Boom-Ereignisse im Vergleich zur spontanen Aufwach-Rate in einer ruhigen Kontrollnacht ist gleich. Alternativhypothese: Die Aufwach-Rate durch Low-Boom-Ereignisse im Vergleich zur spontanen Aufwach-Rate in einer ruhigen Kontrollnacht ist unterschiedlich. Wahrscheinlichkeit für ein falsch-positives Ergebnis: Alpha-Fehler = 5 %. Wahrscheinlichkeit für ein falsch-negatives Ergebnis: Power = 80 %.

Aufgrund des Studiendesigns (Ausbalancierung der Reihenfolge der Lärmnächte sowie Gleichverteilung männlicher und weiblicher Versuchspersonen) sollten insgesamt 42 Versuchspersonen vollständig gemessen werden.

2.6 Konzeption des Studiendesigns

In der Schlafstudie sollten gesunde, insbesondere schlafgesunde und altersentsprechend normalhörende 21 weiblichen und 21 männlichen Versuchspersonen im Alter zwischen 18 und 65 Jahren untersucht werden. Alle Versuchspersonen sollten drei Testnächte durchlaufen. Diese sollten eine ruhige Kontrollnacht ohne Wiedergabe irgendeiner Lärmsignatur sowie zwei Lärmnächte mit Einspielung von jeweils 40 Lärmereignissen umfassen. In jeder der Lärmnächte sollte jeweils nur ein Signatur-Typ wiedergegeben werden, d. h. entweder Low-Boom-Signaturen oder Mach-Cut-off-Signaturen (bzw. Low-Boom-Mach-Cut-off-Signatur). Die beiden Überschallknall-Signaturen sollten mit gleicher Expositionszahl und in voneinander getrennten Nächten dargeboten werden, da nicht nur die ereignisbezogene Wirkung (z. B.

Aufwachereignisse) untersucht werden sollte, sondern auch die Wirkung auf die gesamte Nacht (z. B. Schlaf-Makroparameter). Zudem hätte die Untersuchung der kombinierten Wirkung von beiden Lärmsignaturen in einer Nacht eine weitere Studiennacht oder eine Erhöhung der Anzahl der Lärmereignisse pro Nacht erfordert. Während die Reihenfolge der Lärmbedingungen randomisiert werden sollte, um Reihenfolgeeffekte zu minimieren, sollte die Kontrollbedingung ohne Einspielung einer Lärmsignatur immer die erste Studiennacht sein. Dies wurde so gewählt, da einige Forscher*innen argumentieren, dass die Nacht nach einer Nacht mit Schlafstörungen einem Rebound-Effekt unterliegen könnte und sich dort die Schlafdeprivation der

vorangegangenen Nacht niederschlägt (Wick, Combertaldi, & Rasch 2024). Die Kontrollbedingung sollte eine unbeeinflusste Nacht darstellen, da diese zur Quantifizierung der lärminduzierten Aufwachreaktionen herangezogen werden sollte. Da die Wirkung dieser neuartigen Überschallknall-Ereignisse auf den Schlaf nicht bekannt war, sollte vermieden werden, dass eine deutliche Beeinträchtigung des Schlafs in einer Lärmbedingung die darauffolgende Kontrollbedingung beeinflusst. Daraus ergaben sich folgenden Abläufe der Studienächte:

- ▶ Untersuchungsgruppe A: Kontrollbedingung, Low-Boom-Bedingung, Mach-Cut-off-Bedingung
- ▶ Untersuchungsgruppe B: Kontrollbedingung, Mach-Cut-off-Bedingung, Low-Boom-Bedingung

Die Zuteilung der Versuchspersonen zu den Untersuchungsgruppen sollte ausbalanciert erfolgen. Die Versuchspersonen der Gruppe A sollten nach der Kontrollbedingung als erste Nacht, die Low-Boom-Bedingung als zweite Nacht und anschließend die Mach-Cut-off-Bedingung als dritte Nacht durchlaufen. Bei Versuchspersonen der Gruppe B sollte die Abfolge der Nächte mit den beiden Lärmbedingungen umgekehrt sein.

Zudem sollte die Studie doppel verblindet durchgeführt werden. Dementsprechend sollten die Versuchspersonen und alle Versuchsleitenden, die unmittelbar Kontakt zu den Versuchspersonen haben würden, nicht darüber informiert werden, dass es unterschiedliche Untersuchungsgruppen (Gruppe A oder B) geben wird und wann, welche oder wie viele Geräusche eingespielt werden. Sie sollten lediglich die Information erhalten, dass es sich um eine Studie zur Untersuchung der Wirkungen von Umgebungslärm handelt. Ebenso sollte die Auswertung der elektrophysiologischen Schlafsignale, d. h. die Entscheidung über ein bestimmtes Schlafstadium zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Nacht blind und ohne jegliche Kenntnis über Auftreten, Art und Intensität eines etwaigen Lärmereignisses zu diesem Zeitpunkt erfolgen.

Zur Untersuchung der objektiven Schlafbeeinträchtigungen sollten an allen Versuchspersonen während aller drei Testnächste polysomnographische Messungen durchgeführt werden. Diese sollten die Erhebung der Hirnaktivität (Elektroenzephalogramm, EEG), der Augenbewegungen (Elektrookulogramm, EOG), des Muskeltonus (Elektromyogramm, EMG) sowie der Herzaktivität (Elektrokardiogramm, EKG) umfassen.

Um die subjektiven Schlafbeeinträchtigungen in Folge der Beschallung mit Überschall-Signalen zu untersuchen, sollten die Versuchspersonen am Morgen nach jeder Testnacht anhand eines standardisierten Fragebogens ihre Schlafqualität in der vorangegangenen Nacht (Griefahn, Marks & Robens 2006), ihre aktuelle Schläfrigkeit anhand der Karolinska Sleepiness Skala (Akerstedt & Gillberg 1990) und die lärmbedingte Belästigung in der vorangegangenen Nacht selbst einschätzen.

Die Messungen der physiologischen Reaktionen im Wachzustand wurden für den 3. Morgen geplant, um die Versuchspersonen vor der Absolvierung der drei Testnächte nicht zu entblenden. Dafür sollten den Versuchspersonen nach dem Aufstehen die drei Bedingungen (Kontrolle, Low-Boom, Mach-Cut-off) dargeboten und währenddessen kardiovaskuläre Parameter (Blutdruck, Herzratenvariabilität) erhoben werden.

Die Schlafstudie wurde von der Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein geprüft und genehmigt. Zudem wurde sie beim Deutschen Register für klinische Studien (DRKS) registriert (DRKS-ID: 00028595).

3 Arbeitspaket 2 - Durchführung und Auswertung der Schlafstudie

Die folgenden Schritte des Arbeitspakets 2 werden hier beschrieben:

1. Versuchspersonenakquise und -auswahl
2. Studienprotokoll
3. Methode zur Einspielung der Signaturen
4. Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Schlaf
5. Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Wachzustand
6. Methode zur Messung der subjektiven Beurteilung
7. Beschreibung der Stichprobe
8. Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf
9. Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf
10. Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand
11. Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand
12. Ergebnisse der subjektiven Beurteilung
13. Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der subjektiven Beurteilung

3.1 Versuchspersonenakquise und -auswahl

Vor der Versuchspersonenakquise und -auswahl wurden zunächst die Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt, um sicherzustellen, dass bei den eingeschlossenen Versuchspersonen keine gesundheitsrelevanten Bedingungen vorlagen, welche die Auswertung und Interpretierbarkeit der Laborergebnisse beeinträchtigen könnten. Unter derartige gesundheitsrelevante Bedingungen fielen Hörstörungen, psychische und physiologische Erkrankungen, insbesondere Schlafstörungen wie schlafbezogene Atemstörungen (Apnoen) oder periodische Beinbewegungen sowie bestimmte Medikationen.

Die folgenden Kriterien wurden für einen Einschluss definiert:

- ▶ 18 - 65 Jahre
- ▶ (schlaf-)gesund
- ▶ männlich oder weiblich
- ▶ altersentsprechend normalhörend
- ▶ Vorliegen einer unterschriebenen Einwilligungserklärung zum Datenschutz, des Versuchspersonenvertrags, der Datenschutzerklärung zur Durchführung der Studie und der Versuchspersoneneinwilligungserklärung
- ▶ ausreichende Kenntnis der deutschen Sprache
- ▶ von einer Coronavirus-Erkrankung-2019 (COVID-19) genesen (Genesenen-Status ist nicht älter als 3 Monate) oder vollständig geimpft einschließlich Booster-Impfung (2GPlus-Regel) oder entsprechend der aktuell gültigen Corona-Schutzmaßnahmen des DLR
- ▶ Bereitschaft zum Tragen einer partikelfiltrierenden Atemschutzmaske der Schutzklasse 2 (FFP2) während des Aufenthalts außerhalb der Versuchspersonenzimmer und während engen Kontakts zum Studienpersonal (z. B. beim Anlegen der Elektroden) entsprechend der aktuell gültigen Corona-Schutzmaßnahmen des DLR

Die folgenden Kriterien wurden für einen Ausschluss definiert:

- ▶ Jegliche Medikation/Erkrankung oder Störung/medizinische Behandlung/Operation, die nach der Ansicht des Prüfarztes oder der Prüfarztin die Untersuchungsparameter erheblich verfälschen könnte (insbesondere intrinsische Schlafstörungen wie Restless Legs Syndrom, Periodic Limb Movement Disorder oder Obstruktives Schlaf-Apnoe-Syndrom)
- ▶ Adipositas und Übergewicht mit Body-Mass-Index > 30 Kilogramm/Quadratmeter
- ▶ Schwangerschaft
- ▶ genereller Konsum von weichen und harten Drogen
- ▶ genereller Konsum von Nikotin
- ▶ Koffein-Konsum > 450 Milligramm pro Tag
- ▶ Alkoholkonsum > 14 Rationen pro Woche
- ▶ Hörstörungen (Tinnitus, Hörsturz) oder schlechtes Hörvermögen, d. h. die Hörschwellen in einem audiometrischen Screening auf dem schlechteren Ohr liegen höher als das 10. Perzentil der in ISO 7029 (2017) geschlechts- und altersspezifischen Hörschwellen, es wird zusätzlich ein Malus von 10 dB berücksichtigt aufgrund der Tatsache, dass die Audiometrie nicht in einem schallisolierten Raum stattfindet. Da die präsentierten Überschallknalle einen sehr niedrigen Frequenzbereich aufweisen, werden bei dem audio-metrischen Screening nur Frequenzen zwischen 125 und 1000 Hz
- ▶ Atypische Schlafgewohnheiten:
 - a) Reguläre Schlafdauer < 6 und > 9 Stunden (Nachtschlafzeit)
 - b) Schlafzeiten an Werktagen: Zubettgehen vor 21 Uhr oder nach 00:00 Uhr, Aufstehen vor 5 Uhr oder nach 8:30 Uhr
- ▶ nicht der deutschen Sprache mächtig
- ▶ akute Infektion mit COVID-19
- ▶ Jede weitere Bedingung, die nach Ansicht der durchführenden Ärzt*innen die Versuchsperson ungeeignet erscheinen lassen (z. B. Klaustrophobie, Vorliegen einer oder ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer depressiven Episode durch Beeinträchtigung des Schlafs)

Diese Ein- und Ausschlusskriterien wurden mittels eines mehrstufigen Auswahlverfahrens geprüft. Die Stufen des Auswahlverfahrens sowie der Zeitraum der Akquise- und Auswahlsschritte sind in Tabelle 5 angegeben. Mögliche Versuchspersonen wurden über die interne Versuchspersonendatenbank des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR oder über Bekanntmachung auf entsprechenden Internetportalen auf die Studie aufmerksam gemacht.

Bei Interesse an einer Teilnahme wurde den Kandidat*innen ein Link zu einer Homepage zugesandt, auf der sich eine ausführliche Studienbeschreibung befand. Bei Erklärung des Einverständnisses zum Schutz und der Nutzung der erhobenen Daten durch das DLR wurden sie zum Vorauswahlfragebogen weitergeleitet. In diesen Vorauswahlfragebögen wurden die gesundheitsbezogenen Ein- und Ausschlusskriterien abgefragt (siehe oben).

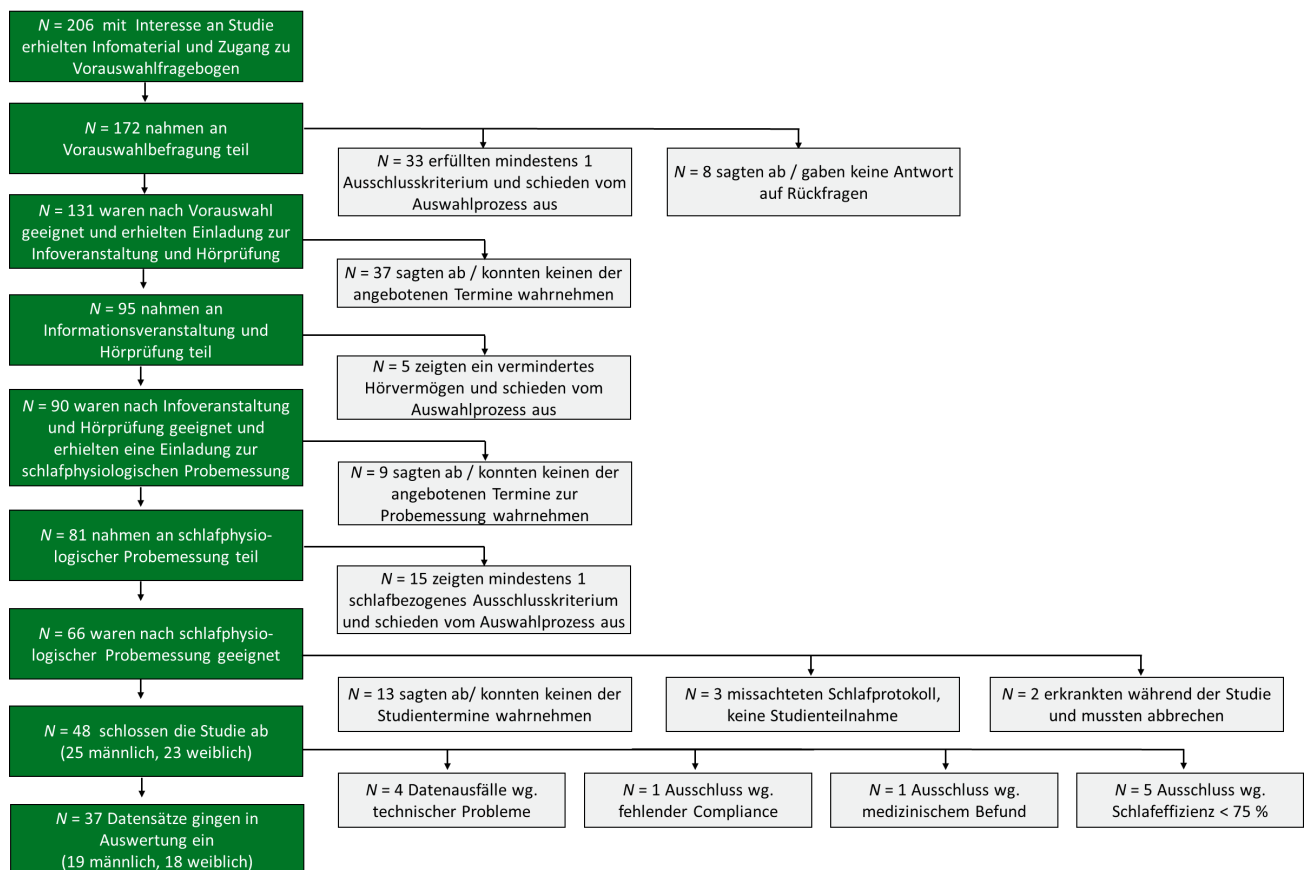
Tabelle 5: Stufen des Verfahrens zur Akquise und Auswahl der Versuchspersonen

Akquise-/Auswahlstufe	Überprüfte Ein- und Ausschlusskriterien	Zeitraum
<ul style="list-style-type: none"> • Versuchspersonenakquise mittels Anschreiben von Kontakten in Versuchspersonendatenbank, Bekanntmachung auf DLR-Internetportal und in sozialen Medien (Twitter, Instagram, Facebook) • Information über Ein- und Ausschlusskriterien der Studienteilnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • keine 	<p>Mai - September 2022</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Fragebogenbasierte Vorauswahl über Online-Fragebogen 	<ul style="list-style-type: none"> • Alter und Geschlecht • Schlafgesundheit und -gewohnheiten, gegebenenfalls Auffälligkeiten im Schlaf, die auf Apnoen und periodische Beinbewegungen hindeuten • Hörfähigkeit • Einwilligung in Datenschutzerklärung • ausreichende Kenntnis der deutschen Sprache • Bereitschaft zum Tragen partikelfiltrierenden Atemschutzes der Klasse 2 (FFP2-Maske), gegebenenfalls Beschwerden beim Tragen • Zeitliche Verfügbarkeit • Konsum von Genussmitteln und Drogen • Body-Mass-Index (BMI) • Erkrankungen, Medikation und sonstige Bedingung, die nach Ansicht der durchführenden Ärzt*innen die Versuchsperson ungeeignet erscheinen lassen 	<p>Juni - September 2022</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Informationsveranstaltung mit Hörprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorliegen eines Versuchspersonenvertrags und der Einwilligungserklärung der Versuchspersonen zur Teilnahme an der Probemessung • Hörfähigkeit mittels Audiometrie • Risiko für Vorliegen eines obstruktiven Schlafapnoe-Syndroms mittels Messen des Halsumfangs in Ergänzung zum Fragebogenscreening im Vorauswahlbogen 	<p>Juni - September 2022</p>

Akquise-/Auswahlstufe	Überprüfte Ein- und Ausschlusskriterien	Zeitraum
<ul style="list-style-type: none"> Schlafphysiologische Probemessung in den Laborräumen des DLR 	<ul style="list-style-type: none"> Apnoen und Hypopnoen Periodische Beinbewegungen 	August - Oktober 2022
<ul style="list-style-type: none"> Zulassung als Versuchsperson unter Berücksichtigung eines ausgeglichenen Geschlechterverhältnisses und der 10-tägigen Einhaltung eines Schlafprotokolls mit Verzicht bzw. eingeschränktem Konsum von Genussmitteln Durchführung der Hauptstudie 	<ul style="list-style-type: none"> Vorliegen eines Versuchspersonenvertrags und der Einwilligungserklärung der Versuchspersonen zur Studienteilnahme Einhaltung des Schlafprotokolls Akute Infektion/Erkrankung Nachweis des Konsums von Drogen- und Genussmitteln 	September 2022 - Januar 2023

Die Ergebnisse der Versuchspersonenakquise und -auswahl sind in Abbildung 26 dargestellt. Das Schaubild zeigt einen relativ hohen Anteil an Kandidat*innen, die bereits in der fragebogenbasierten Vorauswahl ausgeschieden sind. Hauptgründe für einen Ausschluss waren vorwiegend Drogenkonsum und eine Medikation, die Auswirkungen auf die Untersuchungsparameter haben könnten. Die Ausschlussgründe anhand des Fragebogens und deren Häufigkeit sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Abbildung 26: Ergebnisse der Versuchspersonenakquise und -auswahl



Anmerkung. N bezieht sich auf die Anzahl der Kandidat*innen. Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Tabelle 6: Fragebogenbasierte Gründe für den Ausschluss von der Studie und deren Häufigkeiten

Ausschlussgrund	Häufigkeit
Drogenkonsum	10
Medikation	7
Psychische Erkrankung/Auffälligkeiten	4
Übergewicht (BMI > 30)	3
Schlafgewohnheiten/Schlafprobleme/Schichtarbeit	3
Hörsturz/Hörprobleme	4
Koffeinkonsum	2
Sprachprobleme	2
Regelmäßiger Tabakkonsum	2
Physische Erkrankung	2
Alter	1
Fehlende Bereitschaft zum Tragen partikelfiltrierenden Atemschutzes der Klasse 2 (FFP2-Maske)	1
Probleme in engen Räumen	1
Zähneknirschen	1

Anmerkung: Mehrfachnennungen sind möglich.

Durchliefen die Kandidat*innen die fragebogenbasierte Vorauswahl erfolgreich, erhielten sie eine Einladung zu einer Informationsveranstaltung und einem ärztlichen Aufklärungsgespräch. In diesem Rahmen erfolgte nach unterschriebener Einwilligungserklärung der Kandidat*innen zur Teilnahme an der Probemessung (unter Berücksichtigung der Deklaration von Helsinki) und eines Versuchspersonenvertrags ein Hörscreening mit Hilfe eines Audiometers. Daneben wurde der Halsumfang gemessen, der ein Indikator für schlafbezogene Atmungsstörungen darstellen kann.

Anschließend erfolgte der nächste Auswahlschritt, nämlich eine elektrophysiologische Probemessung im Schlaflabor. Die Messung sollte der Aufdeckung eventueller, bisher nicht detektierter Schlafstörungen, insbesondere Apnoen/Hypopnoen und periodischer Beinbewegungen, dienen. Außerdem diente die Nacht der Gewöhnung an die elektrophysiologischen Messinstrumente und das Studienprotokoll. Für die Teilnahme an der Probemessung erhielten die Kandidat*innen bereits eine Aufwandsentschädigung.

Die Anzahl der durchgeführten Informationsveranstaltungen und Probemessungen orientierte sich an dem Ziel der insgesamt 42 vollständig gemessenen Versuchspersonen. Basierend auf der Erfahrung von Ausfällen aus vergangenen Studien wurde für jede Auswahlstufe mit Ausfällen von bis zu 25 Prozent gerechnet und entsprechend mehr Personen eingeplant. Abbildung 26 verdeutlicht, dass ein großer Anteil von Kandidat*innen, die an der Probemessung teilgenommen haben, aufgrund von Apnoen (AHI > 15) und periodischen Beinbewegungen (PLMI > 20) auszuschließen war (eine Komorbidität aus Apnoen und periodischen Beinbewegungen war möglich). Kandidat*innen, die unter Apnoen und/oder periodischen

Beinbewegungen leiden, mussten von der Studie ausgeschlossen werden, da die Signale der autonomen Aktivierung in Folge einer Apnoe und der einhergehenden Sauerstoffentsättigung bzw. einer periodischen Beinbewegung in einem Elektroenzephalogramm kaum von den Signalen der Aktivierung in Folge eines Lärmereignisses zu unterscheiden sind.

Nach Feststellung der Eignung der Versuchspersonen anhand der Probemessung wurden sie zufällig einer von zwei Untersuchungsbedingungen (Gruppe A oder Gruppe B) in der Hauptstudie zugewiesen, ein ausgewogenes Geschlechterverhältnis wurde dabei berücksichtigt.

10 Tage vor Beginn der Testnächte wurden die Versuchspersonen gebeten, acht Stunden Bettzeit einzuhalten, die für sie auch während der Testnächte gelten sollte. Damit die Versuchspersonen die Einhaltung der Bettzeiten leichter in ihren Alltag integrieren können, bestand die Möglichkeit zwischen frühen Bettzeiten (22 bis 6 Uhr) und späten Bettzeiten (23 bis 7 Uhr) zu wählen. Schlafen am Tag war nicht gestattet. Die Einhaltung der Bettzeiten in der Vorbereitungszeit wurde anhand der Aufzeichnungen von Aktivitätsdaten (Aktigraphie) erhoben. Während der Vorbereitungszeit sollte auf Alkohol verzichtet und der Koffeinkonsums auf maximal 2 Tassen Kaffee oder Tee (ca. 200 Milligramm Koffein) am Vormittag (bis 12 Uhr) eingeschränkt werden. Diese Vorbereitungszeit diente der Adaptation an die jeweiligen Bettzeiten im Schlaflabor und sollte sicherstellen, dass bei allen Versuchspersonen die gleichen Ausgangsbedingungen im Hinblick auf den Schlafdruck und den Schlafrhythmus vorlagen. Jeden Abend, nach Ankunft der Versuchspersonen im Schlaflabor wurden zunächst ein Corona-Test, ein Drogen-Screening und bei weiblichen Versuchspersonen zusätzlich ein Schwangerschaftstest durchgeführt. Anschließend wurden die Daten des Aktometers ausgelesen und die Einhaltung der vereinbarten Bettzeiten während der 10-tägigen Vorbereitungszeit überprüft. Bei Verstößen gegen die Einhaltung des Schlafprotokolls konnte die Versuchsperson nicht zur Studienteilnahme zugelassen werden. Das gleiche galt bei Nachweis einer akuten Coronavirus-Infektion (COVID-19), einer Schwangerschaft oder dem Konsum von Drogen und bestimmten Genussmitteln mittels Schnell- bzw. Urintests. Vor der Teilnahme an der Studie wurde eine unterschriebene Einwilligungserklärung der Versuchspersonen (unter Berücksichtigung der Deklaration von Helsinki) und eines Versuchspersonenvertrags, der unter anderem die Informationen zur Aufwandsentschädigung enthielt, eingeholt.

Die Datenerhebung fand von September 2022 bis Februar 2023 statt. Obwohl zusätzlich zur festgelegten Anzahl an Versuchspersonen mit Ersatzversuchspersonen geplant wurde, kam es jedoch zu Ausfällen aufgrund von Absagen seitens der Versuchspersonen (Erkrankungen, terminliche Kollisionen, und weitere) und fehlender Compliance (Nicht-Einhaltung des Schlafprotokolls). Des Weiteren kam es zu Datenausfällen aufgrund technischer Probleme (Verlust der Datenaufzeichnung) und medizinischer Gründe (erhöhter PLM-Index). Letztendlich wurden die Daten von 42 Versuchspersonen ausgewertet, von denen jedoch fünf aufgrund einer geringen Schlafeffizienz von den darauffolgenden Analysen ausgeschlossen wurden.

3.2 Studienprotokoll

Am ersten Abend erhielten die Versuchspersonen Informationen über den Ablauf der Studie und den Hinweis, sich nicht über Lärm im Allgemeinen und über den eingespielten Umgebungslärm zu unterhalten. Zudem werden sie gebeten, den sogenannten Eingangs-Fragebogen (Details unter 3.6.1.1) auszufüllen.

Jeden Abend wurde den Versuchspersonen die Polysomnographie von geschulten DLR-Mitarbeitenden angelegt. Kurz vor dem Zubettgehen werden die Versuchspersonen gebeten den sogenannten Abendfragebogen (Details unter 3.6.1.2) auszufüllen. Anschließend gingen die Versuchspersonen zur vorgesehenen Zeit ins Bett und die Akustikeinspielung wurde gestartet.

An jedem Morgen, nach dem Wecken der Versuchspersonen zur vorgegebenen Zeit, wurde eine 30-minütige Aufwachphase eingehalten bevor die Versuchspersonen den so genannten Morgen-Fragebogen (Details unter 3.6.1.3) bearbeiteten. In dieser Aufwachphase verließen die Versuchspersonen ihr Bett, um der Schlafträgheit entgegenzuwirken. Schlafträgheit ist ein physiologischer Zustand beeinträchtigter kognitiver und sensomotorischer Leistungsfähigkeit, der unmittelbar nach dem Aufwachen auftritt. In den meisten Fällen vergeht die morgendliche Schlafträgheit 15 bis 30 Minuten nach dem Aufwachen. Nach dem Morgen-Fragebogen erfolgte die Erhebung der kardiovaskulären Reaktionen im Wachzustand. Dafür wurde jeweils am Morgen nach der ersten und zweiten Nacht während einer 13,5-minütigen Sitzung in Ruhe (Kontrolle) eine nicht-invasive Messung des Blutdrucks, eine Aufzeichnung des Elektrokardiogramms, des Elektroenzephalogramms und der Fingerpulsamplitude bei den Versuchspersonen durchgeführt.

Am letzten Morgen erfolgten neben der Messung der kardiovaskulären Reaktionen im Wachzustand in Ruhe (Kontrolle) außerdem die gleichen Messungen je einmal unter Einspielung von Low-Boom-Ereignissen und einmal unter Einspielung von Mach-Cut-off-Ereignissen. Auch hier wurde zuerst unter der Kontrollbedingung gemessen, gefolgt von den beiden Lärmbedingungen in randomisierter Reihenfolge. Am letzten Morgen erfolgten demnach drei 13,5-minütige Messungen. Zuletzt wurden die Versuchspersonen gebeten, den sogenannten Abschluss-Fragebogen (Details unter 3.6.1.4) zu beantworten.

3.3 Methode zur Einspielung der Signaturen

Damit alle Messungen zeitlich synchron erfolgen konnten, befanden sich ausschließlich Versuchspersonen mit den gleichen Bettzeiten zur selben Zeit im Schlaflabor. Um Reihenfolgeeffekte zu minimieren, wurde die Reihenfolge der Lärmnächte zwischen den Laborsessions randomisiert während die ruhige Kontrollnacht stets die erste Testnacht darstellte. In jeder der Lärmnächte wurde jeweils nur ein Signatur-Typ wiedergegeben, d. h. entweder die Low-Boom-Signaturen oder die Mach-Cut-off-Signaturen, jedoch kein Mix daraus. Für jede der drei Testnächte wurde eine 8-stündige Akustikdatei erstellt, die mit Hilfe eines Computers eingespielt wurde. Da sowohl die Versuchspersonen als auch die DLR-Mitarbeitenden bezüglich der Herkunft der Geräusche als auch zu den verschiedenen Bedingungen verblindet waren, wurde für die erste Nacht, die immer der Kontrollbedingung entsprach, ebenfalls eine Akustikdatei erstellt, die keine Lärmereignisse enthielt. Die Akustikdateien für die zweite und dritte Nacht enthielten jeweils 40 Lärmereignisse der Low-Boom- und der Mach-Cut-off-Signatur, die in randomisierten Intervallen zwischen 3 und 21 Minuten vorlagen. Die Darbietungszeitpunkte und Intervalle zwischen der Low-Boom- und der Mach-Cut-off-Bedingung wurden gleich gehalten. Um die ereignisbezogene Auswertung der Daten zu ermöglichen, wurde die Uhrzeit des Computers mit allen Datenaufzeichnungsgeräten synchronisiert, die Akustik-Datei immer zur vollen Minute gestartet und die exakte Startzeit festgehalten. Dadurch war der exakte Zeitpunkt der Lärmereignisse bekannt und die Lärmereignisse wurden immer zur vollen Minute eingespielt.

Auch für die morgendlichen Messungen im Wachzustand wurden drei Akustikdateien über 13,5 Minuten erstellt, deren Einspielung ebenfalls mit Hilfe des Computers zur vollen Minute gestartet wurde. Aufgrund der Verblindung wurde auch hier eine Datei ohne Lärmereignisse erstellt, die am ersten und zweiten Morgen abgespielt wurde. Für den dritten und letzten Morgen wurden zwei Dateien mit jeweils 5 Lärmereignissen der Low-Boom- und der Mach-Cut-off-Signatur erstellt, die zu den folgenden Zeitpunkten nach Start der Messung eingespielt wurden: 1) nach 30 Sekunden, 2) nach 3 Minuten, 3) nach 6,5 Minuten, 4) nach 8,5 Minuten und 5) nach 11,5 Minuten. Die Reihenfolge der Bedingungen entsprach der Reihenfolge der

Studiennächte, der die Versuchspersonen zu Beginn der Studie randomisiert zugeteilt wurden (Untersuchungsgruppe A oder B).

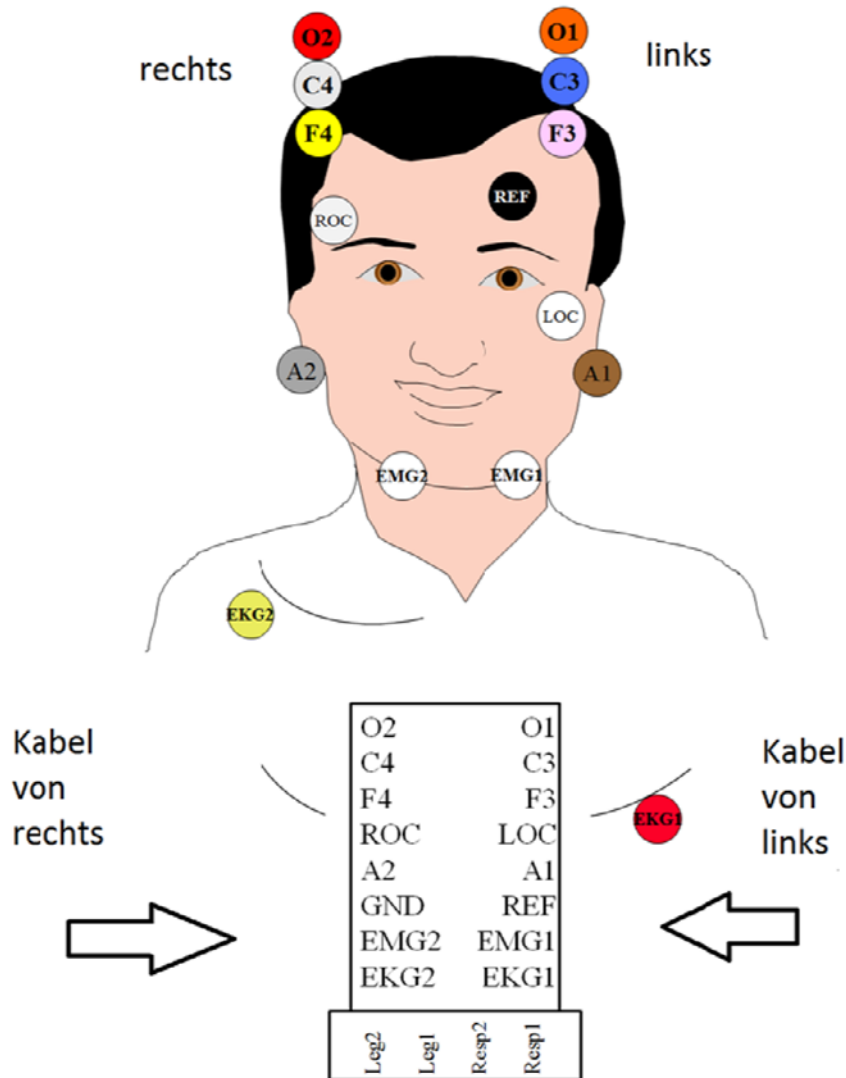
3.4 Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Schlaf

Zur Untersuchung der Wirkungen der Überschallknall-Signaturen auf den Schlaf wurde die physiologische Schlafqualität der Versuchspersonen während aller drei Studiennächte polysomnographisch gemessen. Bei der Polysomnographie handelt es sich nach wie vor um den Goldstandard, um den Schlaf zu messen (Basner 2021). Diese umfasst die simultane Erhebung der Hirnaktivität (Elektroenzephalogramm, EEG), der Augenbewegungen (Elektrookulogramm, EOG), des Muskeltonus (Elektromyogramm, EMG) sowie der Herzaktivität (Elektrokardiogramm, EKG).

Die EEG-Elektroden wurden gemäß dem internationalen 10/20-System auf der Kopfhaut der Versuchspersonen angebracht (Abbildung 27). Die polysomnographischen Signale wurden durch digitale Aufzeichnungsgeräte erfasst, die am DLR entwickelt wurden und regelmäßig eingesetzt werden. Um die ereignisbezogene Auswertung der Daten zu gewährleisten, wurde die Uhrzeit der Aufzeichnungsgeräte jeden Abend mit der Uhrzeit des Computers zur Akustikeinspielung synchronisiert. Die Analogsignale wurden hochpassgefiltert (Zeitkonstante 2.2 Sekunden für EEG und EOG, 0.04 Sekunden für EMG), tiefpassgefiltert (Butterworth, 12 dB/Octave; -6 dB bei 70 Hz für EEG, EOG und EMG) und digitalisiert (Auflösung 12 Bit; Abtastrate 1024 Hz; Speicherrate 256 Hz). Die Rohsignale wurden auf digitalen Speicherkarten (1 Gigabyte SanDisk) gespeichert und im Rahmen der Datensicherung offline auf einen Rechner heruntergeladen. Die elektrophysiologischen Daten wurden am Morgen nach jeder Studiennacht durch hierfür geschultes Personal gesichtet und gesichert. Da im Rahmen der Datensicherung auch die Aufzeichnung der Akustikdaten überprüft und gesichert wurden, wurde das Personal für die Bedingungen teilweise entblindet, indem die Bedingungen mit Buchstaben kodiert und die in der jeweiligen Bedingung zu erwartenden Maximalpegeln angegeben wurden.

Die Ableitungen von EEG, EMG und EOG erfolgte gemäß den AASM-Kriterien (EEG-Ableitungen: F3/A2, F4/A1, C3/A2, C4/A1, O1/A2, O2/A1, siehe Abbildung 27). Die Auswertung der Schlaf-Wach-Stadien erfolgte nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1968) durch ein visuelles Scoring. Dabei wurde die gesamte Nacht in Epochen mit einer Länge von 30 Sekunden eingeteilt und abhängig von EEG-Frequenz und Amplitude, bestimmten Mustern im EEG, dem Muskeltonus im EMG und dem Auftreten von langsamen und schnellen Augenbewegungen im EOG einem bestimmten Schlafstadium zugeordnet. Für die jeweilige Epoche wird das Schlafstadium bestimmt, dessen Merkmale für den Zeitraum von ≥ 15 Sekunden vorliegen. Die Auswertung aller Nächte erfolgte durch eine hierfür speziell geschulte medizinisch-technische Assistentin (MTA).

Abbildung 27: Elektrodenpositionen



Anmerkung: Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Anhand der elektrophysiologischen Signale ließen sich nach international standardisiertem Verfahren (Rechtschaffen & Kales 1968) Polysomnogramme mit den folgenden Schlafstadien identifizieren: Wach, Rapid Eye Movement-Schlaf (REM-Schlaf) sowie den Non-REM-Schlaf (NREMS) unterteilt in Schlafstadium 1 – 4 (S1 - S4), wobei S1 nicht-regenerativen, leichten Schlaf; S2 stabilen Schlaf und S3 und S4 Tiefschlaf bzw. Slow Wave Sleep (SWS) beschreiben. Während SWS und REM-Schlaf wichtig für die Erholung und die Gedächtnisbildung sind (Di et al. 1990), handelt es sich bei wach und S1 um typische Indikatoren, die auf einen gestörten und fragmentierten Schlaf hinweisen (Maschke 1992). Schlafende durchlaufen diese Schlafphasen typischerweise mehrmals pro Nacht zyklisch, wobei in den ersten Stunden einer Schlafperiode der Tiefschlaf und in den späteren Stunden REM-Schlaf und S2 überwiegen. Abbildung 28 zeigt die grafische Darstellung der verschiedenen Schlafphasen (Hypnogramm) einer Versuchsperson über eine Nacht unter der Kontrollbedingung.

Zunächst wurden Rohmodelle berechnet, welche die Schlafparameter als Kriteriumsvariable und die Bedingung (Kontrolle, Low-Boom, Mach-Cut-off) als festen Einfluss-Faktor enthielten. Für Parameter, deren Residuen nicht vollends normalverteilt waren, wurden robuste Standardfehler berechnet. Robuste Standardfehler können immer dann verwendet werden, wenn Unsicherheit über die Verteilung der Residuen besteht. Wenn die Nicht-Normalverteilung der Residuen nicht zu gravierend ist oder wenn die Stichprobengröße groß ist, können sie selbst dann noch zuverlässige Ergebnisse liefern, da sie weniger anfällig für Ausreißer und Verletzungen der Normalverteilungsannahme sind. Die Kontrollbedingung wurde als Referenz für die beiden Lärmbedingungen herangezogen. Wenn sich eine der beiden Lärmbedingungen signifikant von der Kontrollbedingung unterschied, wurden anschließend paarweise post-hoc-Vergleiche mit Bonferroni-Holm-Korrektur für multiples Testen berechnet. In einem weiteren Schritt wurden diesen Modellen die folgenden potentiellen nicht-akustischen Kovariablen hinzugefügt, um zu prüfen, ob ein Zusammenhang mit dem jeweiligen Kriterium besteht und dadurch zusätzlich ein bedeutsamer Varianzanteil erklärt werden kann: Geschlecht, Alter, Untersuchungsgruppe (A: Low-Boom/Mach-Cut-off vs. B: Mach-Cut-off/Low-Boom), Bettliegezeit (früh: 22 bis 6 Uhr vs. spät: 23 bis 7 Uhr) und selbst eingeschätzte Ein- und Durchschlafschwierigkeiten durch die Polysomnographie und/oder der Laborumgebung (*Schlafstörung durch Setting*: ja vs. nein). Bei einem signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) der Prädiktorvariable mit der Kriteriumsvariable und einer Reduzierung des Akaike Information Criterion (AIC) wurde davon ausgegangen, dass die hinzugenommenen Faktoren die Modellgüte verbessern, da sie über inkrementelle Validität verfügen (Fabozzi et al. 2014). Das AIC sagt nichts über die absolute Qualität eines Modells aus, sondern über die Qualität in Relation zu anderen Modellen. Da das AIC die Menge an verlorengegangener Information schätzt, deutet ein niedriger Wert im Vergleich zum vorherigen Wert auf eine bessere Modellgüte. Eine Reduzierung des AIC um zwei Punkte wurde in Anlehnung an den Leitfaden nach Fabozzi et al. (2014) als das Modell mit der besseren Modellgüte interpretiert.

Um zu überprüfen, ob sich die Schlafparameter mit zunehmender Dauer im Labor veränderten, wurden zudem LMM mit den Studientagen (1 bis 3) anstelle der Bedingung als unabhängige Variable erstellt.

Zusätzlich wurden mittels Pearson-Korrelation folgende potentielle Zusammenhänge der elektrophysiologisch gemessenen und der selbst eingeschätzten Schlafparameter untersucht:

- ▶ Schlaffeffizienz und selbst eingeschätzte Schlafqualität
- ▶ SOL und selbst eingeschätzte Einschlafdauer

3.4.2 EEG-Spektralanalyse

Die EEGs der C3/A2- und C4/A1-Ableitungen wurden einer Spektralanalyse, basierend auf einer Fast-Fourier-Transform (FFT) Routine, unterzogen. Ziel dieser quantitativen Analyse war es, zu testen, ob die Überschallknall-Signaturen Veränderungen des Schlaf-EEG bewirken, welche eventuell durch die weniger sensitive Methode der Schlafstadienanalyse (Makroparameter) unentdeckt bleiben könnten. So könnte es sein, dass die Überschallknall-Signaturen zwar die Dauer des Tiefschlafs (SWS) nicht signifikant vermindern, aber die spektrale Leistungsdichte des EEGs im Frequenzbereich der Deltawellen ($\sim 0,75 - 4,0$ Hz) im NREMS herabsetzen und somit eine leichte „Enttiefung“ des Schlafs bewirken.

Spektrale EEG-Leistungsdichtespektren wurden für 4-Sekunden-Abschnitte (Subepochen), die jeweils um 3 Sekunden versetzt waren, berechnet, wobei ein Hanning-Fenster angewendet wurde. Hoch- und Tief-Frequenz-Artefakte wurden automatisch auf der Basis eines gleitenden Mittels ausgeschlossen. Die übriggebliebenen 4-Sekunden-Subepochen wurden gemittelt, so

dass mittlere 30-Sekunden Leistungsdichtespektren mit einer Frequenzauflösung von 0,5 Hz resultierten, welche sich mit den Epochen der Schlafstadien deckten. Schließlich wurde über alle NREMS-Epochen pro Nacht gemittelt und Differenzspektren berechnet, wobei die spektrale Leistungsdichte pro 0,5-Hz Bin in jeder der beiden Überschallknall-Bedingungen als Prozent der Kontrollbedingung bestimmt wurde. Ein LMM mit den Faktoren *Bedingung* und *EEG-Frequenz* wurde für die logarithmierten absoluten Leistungsdichten erstellt.

3.4.3 Ereignisbezogene Analysen

Die Einspielung der Akustikdateien zur vollen Minute und die synchrone Aufzeichnung der elektrophysiologischen Daten, ermöglichte die Herstellung eines zeitlichen Zusammenhangs zwischen einem Lärmereignis und der Reaktion einer Versuchsperson im Schlaf. Da die Kontrollbedingung als Referenz dienen sollte, wurden für die Analysen zu den gleichen Zeitpunkten Lärmereignisse supponiert, zu denen diese in den beiden Lärmbedingungen eingespielt wurden. D.h. die Analysen der Kontrollbedingung beziehen sich auf die spontanen Reaktionen (Aufwachereignisse, Arousals, Schlaf-Enttiefungen, Veränderungen im EEG-Spektrum), die nach supponierten Lärmereignissen auftraten.

3.4.3.1 Aufwachereignisse

Im Zentrum der Schlafstudie stand die ereignisbezogene Analyse der Aufwachereignisse und die Quantifizierung der lärminduzierten Aufwach-Rate. Für die ereignisbezogene Analyse der Aufwachereignisse wurde die Rate quantifiziert, mit der innerhalb der SPT unmittelbar nach einem Lärmereignis ein Aufwachereignis, d. h. einen Übergang von einem Schlafstadium in Stadium Wach oder S1, aufgetreten ist. Ein lärmassoziiertes Aufwachereignis wurde als Wechsel vom Stadium S2, S3, S4 oder REM zu S1 oder Wach innerhalb eines bestimmten Zeitfensters (Screening-Fenster) nach Beginn eines Lärmereignisses definiert. Der Vorteil von Laborstudien im Vergleich zu Feldstudien ist die kontrollierte Darbietung von Lärmereignissen. Da die Lärmereignisse immer zur vollen Minute und damit zu Beginn einer Epoche eingespielt wurden und nur 0,26 Sekunden lang waren, konnte für die Auswertung ein einfacher Ansatz gewählt werden, bei dem das Screening-Fenster aus der nach dem Lärmereignis folgenden Epoche (30 Sekunden) bestand.

Für die ereignisbezogene Analyse der Aufwachereignisse wurden die folgenden Regeln angewandt:

- ▶ Für jedes Lärmereignis wurde festgehalten, ob in der darauffolgenden Epoche ein Wechsel zu S1 oder wach stattfand (1) oder nicht (0).
- ▶ Die Betrachtung der Aufwachereignisse erfolgte ab Schlafbeginn (erstes Auftreten von S2, S3, S4 oder REM).
- ▶ Lärmereignisse wurden ausgeschlossen, wenn die Referenz-Epoche (Epoche vor dem Lärmereignis) als „wach“, „S1“ oder „Bewegung“ gescort wurde oder keine Information zum Schlafstadium vorlag, d. h. Lärmereignisse wurden eingeschlossen, wenn die Referenzepoche als „S2“, „S3“, „S4“ oder „REM“ gescort wurde.

Für die ereignisbezogene Analyse der Aufwachereignisse wurde zunächst die relative prozentuale Rate für die lärmassoziierten Aufwachereignisse jeder Versuchsperson über die drei Bedingungen bestimmt, d. h. die Aufwach-Rate wurde in Relation zu den (für die Kontrollbedingung supponierten) Lärmereignissen berechnet, die auftraten während sich die jeweilige Versuchsperson im Stadium S2, S3, S4 oder REM befand. Die Daten wurden mittels LMM mit Random Intercept analysiert. Da keine Normalverteilung der Residuen vorlag, wurden robuste Standardfehler berechnet. Das Modell enthielt die lärmassoziierten Aufwachereignisse

als Kriteriumsvariable und die Bedingung als festen Einfluss-Faktor. Anschließend wurden für dieses Rohmodell paarweise Vergleiche (post-hoc t-Tests mit Bonferroni-Holm-Korrektur) durchgeführt, wenn sich eine der beiden Lärmbedingungen signifikant von der Kontrollbedingung unterschied.

Anschließend wurde unter Verwendung von generalisierten linearen gemischten Modellen (GLMM) mit binärem Outcome, logit-Linkfunktion und Random Intercept ein Vorhersagemodell abgeleitet. Der binären Outcome-Variable des Modells wurde der Wert 1 zugeordnet, wenn nach einem Lärmereignis ein Aufwachereignis auftrat, und der Wert 0 wenn kein Aufwachereignis auftrat. Die Auswahl der finalen Prädiktoren wurde durch eine schrittweise Vorwärtsselektion auf der Grundlage des Akaike Information Criterion (AIC) durchgeführt. Anhand des AIC wurde bestimmt, ob sich das Modell durch die Hinzunahme weiterer Faktoren verbessert. Da eine starke Kolinearität (Pearson-Korrelation $> 0,7$) zwischen der verstrichenen Schlafzeit und der Anzahl der Lärmereignisse vor dem jeweiligen Lärmereignis vorlag, wurde darauf geachtet, dass diese beiden potentiellen Prädiktoren nicht zusammen in einem Modell selektiert wurden. Die folgenden potentiell varianzaufklärenden Prädiktoren wurden für die Modellfindung berücksichtigt: (1) Bedingung, (2) die Anzahl der Lärmereignisse, die zwischen Schlafbeginn und dem jeweiligen Lärmereignis auftraten, (3) das Schlafstadium in der (Referenz-)Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis (Stadien S3 und S4 wurden als SWS kombiniert; Stadium S2 als vorherrschendes Schlafstadium in der Nacht wurde als Referenzgruppe definiert), (4) die verstrichene Schlafzeit zwischen Schlafbeginn und dem jeweiligen Lärmereignis exklusive Wachliegezeit, (5) das Alter der Versuchspersonen, (6) das Geschlecht der Versuchspersonen. Da das Schlafstadium in der (Referenz-)Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis in bisherigen Lärmwirkungsstudien oft eine signifikante Rolle bei der lärmassozierten Aufwach-Rate gespielt hat (Basner, Isermann & Samel 2006; Bartels et al. 2021), wurde bei der Variablenselektion festgelegt, dass dieser Prädiktor zusätzlich zu der Bedingung im Modell enthalten sein soll. Das Schlafstadium in der (Referenz-)Epoche vor dem Lärmereignis wurde als Indikatorvariable definiert, mit dem Schlafstadium S2 als Referenz. Die p-Werte wurden nicht im traditionellen Kontext der Hypothesentestung betrachtet, sondern als Indikatoren für die relative Bedeutung (Harrell 2015; Hosmer Lemeshow, Sturdivant 2013). Es wurde dennoch darauf geachtet, dass signifikante Prädiktoren nicht ausselektiert wurden. Um die Interpretation der Ergebnisse zu ergänzen, wurden Odds Ratios (OR) als Maß für die Effektgröße berechnet. Vor der schrittweisen Analyse wurde das Vorhandensein nichtlinearer Effekte überprüft. Dies geschah anhand von separaten univariablen Modellen, die nichtlineare Terme aus der Gruppe der fraktionalen Polynome von Grad 1 und 2 enthielten. Für jeden Prädiktor wurde dann das Modell mit dem geringsten AIC ausgewählt. Entsprechend der Resultate wurde die einfache lineare Funktion für alle Variablen ausgewählt und in das schrittweise Selektionsverfahren einbezogen. Zur Berücksichtigung potenzieller Interaktionen zwischen den Prädiktoren wurde abschließend geprüft, ob sich die Modellgüte durch die Aufnahme von Zwei-Wege-Interaktionen signifikant verbessern ließ.

Es wird zwischen lärmassozierten Aufwachereignissen und lärminduzierten Aufwachreaktionen unterschieden, da Aufwachereignisse direkte Reaktionen auf Lärm sein können (Basner, Griefahn & van den Berg 2010), aber auch mehrfach spontan im Laufe der Nacht auftreten. Die Rate für die lärmassozierte Aufwachereignisse ergab sich aus den Aufwachereignissen, die innerhalb der ersten Epoche nach einem Lärmereignis auftraten und wurde zunächst für jede Versuchspersonen berechnet und anschließend über alle Versuchspersonen akkumuliert. Die Rate für die lärminduzierten Aufwachreaktionen der beiden Lärmbedingungen wurde zunächst für jede Versuchsperson als Differenz zur Rate der jeweiligen spontanen Aufwachereignisse anhand der supponierten Lärmereignisse in der Kontrollbedingung berechnet und anschließend über alle Versuchspersonen akkumuliert.

3.4.3.2 Arousals

Da das Ausmaß der möglichen Beeinträchtigungen des Schlafs durch diese neuartigen Überschallknall-Ereignisse nicht bekannt war, wurde zur Detektion niederschwelliger Störungen des Schlafs eine Quantifizierung von Arousals durchgeführt. Sie treten spontan 3 bis 4 Mal häufiger auf als Aufwachereignisse. Arousals sind kürzere Aktivierungen im EEG und EMG, die nicht als Aufwachereignisse (≥ 15 Sekunden) klassifiziert werden. Arousals werden nach standardisierten Kriterien geskort: Ein Arousal während der Schlafstadien S1, S2, SWS oder REM ist als solches zu scoren, falls es zu einem plötzlichen Wechsel der EEG-Frequenz kommt (Alpha-, Theta- und/oder Frequenzen schneller als 16 Hz, jedoch keine Spindeln), falls diese mindestens 3 Sekunden andauern und mindestens 10 Sekunden Schlaf vorausgegangen sind. Ein Arousal im REM-Schlaf ist als solches zu scoren, falls im submentalen EEG eine mindestens 1 Sekunde andauernde Muskeltonuserhöhung nachweisbar ist (Berry et al. 2020). Für Arousals, die in Folge eines Lärmereignisses auftreten, wird vermutet, dass die damit einhergehenden kardialen Aktivierungen bei langfristiger Lärmbelastung das Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen erhöhen können (Muzet 2007; Babisch 2006). Arousals stellen eine Störung des Schlafs dar, die nicht zwingend zum Aufwachen führt, trotzdem aber den Erholungswert des Schlafs vermindern kann.

Für die ereignisbezogene Analyse der Arousals wurden die folgenden Regeln in Analogie zu denen für die Aufwachereignisse angewandt:

- ▶ Für jedes Lärmereignis wurde festgehalten, ob in der darauffolgenden Epoche ein Arousal stattfand (1) oder nicht (0).
- ▶ Die Betrachtung der Arousals erfolgte ab Schlafbeginn (erstes Auftreten von S2, S3, S4 oder REM).
- ▶ Lärmereignisse wurden ausgeschlossen, wenn die Referenz-Epoche als „wach“, „S1“ oder „Bewegung“ geskort wurde oder keine Information zum Schlafstadium vorlag, d. h. Lärmereignisse wurden eingeschlossen, wenn die Referenzeпоche als „S2“, „S3“, „S4“ oder „REM“ geskort wurde.

Ebenso wie für die Aufwachereignisse wurde zunächst die relative prozentuale Rate für die lärmassoziierten Arousals jeder Versuchsperson über die drei Bedingungen bestimmt, d. h. die Arousal-Rate wurde in Relation zu den Lärmereignissen berechnet, die nach Schlafbeginn im Stadium S2, S3, S4 oder REM auftraten. Die Daten wurden ebenfalls mittels LMM mit Random Intercept und robusten Standardfehlern berechnet. Auch hier wurden paarweise post-hoc-Vergleiche mit Bonferroni-Holm-Korrektur für multiples Testen berechnet, wenn sich eine der beiden Lärmbedingungen signifikant von der Kontrollbedingung unterschied.

Anschließend wurde mit der gleichen Methode wie die für die Aufwachereignisse mittels GLMM ein Vorhersagemodell abgeleitet (Details in Abschnitt 3.4.3.1). Auch hier wurde die Rate für die lärminduzierten Arousals bestimmt, in dem diese zunächst für jede Versuchsperson als Differenz zur Rate der jeweiligen spontanen Arousals anhand der supponierten Lärmereignisse in der Kontrollbedingung berechnet und anschließend über alle Versuchspersonen akkumuliert wurde.

3.4.3.3 Schlaf-Enttiefungen

Analog zu den Aufwachereignissen und Arousals wurde die ereignisbezogene Analyse für Schlaf-Enttiefung durchgeführt. Dazu wurden die Übergänge von tieferen in oberflächlichere Schlafstadien analysiert und folgende Regeln angewandt:

- ▶ Für jedes Lärmereignis wurde festgehalten, ob in der darauffolgenden Epoche ein Wechsel von S4 zu S3, S2 oder REM oder von S3 zu S2 oder REM stattfand (1) oder nicht (0).
- ▶ Die Betrachtung der Schlaf-Enttiefungen erfolgte ab Schlafbeginn (erstes Auftreten von S2, S3, S4 oder REM).
- ▶ Lärmereignisse wurden ausgeschlossen, wenn die Referenz-Epoche als „REM“, „S2“, „S1“, „wach“ oder Bewegung gescort wurde oder keine Information zum Schlafstadium vorlag, d. h. Lärmereignisse wurden nur dann eingeschlossen, wenn die Referenzeпоche als S3 oder S4 gescort wurde.

Auch hier wurde die relative prozentuale Rate für die lärmassoziierten Schlaf-Enttiefungen jeder Versuchsperson über die drei Bedingungen bestimmt, d. h. die Rate wurde in Relation zu den Lärmereignissen berechnet, die auftraten, während sich die jeweilige Versuchsperson im Stadium S3 oder S4 befand. Die Daten wurden mittels LMM mit Random Intercept und robusten Standardfehlern analysiert. Zudem wurde die Rate für die lärminduzierten Schlaf-Enttiefungen bestimmt.

3.4.3.4 Veränderungen im EEG-Spektrum

Um weiter zu untersuchen, ob die Überschallknall-Signaturen zu einer kurzzeitigen Enttiefung des NREMS führen, wurden die EEG-Leistungsdichtespektren herangezogen. Eine unmittelbare (instantane) Störung des NREMS müsste sich in einer Abnahme der EEG-Leistungsdichte im Delta-Bereich (0,75-4,0 Hz) und eine Zunahme im Beta-Bereich (16.25-25.0 Hz) manifestieren. Um dies zu testen, wurden die Leistungsdichtespektren in der Minute nach einem Lärmereignis als prozentuale Abweichungen vom Spektrum in der Minute vor dem Lärmereignis dargestellt. In der Kontrollbedingung wurden den Lärmereignissen entsprechenden Zeitpunkte gewählt. Zur Analyse der relativen Veränderung der spektralen Leistungsdichte nach den Lärmereignissen wurde ein GLMM mit Identitäts-Linkfunktion geschätzt. Die abhängige Variable war die prozentuale Änderung nach einem Lärmereignis. Paarweise Bedingungsvergleiche (Kontrolle, Low-Boom, Mach-Cut-off) wurden mittels geschätzter marginaler Mittelwerte für das Delta-Band und das Beta-Band durchgeführt und die p-Werte FDR-korrigiert (Benjamini-Hochberg-Adjustierung).

3.5 Methode zur Messung der physiologischen Reaktionen im Wachzustand

Schreckreaktionen auf intensive externe Reize wie einem Überschallknall äußern sich in kardiovaskulären Reaktionen wie der Herzratenbeschleunigung, Herzratenvariabilität oder dem Blutdruck. Zur Erfassung etwaiger Schreckreaktionen wurden jeden Morgen eine nicht-invasive Messung des Blutdrucks, eine Aufzeichnung des Elektrokardiogramms, des Elektroenzephalogramms und der Fingerpulsamplitude bei den Versuchspersonen durchgeführt. Die benötigten Elektroden und Geräte wurden aus der vorangegangenen nächtlichen Polysomnographie anbehalten. Zudem wurde bei einem zufällig ausgewählten Subsample der kontinuierliche Blutdruck mittels Finapres NOVA gemessen. Um auch hier die ereignisbezogene Auswertung der Daten zu gewährleisten, wurde die Uhrzeit dieser Geräte mit der des Computers zur Akustikeinspielung synchronisiert. Die Messung erfolgte an jedem Morgen 30 Minuten nach dem Wecken für 13,5 Minuten in Ruhe (Kontrolle). Die Versuchspersonen wurden gebeten während dieser Zeit ruhig auf ihrem Bett zu sitzen und keiner Beschäftigung nachzugehen. Am dritten Morgen wurde die Messung zusätzlich für jeweils 13,5 Minuten unter den Überschallknall-Bedingungen (Low-Boom, Mach-Cut-off) durchgeführt.

3.5.1.1 Herzratenvariabilität

Die Herzratenvariabilität (HRV) beschreibt Veränderungen der Zeitintervalle zwischen aufeinanderfolgenden Herzschlägen, den sogenannten Interbeat-Intervallen (IBIs). Die HRV ist Bestandteil interdependenter Regulationssysteme, die bei der Anpassung an umweltbedingte und psychologische Herausforderungen helfen. Sie steht im Wesentlichen unter der Kontrolle des autonomen Nervensystems. Dabei regulieren das sympathische (SNS) und das parasympathische Nervensystem (PNS) als Gegenspieler die Herzrate. Während die PNS-Aktivität typischerweise die Herzrate senkt und die HRV erhöht, neigt die SNS-Aktivität dazu, die Herzrate zu erhöhen und die HRV zu senken. So ist die Herzrate in Ruhe- und Erholungsphasen am niedrigsten und die HRV am höchsten, wenn die parasympathische Aktivierung am stärksten ist. Umgekehrt steigt unter Stress, wenn die SNS-Aktivität erhöht ist, die Herzrate und die HRV sinkt (Kubios 2025). Diese Regulation ermöglicht dem Körper eine schnelle Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen. Eine hohe HRV ist demnach mit Gesundheit, Selbstregulationsfähigkeit sowie Anpassungsfähigkeit und Resilienz verbunden (Shaffer & Ginsberg 2017), während eine geringe, aber auch eine ungewöhnlich hohe HRV mit einigen kardiovaskulären Erkrankungen assoziiert ist (Thayer, Yamamoto, Brosschot 2010). Für die Ableitung einiger HRV-Parameter ist eine Messung von mindestens 5 Minuten erforderlich. Die kontinuierliche Messung des EKGs mittels Polysomnographie über 13,5 Minuten ermöglichte die Ableitung dieser Parameter. Mittels der Kubios-HRV Premium Software (Version 4.1.2.1) wurden für diesen Messzeitraum die HRV-Parameter abgeleitet.

In Anlehnung an bisherige Studien (z. B. Cai et al. 2022, Veternik et al. 2018, Manohare et al. 2022), in denen die Wirkung von Lärm auf die HRV untersucht wurde, wurden die folgenden Parameter ausgewählt:

Zeitbezogene Parameter

- ▶ Gemittelttes RR-Intervall oder Interbeat-Intervall (IBI) = Mittelwert der Zeitintervalle zwischen zwei Herzschlägen bzw. zwischen zwei R-Zacken im EKG (positive Ausschläge, die die Depolarisation der Herzkammern darstellen) in ms
- ▶ SDNN = Standardabweichungen der NN-Intervalle (N = Normal bzw. um abnorme Schläge bereinigte RR-Intervalle) in ms; spiegelt die allgemeine (sowohl kurzfristige als auch langfristige) Variabilität innerhalb der RR-Intervalle wider; ein geringer Wert bedeutet, dass die Herzratenvariabilität gering ist (Shaffer & Ginsberg 2017)
- ▶ RMSSD = Quadratwurzel der mittleren quadrierten Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden RR-Intervallen in ms; Maß für die kurzfristige Variabilität innerhalb der RR-Intervalle; ein geringer Wert bedeutet, dass die Herzratenvariabilität gering ist

Frequenzbezogene Parameter

Durch Messungen im Frequenzbereich wird die Verteilung der absoluten oder relativen Power geschätzt (Shaffer & Ginsberg 2017).

- ▶ VLF = Absolute Power im sehr niedrigen Frequenzband (0 - 0,04 Hz) in ms^2 ; reflektiert sympathische Aktivität; ein niedriger Wert kann auf Stress hindeuten
- ▶ LF = Absolute Power im niedrigen Frequenzband (0,04 - 0,15 Hz) in ms^2 ; Indikator für Barorezeptor-Aktivität (Regulierung des Blutdrucks) unter Ruhebedingungen; reflektiert parasympathische und sympathische Aktivität, wobei der Sympathikus überwiegt; ein hoher Wert kann auf Stress hinweisen

- ▶ HF = Absolute Power im hohen Frequenzband (0,15 - 0,4 Hz) in ms²; reflektiert parasympathische Aktivität; ein niedriger Wert kann auf Stress hindeuten
- ▶ LF/HF-Ratio = Verhältnis zwischen LF und HF in %; ein niedriger Wert reflektiert parasympathische Dominanz und entspricht Entspannung, ein hoher Wert reflektiert sympathische Dominanz und kann auf Stress hindeuten

Zur Korrektur von Artefakten wurde die automatische Korrektur der Kubios-Software verwendet, bei der Artefakte aus einer Zeitreihe erkannt werden, die aus Unterschieden zwischen aufeinanderfolgenden RR-Intervallen besteht. Die Datenqualität erlaubte die Auswertung von insgesamt 36 Versuchspersonen. Da bei allen Parametern, außer bei dem gemittelten RR-Intervall keine Normalverteilung der Residuen gegeben war, wurde anhand LMM mit robusten Standardfehlern bestimmt, ob es einen Effekt der Bedingung auf die HRV-Parametern gab. Als Sensitivitäts-Analyse wurde zusätzlich geprüft, ob die Modelle mit mathematisch transformierten Parametern (Tabelle 7) und damit einhergehender Normalverteilung der Residuen einen Effekt der Bedingung zeigten.

Tabelle 7: Mathematische Transformationen der HRV-Parameter

HRV-Parameter	Art der Transformation
Gemittelttes RR-Intervall	Keine Transformation
SDNN VLF LF HF LF/HF-Ratio	Transformation mittels Logarithmus naturalis $\ln x$
RMSSD	Transformation mittels Wurzelfunktion \sqrt{x}

3.5.1.2 Herzrate

Um die Betrachtung der HRV als Makroparameter über die gesamte Messung am Morgen zu ergänzen, wurde eine ereigniskorrelierte Analyse der Herzrate durchgeführt. Aufbereitet wurden die Daten mittels eines DLR-eigenen Programms, mit dem die Herzrate auch für kürzere Intervalle (< 20 Sekunden) abgeleitet werden kann. Da laut Eder, Elam und Wallin (2009) Reize, die kürzer als 250 ms sind, zu einer sofortigen Beschleunigung und anschließenden Verlangsamung der Herzrate führen, die innerhalb von 10 Sekunden abklingt, wurde die Differenz aus der gemittelten Herzrate 10 Sekunden vor dem Lärmereignis und 10 Sekunden ab dem Lärmereignis berechnet. Zur Korrektur von Artefakten wurden bpm-Werte < 30 bpm und > 120 bpm ausgeschlossen (Basner, Müller & Elmenhorst 2011). Die gemittelte Herzrate über das Intervall von 10 Sekunden vor dem Lärmereignis wurde als Baseline herangezogen. Da erwartet wurde, dass die Herzrate mit einem Lärmereignis ansteigen würde, wurde für die Berechnung der relativen prozentualen Differenzen die Herzrate der Baseline von der über die 10 Sekunden ab dem Lärmereignis gemittelte Herzrate subtrahiert. Positive Differenz-Werte entsprechen demnach einem Anstieg der Herzrate ab einem Lärmereignis im Vergleich zur Baseline, während negative Werte bedeuten, dass die Herzrate in der Baseline höher war. Anschließend wurde ein LMM mit Random Intercept und der Bedingung als Faktor gerechnet. Da die Residuen der relativen Differenzen nur annähernd normal verteilt waren, wurde ein LMM mit robusten Standardfehlern berechnet. Die angewandten mathematischen Transformationen (Quadratwurzel, Logarithmus naturalis, Box-Cox) führten nicht zur Normalverteilung. Anschließend wurden paarweise post-hoc-Vergleiche mit Bonferroni-Holm-Korrektur für

multiples Testen berechnet, wenn sich eine der beiden Lärmbedingungen signifikant von der Kontrollbedingung unterschied.

3.5.1.3 Blutdruck

Zur Messung des Blutdrucks wurde das Finapres NOVA (Finapres Medical Systems) verwendet, welches eine kontinuierliche nicht-invasive Messung mittels einer Finger-Manschette ermöglichte (Abbildung 29). Es handelt sich dabei um ein hämodynamisches System, das den Blutfluss und -druck bei jedem Herzschlag misst und so die Berechnung des Widerstands in den Blutgefäßen ermöglicht. Die Messung erfolgte nach manuellem Start des Gerätes automatisch bis zur manuellen Beendigung der Messung. Das Subsample bestand insgesamt aus 22 Versuchspersonen. Die Datenqualität erlaubte die Auswertung der Daten von 21 Versuchspersonen. Mittels einer DLR-eigenen Software (PhysioPy) wurden die Blutdruckdaten aufbereitet und Artefakte entfernt. Dafür wurde der Mittelwert über das Zeitintervall jeweils 30 Sekunden vor jedem Lärmereignis, zunächst für jede Versuchsperson und anschließend für jede Bedingung, berechnet (= Pre-Messung). Dann wurde jeder gemessene Wert innerhalb von 30 Sekunden nach dem jeweiligen Lärmereignis verwendet, um die relative prozentuale Differenz, zunächst für jede Versuchsperson und anschließend für jede Bedingung, zu berechnen. Es wurde ein LMM mit Random Intercept und der Bedingung als Faktor gerechnet. Die Residuen der relativen Differenzen waren normal verteilt.

Abbildung 29: Kontinuierliche nicht-invasive Blutdruckmessung mittels Finger-Manschette des Finapres NOVA



Anmerkung: Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.6 Methode zur Messung der subjektiven Beurteilung

3.6.1 Fragebögen

Tabelle 8 gibt einen Überblick über alle Fragebögen und Skalen, die in der Schlafstudie eingesetzt wurden.

Tabelle 8: Fragebögen und Skalen

Eingangsfragebogen Am ersten Abend nach Einzug ins Labor	Abendfragebogen Jeden Abend 20 Minuten vor dem Zubettgehen	Morgenfragebogen Jeden Morgen 30 Minuten nach dem Aufstehen	Abschlussfragebogen Am letzten Morgen vor Auszug aus dem Labor
Subjektive Schlafqualität der letzten 4 Wochen (PSQI)	Momentane Schläfrigkeit (KSS)	KSS	Soziodemografische Daten
Chronotyp	Momentane Empfindungen und Gefühle (PANAS)	PANAS	Lärmempfindlichkeit (LEF-K)
Generelle Gewöhnungsfähigkeit an Lärm	geistige, zeitliche und körperliche Belastung sowie Ausgeruhtheit, Konzentrations- und Leistungsfähigkeit über den Tag	Subjektive Schlafqualität der letzten Nacht	Lärmempfindlichkeit bei impulshaltigen Geräuschen (LFN)
Kontroll- und Copingfähigkeit in Bezug auf Lärm	Belastende Ereignisse	Einschlafdauer	Lärmempfindlichkeit bei niedrigfrequenten Geräuschen (IN)
		Ein- und Durchschlafschwierigkeiten	Studienbewertung (Versuchspersonenbetreuung, Terminierung und weitere)
		Kurzzeit-Belästigung	Vermutung über Art des Geräuschs
		Schlafstörung durch Setting und Lärm	Debriefing
			Einstellung gegenüber zivilen Überschallflugzeugen

3.6.1.1 Eingangsfragebogen

Der Eingangsfragebogen wurde am ersten Abend kurz nach dem Einzug im Schlaflabor von den Versuchspersonen ausgefüllt. In diesem Fragebogen wurde mittels des Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI, Buysse et al. 1989) retrospektiv die Einschätzung der Schlafqualität, die Häufigkeit schlafstörender Ereignisse, die gewöhnlichen Schlafzeiten, Einschlafzeit und Schlafdauer, die Einnahme von Schlafmedikationen, sowie die Tagesmüdigkeit der letzten vier Wochen erfasst. Insgesamt 18 Items werden sieben Komponenten zugeordnet, die jeweils einen Wert von 0 bis 3

annehmen können. Die Komponentenwerte wurden addiert und von 21 (maximaler Gesamtwert) subtrahiert. Dadurch entspricht eine niedrige Ausprägung einer verringerten Schlafqualität und eine hohe Ausprägung einer hohen Schlafqualität. Anhand eines Cut-off-Wertes wurde eine Einteilung in Personen mit „guter“ und „schlechter“ Schlafqualität vorgenommen, wobei ein Wert von ≤ 5 für eine „gute“ Schlafqualität steht.

Zur Erfassung des Chronotyps erhielten die Versuchspersonen eine beispielhafte Beschreibung des Spättyps sowie des Frühtyps und wurden anschließend gefragt, ob sie sich selbst als extremem Frühtyp, moderaten Frühtyp, leichten Frühtyp, Normaltyp/Zwischentyp, leichten Spättyp, moderaten Spättyp oder extremen Spättyp einordnen. Dieses Item wurde modifiziert nach Roenneberg et al. (2003). Des Weiteren sollten die Versuchspersonen anhand einer 5-stufigen Skala (1 = „nicht“ bis 5 = „sehr“) angeben, wie gut sie sich grundsätzlich an Umgebungslärm gewöhnen können (Gewöhnungsfähigkeit). Sechs Items nach Guski et al. (1978) wurden adaptiert um die selbstberichtete, allgemeine Kontroll- und Copingfähigkeit in Bezug auf Umgebungslärm mittels 5-Punkte-Skalen (1 = „stimmt nicht“ bis 5 = „stimmt sehr“) zu erfassen. Die Items beziehen sich auf die individuellen kognitiven und verhaltensbezogenen Strategien und Kapazitäten um Lärmsituationen zu bewältigen. Die Werte der sechs Items wurden zu einem Index aufaddiert (Wertebereich zwischen 6 und 60). Niedrige Werte entsprechen demnach einer geringen Fähigkeit und hohe Werte einer hohen Fähigkeit Lärmsituationen zu bewältigen.

3.6.1.2 Abendfragebogen

Der Abendfragebogen wurde jeden Abend 20 Minuten vor dem Zubettgehen von den Versuchspersonen bearbeitet. Zur Erfassung der momentanen Schläfrigkeit wurde die Karolinska Sleepiness Scale (KSS, Akerstedt & Gillberg 1990) eingesetzt. Diese misst die subjektive Schläfrigkeit anhand einer 9-stufigen Skala mit einer Abstufung von 1 = „sehr wach“ bis 9 = „sehr schläfrig“. Die Auswertung der KSS erfolgt über das Antwortformat der Skala. Dementsprechend weisen Werte > 7 auf eine hohe Schläfrigkeit und Werte < 4 auf eine geringe Schläfrigkeit hin.

Ebenfalls durch den Abendfragebogen erfasst wurden die momentanen Empfindungen und Gefühle anhand der Deutschen Version der Positive and Negative Affect Schedule (PANAS, Krohne et al. 1996). Der Fragebogen besteht aus 20 Adjektiven von denen jeweils 10 die Dimensionen Positiver Affekt (PA) und Negativer Affekt (NA) abdecken. Jedes Item wird anhand einer 5-stufigen Skala beantwortet (1 = „gar nicht“ bis 5 = „äußerst“). Für jede der beiden Dimensionen wurden Mittelwerte berechnet. Höhere Werte der Dimension PA repräsentieren ein größeres Ausmaß positiven Affekts. Höhere Werte der Dimension NA repräsentieren ein größeres Ausmaß negativen Affekts. Die beiden Dimensionen werden dabei nicht als entgegengesetzte Pole betrachtet, sondern als diskriminierbare Dimensionen desselben Konstrukts. Während die Dimension PA einen enthusiastischen, aktiven und wachen Zustand bezeichnet, beschreibt die Dimension NA das Ausmaß negativer Anspannung durch Niedergeschlagenheit, Ärger und Angst (Watson, Clark, & Tellegen 1988). Während für PA Zusammenhänge mit sozialer Aktivität, Zufriedenheit und der Anzahl angenehmer Ereignisse gefunden wurden, wurden für NA Korrelationen mit Stress, Gesundheitsproblemen und der Anzahl unangenehmer Ereignisse festgestellt (Watson, Clark, & Tellegen 1988).

Die geistige, zeitliche und körperliche Belastung über den Tag wurde von den Versuchspersonen anhand drei 11-stufiger Rating-Skalen (0 = „niedrige Belastung“ bis 10 = „hohe Belastung“) ebenfalls im Rahmen des Abendfragebogens eingeschätzt. Darüber hinaus wurde die folgende Frage eingesetzt, um etwaige belastende Ereignisse zu erfassen: „Gab es heute etwas oder steht in naher Zukunft etwas an, das Sie momentan sehr aufwühlt, belastet oder besonders beschäftigt?“. Anhand einer 5-stufigen Skala (1 = „nicht“ bis 5 = „sehr“) konnten die

Versuchspersonen dann angeben, wie sehr sie dieses Ereignis in diesem Moment beschäftigt. Sowohl die geistige, zeitliche und körperliche Belastung über den Tag als auch die etwaigen belastenden Ereignisse wurden für die Betrachtung als Kovariaten zur Vorhersage der subjektiven Schlafeinschätzungen erhoben. Zudem wurden zwei Items eingesetzt, welche die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit (0 = „gut“ bis 10 = „eingeschränkt“) erfassten und ein weiteres Item, welches erfragte, wie ausgeruht sich die Versuchspersonen während des vergangenen Tages gefühlt haben (0 = „sehr“ bis 10 = „überhaupt nicht“). Diese Items dienten als ergänzende Variablen, um zu prüfen ob und wie stark sich die Lärmbelastung und selbst eingeschätzte Schlafqualität auf die subjektive Leistungsfähigkeit am Tage auswirkte.

3.6.1.3 Morgenfragebogen

An jedem Morgen 30 Minuten nach dem Aufstehen füllten die Versuchspersonen den Morgenfragebogen aus. Die Karenzzeit von 30 Minuten wurde eingehalten, um einen Effekt der Schlafrägheit zu vermeiden, der zu Schläfrigkeit, verminderter Kognition und motorischen Beeinträchtigungen führen kann. Im Morgenfragebogen wurde ebenfalls die KSS und die PANAS eingesetzt. Die subjektive Schlafqualität wurde anhand der sechs 11-stufigen Rating-Skalen nach Griefahn, Marks und Robens (2006) erhoben, die sich auf die Schwierigkeit einzuschlafen, Ruhe des Schlafs, Schlaftiefe, Schlafdauer, Schlaferholung und Bewegungshäufigkeit beziehen. Die Antworten werden von 0 bis 10 kodiert, die Werte der einzelnen Skalen addiert und anschließend von 60 (maximaler Gesamtwert) subtrahiert. Die Werte liegen demnach im Bereich zwischen 0 und 60 und niedrige Werte entsprechen einer geringen und hohe Werte einer hohen Schlafqualität. Auch wurden die Versuchspersonen gefragt, wie lange sie zum Einschlafen gebraucht haben und ob sie Einschlafschwierigkeiten hatten. Abschließend gaben die Versuchspersonen ebenfalls anhand einer 11-stufigen Skala (0 = „überhaupt nicht“ bis 10 = „äußerst“) ihre Kurzzeit-Belästigung durch den Umgebungslärm in der vergangenen Nacht an (Fields et al., 2001). Die Versuchspersonen wurden auch gefragt, ob und wodurch sie während der vergangenen Nacht aufgewacht sind und konnten anhand einer Mehrfachauswahl die möglichen Ursachen dafür angeben: Umgebungslärm, Harndrang, Hitze/Kälte, Sorgen/Alptraum, körperliche Beschwerden, Elektroden/Kabel, weiß nicht, andere Ursachen. Die Auswahloption *andere Ursachen* enthielt ein offenes Feld, indem die Versuchspersonen selbst eine Ursache eintragen konnten. Die Antworten, die sich auf Elektroden/Kabel oder die Situation in der fremden Laborumgebung bezogen, wurden zu der Variable *Schlafstörung durch Setting* zusammengefasst. Analog dazu wurden die Antworten, die sich auf den Umgebungslärm bezogen zu der Variable *Schlafstörung durch Lärm* zusammengefasst.

3.6.1.4 Abschlussfragebogen

Am letzten Morgen vor dem Auszug aus dem Schlaflabor füllten die Versuchspersonen den Abschlussfragebogen aus. Mittels dieses Fragebogens wurden folgende soziodemografische Daten der Versuchspersonen erfasst: Alter, Geschlecht, Staatsangehörigkeit und den sozio-ökonomischen Status. Zur Erfassung der generellen Lärmempfindlichkeit wurde ein Kurzfragebogen mit neun Items (LEF-K, Zimmer & Ellermeier 1998) genutzt. Dieser Fragebogen deckt perzeptuelle, affektive, kognitive und verhaltensbezogene Reaktionen in verschiedenen Situationen aus den Bereichen Leistung, allgemeine Einstellung, Schlaf und sozialer Kontext ab. Für jedes Item stehen vier Antwortmöglichkeiten zur Verfügung: stimmt genau, stimmt eher, stimmt eher nicht, stimmt gar nicht. Die Antwortmöglichkeiten werden für die Auswertung von 0 bis 3 kodiert bzw. für 5 Items umkodiert und über einen Summenwert der neun Items zu einem Index zusammengefasst. Der Wertebereich kann demnach zwischen 0 und 27 Punkten liegen. Hohe Werte bedeuten eine hohe Lärmempfindlichkeit. Während der LEF-K laut Zimmer und Ellermeier (1998) eine mittlere interne Konsistenz aufweisen soll, fiel die Konsistenz in unserer Stichprobe niedrig aus (Tabelle 10). Studien zeigen, dass eine generelle

Lärmempfindlichkeit nicht unbedingt mit Empfindlichkeit gegenüber tieffrequenten Geräuschen zusammenhängt (Persson Waye et al. 2001; Pawlaczyk-Luszczynska et al. 2005). Deshalb wurden drei Items zur Erfassung der Empfindlichkeit gegenüber tieffrequenten Geräuschen nach Pawlaczyk-Luszczynska et al. (2005) adaptiert, um zwei weitere selbst entwickelte Items ergänzt und die gleichen Antwortmöglichkeiten wie beim LEF-K genutzt. Anschließend wurden auch hier drei Items umkodiert und ein Index über den Summenwert der fünf Items gebildet (Low Frequency Noise, LFN). Hohe Werte entsprachen wieder einer hohe Lärmempfindlichkeit. Zudem wurden vier Items zur Erfassung der Empfindlichkeit gegenüber impulshaltigen Geräuschen entwickelt, die gleichen Antwortmöglichkeiten genutzt, zwei Items umcodiert und alle Items über den Summenwert zu einem Index zusammengefasst (Impulsive Noise, IN). Auch hier entsprechen demnach hohe Werte einer hohe Lärmempfindlichkeit. Tabelle 9 listet die Items zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit durch tieffrequente und impulshafte Geräusche auf. Die innere Konsistenz des Index IN verbesserte sich deutlich von 0,530 auf 0,712 nach Weglassen des Items „Wenn ich schlafe, kann mich auch ein heftiger Donnerschlag nicht wecken“. Sowohl der Index LFN als auch der Index IN erreichten eine akzeptable interne Konsistenz (Tabelle 10).

Tabelle 9: Items zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit durch tieffrequente (LFN) und impulshafte Geräusche (IN)

Item	Konstrukt	Quelle	Rekodierung
Tiefe Geräusche machen mir Angst.	LFN	DLR	R
Ich finde es unangenehm, wenn der Bass bei Konzerten/in Diskotheken so hoch aufgedreht ist, dass man ihn mit dem ganzen Körper fühlen kann.	LFN	DLR	R
Ich bin unempfindlich gegenüber Lärm mit tiefen Tönen.	LFN	Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2005	
Ich finde selbst leises monotones Brummen (z. B. von einem Transformator) unangenehm.	LFN	Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2005	R
Ich höre gern Musik mit aufgedrehtem Bass.	LFN	Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2005	
Selbst ein lauter Knall kann mich nicht aus der Ruhe bringen.	IN	DLR	
Ich erschrecke mich leicht vor plötzlich auftretenden Geräuschen.	IN	DLR	R
Wenn ich schlafe, kann mich auch ein heftiger Donnerschlag nicht wecken.	IN	DLR	
Ich schrecke hoch, wenn ich Türen knallen höre, auch wenn sie weit entfernt sind.	IN	DLR	R

Anmerkung: R = Rekodierung, LFN = Low Frequency Noise, IN = Impulsive Noise.

Des Weiteren bewerteten die Versuchspersonen die Studie. Dafür wurden die Versuchspersonen nach ihrer Zufriedenheit mit der Terminplanung, Betreuung durch den Versuchsleiter und Versuchsablauf, nach der Angemessenheit der gestellten Fragen und der Aufwandsentschädigung sowie nach der Beanspruchung durch die Studie befragt. Diese Items wurden von den Versuchspersonen mittels einer 5-Stufigen Antwortskala von „nicht“ bis „sehr“ beantwortet. Zudem wurde mittels zwei Ja-Nein-Fragen erhoben, ob sie die Aufklärung vor der Studie ausreichend fanden und ob sie alle ihnen gestellten Fragen verstanden haben. Verbesserungsvorschläge wurden über offene Fragen erfasst. Zuletzt wurde erhoben, wie sie auf die Studie aufmerksam geworden sind.

Vor der Entblindung der Versuchspersonen, die ebenfalls im Rahmen des Abschlussfragebogens durch ein schriftliches Debriefing stattfand, wurde mit einer weiteren offenen Frage erfasst, ob sie eine Vermutung haben, um welches Geräusch es sich handeln könnte. Anschließend folgte ein kurzer Text in dem sie über den Ursprung der Geräusche aufgeklärt wurden und mittels Ja-

Nein-Frage erfasst wurde, ob sie in jüngerer Vergangenheit schon einmal etwas von der Forschung und Entwicklung moderner ziviler Überschallflugzeuge gehört oder gelesen haben. Zur Erhebung der Einstellung gegenüber Überschallflugzeugen wurden die Versuchspersonen anhand einer 5-stufigen Antwortskala von „stimmt nicht“ bis „stimmt sehr“ gefragt, in wie weit aus ihrer Sicht die folgenden Eigenschaften auf den zivilen Betrieb von Überschallflugzeugen zutreffen: notwendig, unsicher, komfortabel, umweltschädlich, vermeidbar, schlecht für die Luftqualität, fortschrittlich, wirtschaftlich bedeutsam, klimaschädlich und schädlich für die Gebäudesubstanz. Die Antworten wurden von 1 bis 5 kodiert, teilweise rekodiert und zu einem Index aufaddiert, so dass sich ein Wertebereich von 10 bis 50 ergab und hohe Werte einer positiven Einstellung gegenüber Überschallflugzeugen entsprechen. Der Index erreichte eine gute interne Konsistenz (Cronbachs Alpha = 0,861).

3.6.2 Statistische Auswertung der Fragebögen

3.6.2.1 Belästigung

Um die sekundären Hypothesen zur Kurzzeit-Belästigung zu überprüfen, wurden LMM mit Random Intercepts berechnet. Zunächst wurde ein Rohmodell erstellt welches die Kriteriumsvariable *Kurzzeit-Belästigung* und die Bedingung als festen Einfluss-Faktor enthielt. Wenn sich eine der beiden Lärmbedingungen signifikant von der Kontrollbedingung unterschied, wurden anschließend paarweise post-hoc-Vergleiche mit Bonferroni-Holm-Korrektur für multiples Testen durchgeführt. Für die Residuen lag eine Normalverteilung vor. Da nicht nur der Lärm einen Einfluss auf die Belästigung hat, sondern auch nicht-akustische Faktoren (z. B. personenbezogene und situative Faktoren) eine relevante Rolle bei der Beurteilung spielen, wurden ausgehend von diesem Rohmodell mittels Vorwärtselektion iterativ weitere potentielle Prädiktoren dem Modell hinzugefügt. Dadurch wurde geprüft, ob es neben der Bedingung weitere Prädiktoren gibt, die über inkrementelle Validität verfügen und zusätzlich einen Varianzanteil des Kriteriums erklären. Die Hinzunahme der folgenden Variablen wurde getestet, da sie einen relevanten Einfluss auf die akute Belästigung haben könnten: Alter; Geschlecht; Gewöhnungsfähigkeit; Kontroll- und Copingfähigkeit; Lärmempfindlichkeit (LEF-K, LFN und IN); geistige, zeitliche und körperliche Belastung am vorherigen Tag; belastende Ereignisse am vorherigen Tag; momentane Schläfrigkeit (KSS) am Abend und am Morgen; subjektive Schlafqualität der letzten Nacht; Einschlafdauer und Ein- und Durchschlafschwierigkeiten; selbst eingeschätzte Ein- und Durchschlafschwierigkeiten durch die Polysomnographie und/oder der Laborumgebung (*Schlafstörung durch Setting*) und selbst eingeschätzte Ein- und Durchschlafschwierigkeiten durch Lärm (*Schlafstörung durch Lärm*). Anders als bei dem Vorhersagemodell für die physiologisch gemessenen Aufwachergebnisse und Arousal, wurden hier die p-Werte im traditionellen Kontext der Hypothesentestung betrachtet und ein signifikanter Zusammenhang der Prädiktorvariable mit der Kriteriumsvariable führte dazu, dass die Variable für die weitere Variablenselektion berücksichtigt wurde. Zusätzlich wurde anhand des AIC bestimmt, ob sich das Modell durch die Hinzunahme weiterer Faktoren verbessert. Eine Reduzierung des AIC um zwei Punkte wurde als das Modell mit der besseren Modellgüte interpretiert (Fabozzi et al. 2014). Demnach führte ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) der Prädiktorvariable mit der Kriteriumsvariable dazu, dass die Variable für die weitere Variablenselektion berücksichtigt wurde und im Modell verblieb, wenn sich der AIC verbesserte. Mittels multipler Regressionsanalysen wurde überprüft, ob Kolinearitäten vorlagen. Wenn der Variance Inflation Factor (VIF) für die Kovariablen < 10 war, konnten kritische Interkorrelationen ausgeschlossen werden. Um zu kontrollieren, ob mit zunehmender Dauer im Labor und damit zunehmender Dauer der Lärmbelastung auch die Belästigung der Versuchspersonen anstieg, wurde ein LMM mit den Studientagen (1 bis 3) als unabhängige Variable anstelle der Bedingung erstellt.

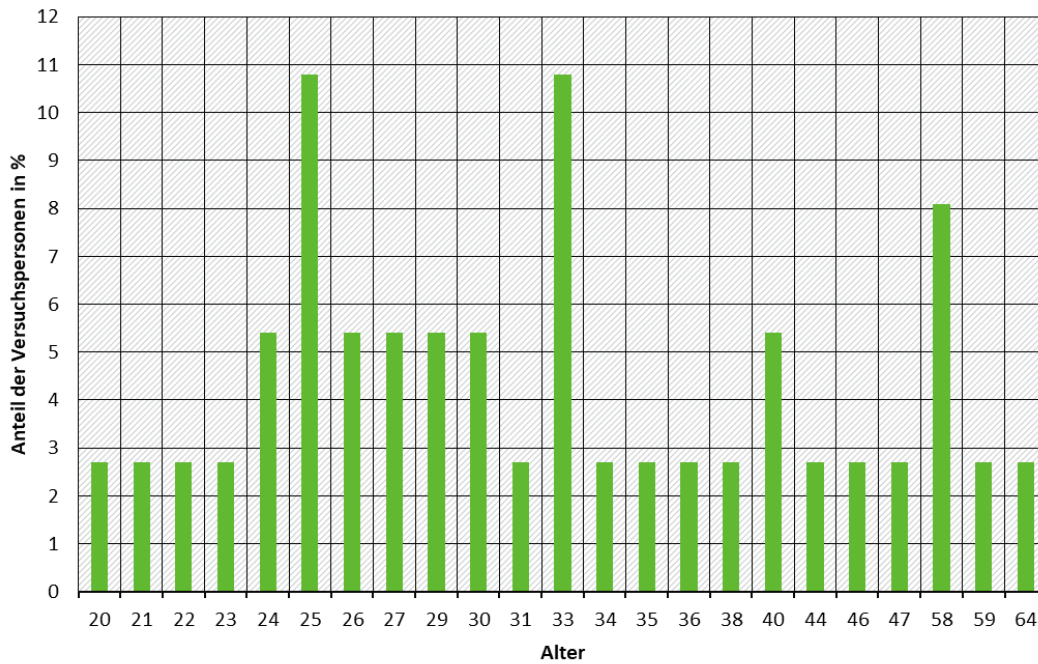
3.6.2.2 Selbst eingeschätzte Schlafqualität und morgendliche Schläfrigkeit

Auch hier wurden LMM mit Random Intercepts berechnet. Es wurden zunächst Rohmodelle erstellt, welche entweder die Kriteriumsvariable selbst eingeschätzte Schlafqualität oder morgendliche Schläfrigkeit sowie die Bedingung als festen Einfluss-Faktor enthielten. Anschließend wurden paarweise post-hoc-Vergleiche mit Bonferroni-Holm-Korrektur durchgeführt. Auch hier war eine Normalverteilung der Residuen gegeben. In einem weiteren Schritt wurden ausgehend von diesen beiden Rohmodellen mittels Vorwärtselektion iterativ die folgenden potentiellen nicht-akustischen Prädiktoren hinzugefügt, um zu testen, ob sie einen relevanten Einfluss auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität oder morgendliche Schläfrigkeit hatten: Alter; Geschlecht; Chronotyp; Gewöhnungsfähigkeit; Kontroll- und Copingfähigkeit; Lärmempfindlichkeit (LEF-K, LFN und IN); geistige, zeitliche und körperliche Belastung; belastende Ereignisse; Schläfrigkeit (KSS) am vorherigen Abend; Schlafstörung durch Setting und Lärm. Auch hier führte ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) der Prädiktorvariable mit der Kriteriumsvariable dazu, dass die Variable für die weitere Variablenselektion berücksichtigt wurde und im Modell verblieb, wenn sich der AIC verbesserte. Auch hier wurde überprüft, ob kritische Interkorrelationen zwischen Kovariablen vorlagen. Für die selbst eingeschätzte Schlafqualität wurde ein LMM mit den Studientagen (1 bis 3) als unabhängige Variable anstelle der Belästigung berechnet.

3.7 Beschreibung der Stichprobe

Im Laufe der Studiendurchführung mussten vier Datensätze aufgrund technischer Probleme und ein Datensatz aufgrund fehlender Compliance (Handynutzung während der Wachmessungen, keine Offenlegung von vorhandenen Erkältungssymptomen) ausgeschlossen werden. Eine Versuchsperson wurde irrtümlich für eine Studienteilnahme eingeschlossen, obwohl sich in der Probemessung bereits ein Periodic-Leg-Movement-Index > 20 zeigte. Da sich dieser Befund auch in den Schlafdaten der Studiennächten zeigte, wurde dieser Datensatz ebenfalls ausgeschlossen. Da die Kontrollbedingung zur Quantifizierung der lärminduzierten Aufwach-Rate in den Lärmbedingungen herangezogen werden sollte, wurden nur die Daten von Versuchspersonen für die Analysen herangezogen, deren elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität in der Kontrollbedingung ein Mindestkriterium erreichte. Als Kennwert für die Schlafqualität wurde die Schlafeffizienz herangezogen. Laut Expertenkonsens (Ohayon, Wickwire & Hirshkowitz 2017) wird eine Schlafeffizienz mit einem Wert $< 75\%$ als nicht angemessen angesehen, um als Indikator für eine gute/angemessene Schlafqualität herangezogen zu werden. Dementsprechend wurde dieser Cut-off-Wert angewandt und die Daten von fünf Versuchspersonen mit einer Schlafeffizienz $< 75\%$ ausgeschlossen. Insgesamt wurden 48 Versuchspersonen (23 Frauen, 25 Männer) vollständig gemessen, von denen 37 auswertbare Datensätze (18 Frauen, 19 Männer) in die Analyse gingen (Abbildung 26, Schaubild). Die 37 Versuchspersonen waren im Mittel ca. 35 Jahre alt ($M = 34,54$; $SD = 12,05$) und lagen in der Altersspanne zwischen 20 und 64 Jahren (Abbildung 30). Für die randomisierte Zuteilung zu den Untersuchungsgruppen (Reihenfolge der Bedingungen) ergab sich letztendlich, dass 25 Personen die Reihenfolge der Bedingungen der Gruppe A (Kontrolle, Low-Boom, Mach-Cut-off) durchliefen und 17 Personen der Gruppe B (Kontrolle, Mach-Cut-off, Low-Boom).

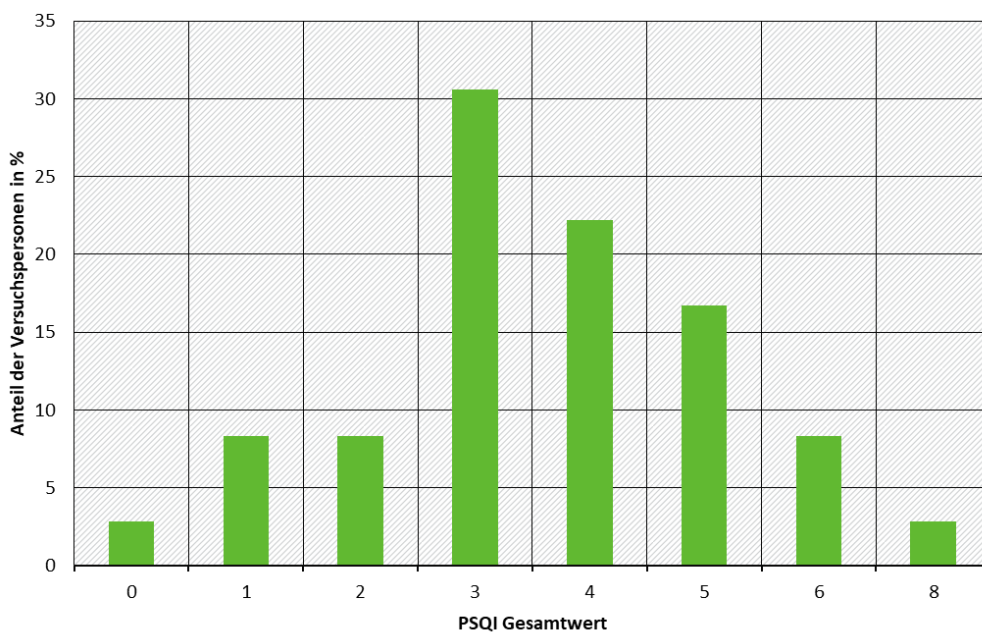
Abbildung 30: Altersverteilung der Stichprobe



Anmerkung: N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Der Großteil der Versuchspersonen (35) besaß die deutsche Staatsbürgerschaft, eine Versuchsperson die italienische und eine weitere Versuchsperson die indische Staatsbürgerschaft. Die Auswertung des PSQI zeigte, dass 10,8 % der Versuchspersonen in den letzten vier Wochen eine „schlechte“ und 86,5 % eine „gute“ Schlafqualität hatten (1 Datensatz mit fehlender Angabe, Abbildung 31). Die Versuchspersonen schätzen ihre Schlafqualität der letzten 4 Wochen im Mittel mit 4 (M = 3,61; SD = 1,64) ein. Die Angaben der Versuchspersonen variierten zwischen 0 und 8 in einem möglichen Wertebereich zwischen 0 und 21.

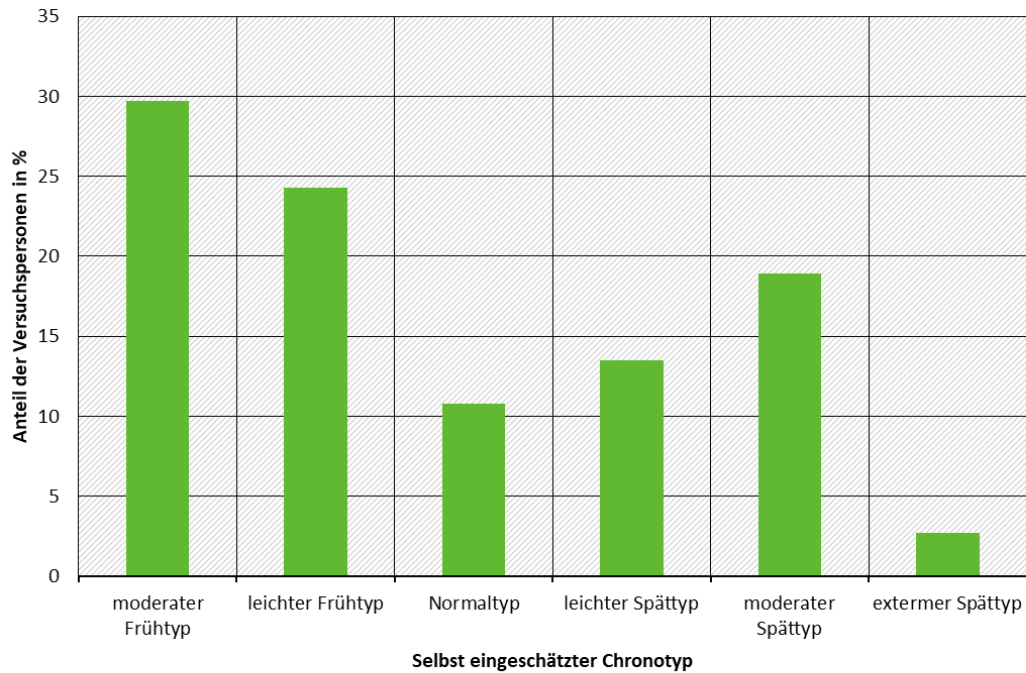
Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der selbst eingeschätzten Schlafqualität der letzten vier Wochen



Anmerkung: N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Der Großteil der Versuchspersonen ordnete sich selbst zwischen dem moderaten Frühtyp und dem moderaten Spättyp ein (29,7 % moderater Frühtyp, 24,3 % leichter Frühtyp, 10,8 % Normaltyp, 13,5 % leichter Spättyp, 18,9 % moderater Spättyp, Abbildung 32). Lediglich eine Versuchsperson bezeichneten sich als einen extremen Spättyp.

Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung des selbst eingeschätzten Chronotyps



Anmerkung: N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Variablen, die den Umgang mit Lärm beschreiben. Die Tabelle listet die deskriptiven Daten der Lärmempfindlichkeit (LEF-K, LFN und IN), der Kontroll- und Copingfähigkeit in Bezug auf Lärm sowie der generellen Gewöhnungsfähigkeit an Lärm auf.

Tabelle 10: Deskriptive Daten der Variablen zum Umgang mit Lärm

Variable	M (SD)	Minimum	Maximum	Interne Konsistenz (Cronbachs Alpha)
Lärmempfindlichkeit LEF-K (9 Items, Wertebereich 0 - 27)	13,16 (3,64)	7	22	0,558
Lärmempfindlichkeit LFN (Low Frequency Noise, 5 Items, Wertebereich 0 - 15)	6,03 (3,33)	0	13	0,730
Lärmempfindlichkeit IN (Impulsive Noise, 3 Items, Wertebereich 0 - 9)	4,27 (2,09)	0	8	0,712
Kontroll- und Copingfähigkeit (6 Items, Wertebereich 6 - 30)	19,97 (4,53)	9	28	0,792
Gewöhnungsfähigkeit (1 Item, Wertebereich 1 - 5)	3,46 (0,69)	2	5	-

Anmerkung: N = 37.

Nachdem die Versuchspersonen am letzten Morgen über den Ursprung der eingespielten Lärmereignisse aufgeklärt wurden, zeigten sie eine gemischte Einstellung gegenüber dem zivilen Betrieb von Überschallflugzeugen von 32,22 (SE = 1,19) auf der Index-Skala von 10 bis 50, wobei hohe Werte einer positiven und niedrige Werte einer negativen Einstellung gegenüber Überschallflugzeugen entsprechen. Während zivile Überschallflugzeuge auf der Skala von 1 bis 5 als eher fortschrittlich (M = 4,35, SE = 0,14), komfortabel (M = 3,95, SE = 0,16) und wirtschaftlich bedeutsam (M = 3,73, SE = 0,18) bewertet wurden, wurden sie jedoch auch als eher klimaschädlich (M = 2,24, SE = 0,18), umweltschädlich (M = 2,32, SE = 0,18) und schlecht für die Luftqualität (M = 2,57, SE = 0,19) eingeschätzt.

3.8 Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf

3.8.1 Makroparameter des Schlafs

Tabelle 11 enthält die deskriptiv-statistischen Daten der allgemeinen Schlafparameter sowie für die Anzahl der Aufwachereignisse, Anzahl der lärmassoziierten Aufwachereignisse, Anzahl der Arousals und Anzahl der lärmassoziierten Arousals für die drei Studienächte gemittelt über die Stichprobe von 37 Versuchspersonen. Die Analysen ergaben einen signifikanten Effekt der Bedingung auf die Schlafeffizienz und die TST. Die anschließenden paarweisen Vergleiche zeigten, dass sich die Low-Boom-Bedingung nicht von der Kontrollbedingung unterschied. Jedoch konnten hypothesenkonforme statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Low-Boom- und der Mach-Cut-off-Bedingung gefunden werden: Die Schlafeffizienz (MDiff = 2,888; 95 %-CI [-0,002; 5,780]; p = 0,033) und die TST (MDiff = 13,865; 95 %-CI [-0,008; 27,700]; p = 0,033) waren in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der Mach-Cut-off-Bedingung. Überraschenderweise waren die Schlafeffizienz (MDiff = 2,392; 95 %-CI [0,627; 4,160]; p = 0,004) und die TST (MDiff = 11,486; 95 %-CI [3,014; 20,000]; p = 0,004) in der Mach-Cut-off-Bedingung signifikant höher als in der Kontrollbedingung.

Während für die Gesamtanzahl der Aufwachereignisse und Arousals kein Unterschied zwischen den drei Bedingungen gefunden wurde, ergab sich nach der ereignisbezogenen Analyse der beiden Lärmbedingungen eine signifikant höhere Anzahl lärmassoziiertter Aufwachereignisse (MDiff = 1,541; 95 %-CI [0,976; 2,110]; p < 0,001) und Arousals (MDiff = 1,541; 95 %-CI [0,397; 2,680]; p = 0,010) in der Low-Boom-Bedingung im Vergleich zur Mach-Cut-off-Bedingung. Über die gesamte Nacht traten in jeder Bedingung im Mittel ca. 22 bis 24 Aufwachereignisse auf, davon waren in der Low-Boom-Bedingung im Mittel ca. 3 lärmassoziiert, d. h. sie traten unmittelbar nach einem Low-Boom-Ereignis auf. In der Mach-Cut-off-Bedingung war jedoch nur die Hälfte (ca. 1,5) lärmassoziiert. Die Anzahl der Arousals lag in jeder Bedingung insgesamt bei ca. 90 bis 94, davon traten ca. 6 unmittelbar nach einem Low-Boom-Ereignis auf und ca. 4 nach einem Mach-Cut-off-Ereignis.

Tabelle 11: Mittelwert und Standardfehler der Schlafparameter über die drei Bedingungen

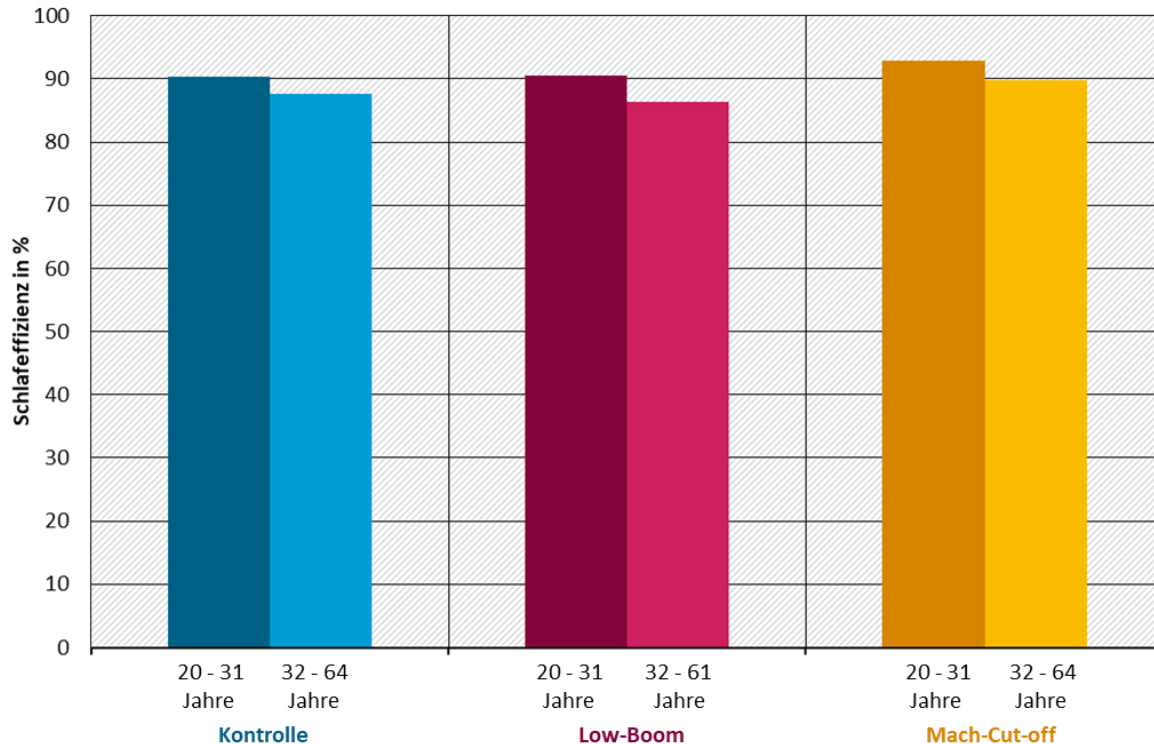
Schlafparameter	Kontrolle M (SE)	Low-Boom M (SE)	Mach-Cut-off M (SE)
TST (min)	427,15 (4,01)	424,77 (5,37)	438,64** (3,70)
Schlafeffizienz (%)	88,99 (0,84)	88,49 (1,12)	91,38** (0,77)
SOL (min)	20,05 (1,72)	21,24 (2,36)	16,96 (1,54)
WASO (min)	35,78 (3,44)	36,50 (4,87)	26,87 (3,24)
S1 (min)	20,77 (1,71)	21,61 (1,55)	22,19 (1,60)
S2 (min)	236,82 (6,49)	229,0 (6,34)	230,96 (6,35)
SWS (min)	83,16 (5,72)	83,69 (5,00)	90,32 (5,45)
REMS (min)	86,39 (2,94)	90,47 (3,60)	95,16 (3,94)
Anzahl der Aufwachereignisse	21,68 (1,01)	22,59 (1,12)	23,46 (1,05)
Anzahl der lärmassoziierten Aufwachereignisse	-	3,05 (0,30)	1,51*** (0,20)
Anzahl der Arousals	90,11 (5,73)	94,05 (6,72)	92,46 (6,97)
Anzahl der lärmassoziierten Arousals	-	5,65 (0,50)	4,11* (0,38)

Anmerkung: N = 37, M = Mittelwert und SE = Standardfehler, TST = Total Sleep Time, SOL = Sleep Onset Latency, WASO = Wake After Sleep Onset, S1 = Stadium 1, S2 = Stadium 2, SWS = Slow Wave Sleep, REMS = REM-Schlaf, Unterschied der Mach-Cut-off-Bedingung zur Low-Boom-Bedingung: ***p < 0,001, **p < 0,01, *p < 0,05 (post-hoc t-Test mit Bonferroni-Holm-Korrektur); Unterschied der Mach-Cut-off-Bedingung zur Kontrollbedingung: †p < 0,05 (post-hoc t-Test mit Bonferroni-Holm-Korrektur). Zwischen Low-Boom und Kontrolle ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

Die Testung der Hinzunahmen potentieller Kovariablen in das Modell zur Wirkung der Bedingung auf die Schlafeffizienz offenbarten nur für das Alter einen signifikanten Zusammenhang mit der Schlafeffizienz ($\beta = -0,126$; 95 %-CI [-0,239; -0,012]; $p = 0,031$). Ein höheres Alter ging demnach mit einer geringeren Schlafeffizienz einher. Allerdings verbesserte sich die Modellgüte vom ursprünglichen Modell (AIC = 680) durch die Hinzunahme des Alters (AIC = 679) kaum. Dementsprechend kann durch das Alter in diesem Modell keine zusätzliche Varianz in der Schlafeffizienz aufgeklärt werden. Zudem gab es keine signifikanten Unterschiede für die Interaktionen zwischen den Bedingungen und dem Alter. Zur Veranschaulichung des Alterseffekts wurde explorativ ein Mediansplit für das Alter durchgeführt und die Mittelwerte der Schlafeffizienz über die Bedingungen für zwei Altersgruppen (20 - 31 Jahre vs. 32 - 64 Jahre)

dargestellt (Abbildung 33). Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass die jüngeren Versuchspersonen in allen drei Bedingungen eine höhere Schlafeffizienz erreichten als die älteren Versuchspersonen. Ein deutlicher Unterschied in der Schlafeffizienz zwischen den Bedingungen ist nicht zu erkennen.

Abbildung 33: Schlafeffizienz für zwei verschiedene Altersgruppen für die drei Bedingungen



Anmerkung: Altersgruppen (20 - 31 Jahre, N = 19 vs. 32 - 64 Jahre, N = 18) anhand eines Mediansplit. N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR

Bei den zusätzlichen Analysen anhand von LMM mit den Studientagen (1 bis 3) anstelle der Bedingung als unabhängige Variable, zeigte sich lediglich eine signifikante Zunahme des REMS in der dritten Nacht im Vergleich zur ersten Nacht (MDiff = 11,338; 95 %-CI [1,660; 21,000]; p = 0,016).

Die Korrelationsanalysen ergaben einen signifikanten positiven moderaten Zusammenhang der elektrophysiologisch gemessenen Schlafeffizienz mit der von den Versuchspersonen selbst eingeschätzten Schlafqualität ($r = 0,393$, $p < 0,001$) über alle Bedingungen hinweg.

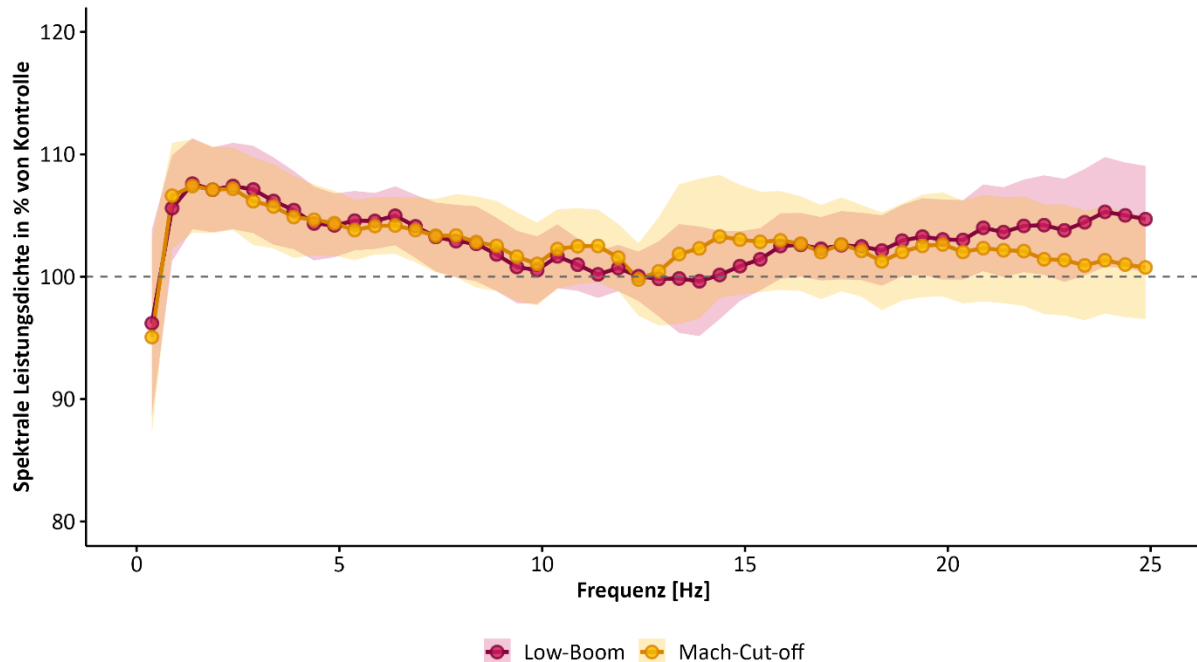
Die Analysen des Zusammenhangs der elektrophysiologisch gemessenen Einschlafdauer (SOL) mit der von den Versuchspersonen selbst eingeschätzten Einschlafdauer ergaben einen signifikanten positiven moderaten Zusammenhang ($r = 0,265$, $p = 0,005$) über alle Bedingungen hinweg.

Zudem wurde für die erste Studiennacht bzw. die Kontrollbedingung untersucht, ob der Abstand zur vorangegangenen Probenacht mit der Schlafqualität korreliert. Der durchschnittliche Abstand lag bei ca. 70 Tagen (Minimum = 15 Tage, Maximum = 141 Tage). Es zeigte sich jedoch für keinen der Schlafparameter ein signifikanter Zusammenhang mit dem Zeitraum zwischen der Probenacht und der ersten Studiennacht.

3.8.2 EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf

Über die ganze Nacht betrachtet gab es keine signifikanten Unterschiede im NREMS-EEG zwischen den drei Bedingungen. Abbildung 34 zeigt die spektrale Leistungsdichte pro 0,5-Hz Bin, die in jeder der beiden Überschallknall-Bedingungen als Prozent der Kontrollbedingung dargestellt ist. Weder der Faktor Bedingung, noch die Interaktion zwischen Bedingung und EEG-Frequenz zeigten einen Einfluss auf die gemittelte spektrale Leistungsdichte.

Abbildung 34: EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf während Low-Boom und Mach-Cut-off, gemittelt über die ganze Nacht und dargestellt in Prozent der Kontrollbedingung



Anmerkung: Gezeigt sind Mittelwerte pro 0,5 Hz Bin für die Low-Boom- (dunkelrote Linie) und die Mach-Cut-off-Bedingung (dunkelorange Linie) und \pm Standardfehler für die Low-Boom- (hellrote Fläche) und die Mach-Cut-off-Bedingung (hellorange Fläche) über die gesamte Nacht. Die grau-gestrichelte Linie stellt die spektrale Leistungsdichte der Kontrollbedingung dar. Aufgrund abweichender Werte einer Versuchsperson, die nach Tukey-Ausreißerregeln ($1,5 \cdot \text{IQR}$ -Regel) ausgeschlossen wurde, ergab sich für die Mach-Cut-off-Bedingung $N = 36$ und für die Kontroll- und Low-Boom-Bedingung $N = 37$. Quelle: eigene Darstellung, DLR.

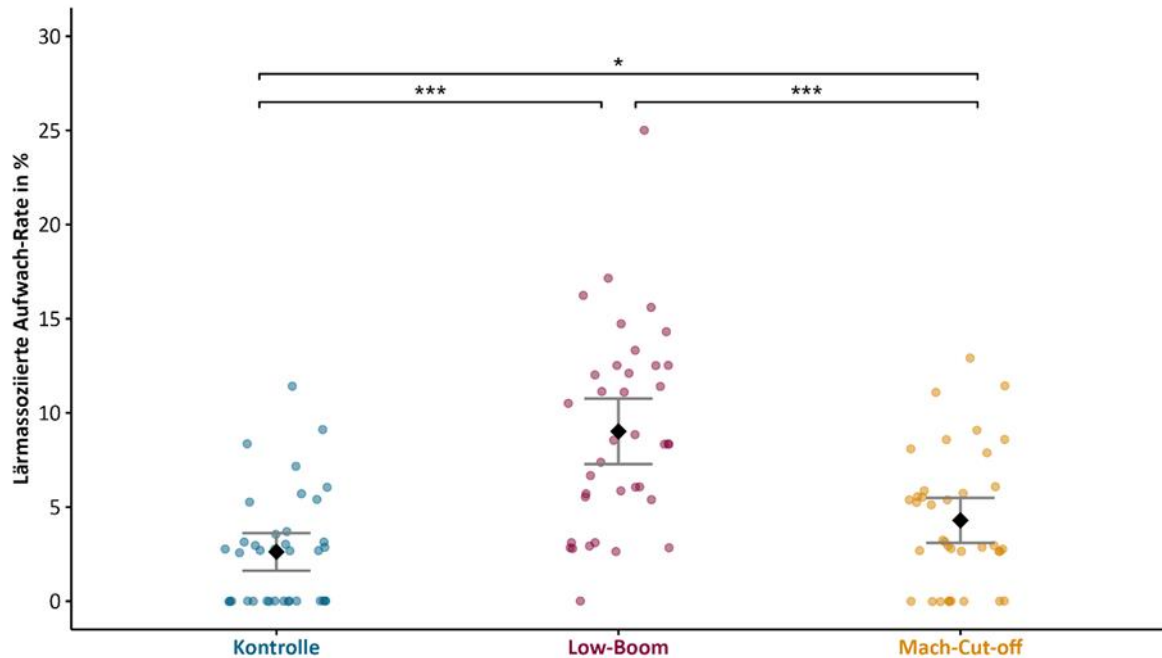
3.8.3 Ereignisbezogene Analysen

3.8.3.1 Aufwachereignisse

Im Mittel konnten für die ereignisbezogene Analyse der Aufwachereignisse ~ 34 Lärmereignisse ($SD = 2,82$) herangezogen werden (Kontrolle: $M = 33,89$; $SD = 2,97$; $Mo. = 35$; Low-Boom: $M = 33,84$; $SD = 2,85$; $Mo. = 36$; Mach-Cut-off: $M = 35,30$; $SD = 2,44$; $Mo. = 35$). Die Anzahl variierte zwischen 25 und 39 Lärmereignissen (Kontrolle: 27 – 39; Low-Boom: 25 – 38; Mach-Cut-off: 27 – 39). Abbildung 35 zeigt die relative prozentuale Rate für die lärmassoziierten Aufwachereignisse jeder Versuchsperson über die drei Bedingungen. Die Aufwach-Rate war mit 9 % ($SE = 0,86$) am höchsten in der Low-Boom-Bedingung und unterschied sich signifikant von der Kontrollbedingung ($MDiff = 6,393$; 95 %-CI [4,723; 8,064]; $p < 0,001$) mit 2,6 % ($SE = 0,49$) und von der Mach-Cut-off-Bedingung ($MDiff = 4,721$; 95 %-CI [3,051; 6,391]; $p < 0,001$) mit 4,3 % ($SE = 0,59$). Der Unterschied der Mach-Cut-off-Bedingung zur Kontrollbedingung war ebenfalls signifikant ($MDiff = 1,632$; 95 %-CI [0,002; 3,343]; $p = 0,00497$). Während in der

Kontroll- und Mach-Cut-off-Bedingung mehrere Personen keine lärmassoziierten Aufwachereignisse gezeigt haben, gab es in der Low-Boom-Bedingung nur eine Versuchsperson, die nicht durch eines der Überschallknallereignisse aufgewacht ist.

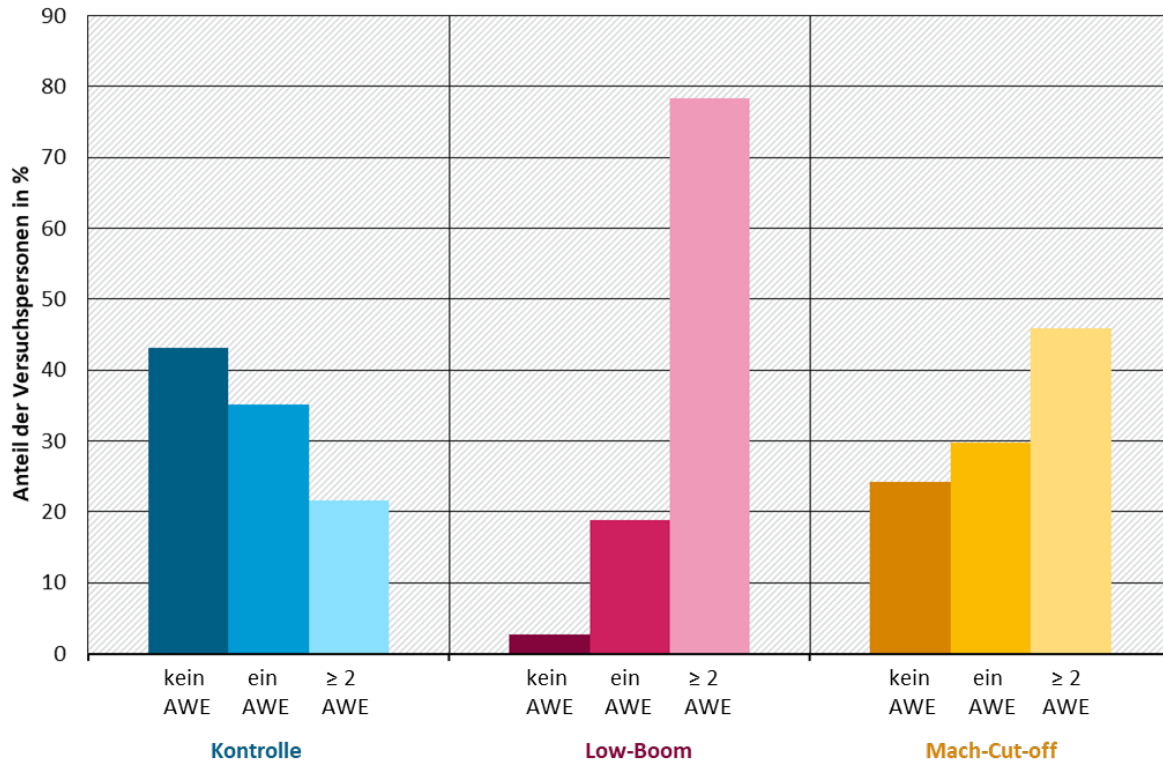
Abbildung 35: Relative Rate der lärmassoziierten Aufwachereignisse für jede Bedingung



Anmerkung: Die Rauten stellen die gemittelte Aufwach-Rate über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. Die einzelnen Punkte repräsentieren die Aufwach-Rate für jede Versuchsperson. *** $p < 0,001$, * $p < 0,05$, $N = 37$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Um die Unterschiede in der Verteilung der lärmassoziierten Aufwachereignisse genauer zu verdeutlichen, wird in Abbildung 36 der Anteil der Versuchspersonen ohne bzw. mit lärmassoziierten Aufwachereignissen - also Aufwachereignissen, die unmittelbar nach einem Lärmereignis bzw. in der Kontrollbedingung nach einem supponierten Lärmereignis aufgetreten sind - dargestellt. Wie bereits in Abbildung 35 zu erkennen war, gab es in der Low-Boom-Bedingung nur eine Versuchsperson, die nicht unmittelbar nach einem der Lärmereignisse aufgewacht ist, während es in der Kontroll- (16 Versuchspersonen bzw. 43,2 %) und in der Mach-Cut-off-Bedingung (9 Versuchspersonen bzw. 24,3 %) deutlich mehr waren. Ein lärmassoziiertes Aufwachereignis trat bei 35,1 % der Versuchspersonen in der Kontrollbedingung auf, gefolgt von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 29,7 % und dem geringsten Anteil von 18,9 % in der Low-Boom-Bedingung. Ab zwei Aufwachereignissen war jedoch der Anteil der Versuchspersonen in der Low-Boom-Bedingung mit 78,3 % am höchsten, gefolgt von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 45,9 % und dem geringsten Anteil in der Kontrollbedingung von 21,6 %. In der Kontrollbedingung zeigte eine Versuchsperson und in der Mach-Cut-off-Bedingung 3 Versuchspersonen die maximale Anzahl an 4 lärmassoziierten Aufwachereignissen. In der Low-Boom-Bedingung wachten 9 Versuchspersonen 4 Mal unmittelbar nach einem Lärmereignis auf und eine Versuchsperson zeigte die maximale Anzahl an 9 lärmassoziierten Aufwachereignissen.

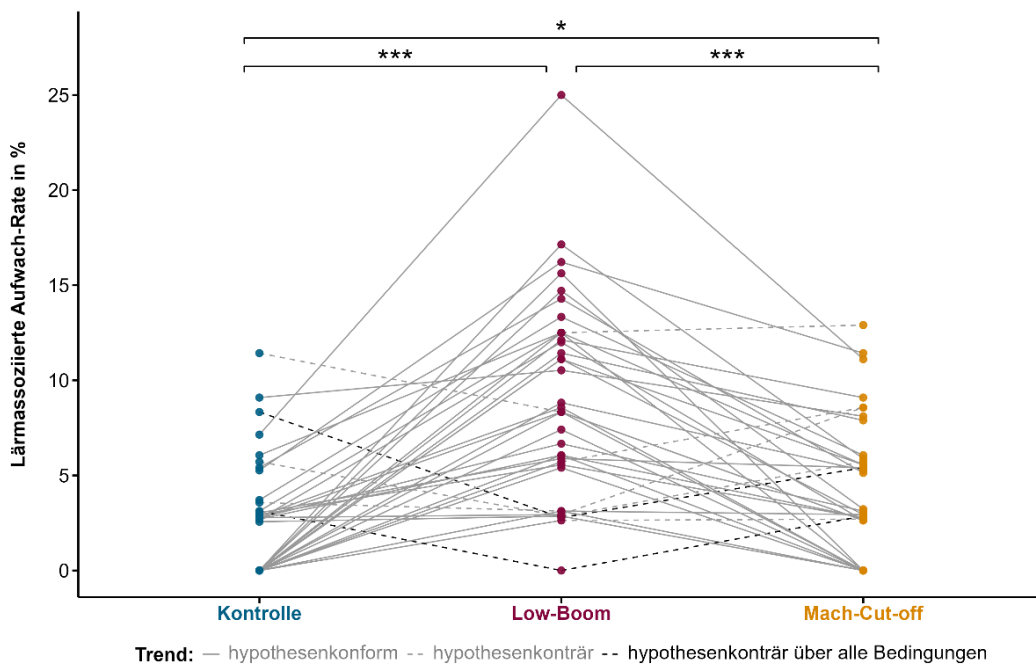
Abbildung 36: Anteil der Versuchspersonen ohne bzw. mit lärmassoziierten Aufwachereignissen



Anmerkung: N = 37, AWE = Aufwachereignis, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Abbildung 37 verdeutlicht wie viele Versuchspersonen hypothesenkonforme Aufwach-Raten (Low-Boom > Mach-Cut-off > Kontrolle), entgegengesetzte (hypothesenkonträre) Aufwach-Raten zwischen zwei Bedingungen und entgegengesetzte Aufwach-Raten über alle drei Bedingungen hinweg gezeigt haben. Lediglich bei zwei Versuchspersonen kam es über alle Bedingungen hinweg zu hypothesenkonträren Aufwach-Raten.

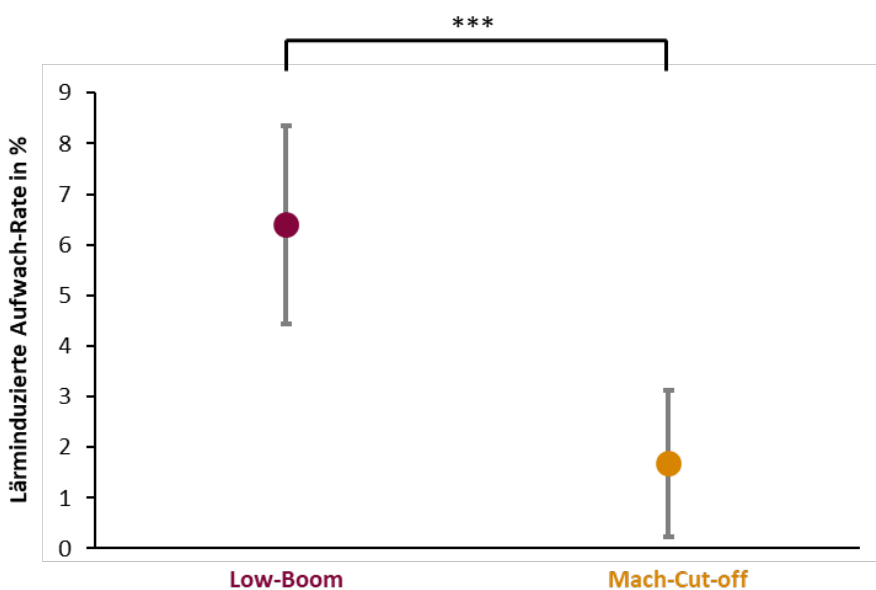
Abbildung 37: Trends der Aufwach-Rate für jede Versuchsperson und jede Bedingung



Anmerkung: Die einzelnen Punkte repräsentieren die Aufwach-Rate für jede Versuchsperson. *** $p < 0,001$, * $p < 0,05$, $N = 37$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Die lärminduzierte Aufwach-Rate der beiden Lärmbedingungen ist in Abbildung 38 dargestellt. Abzüglich der spontanen Aufwach-Rate der Kontrollbedingung ergab sich für die Low-Boom-Bedingung eine gemittelte Aufwach-Rate von 6,4 % (SE = 0,96) und für die Mach-Cut-off-Bedingung 1,7 % (SE = 0,71) (MDiff = 4,721; 95 %-CI [3,052; 6,390]; $p < 0,001$).

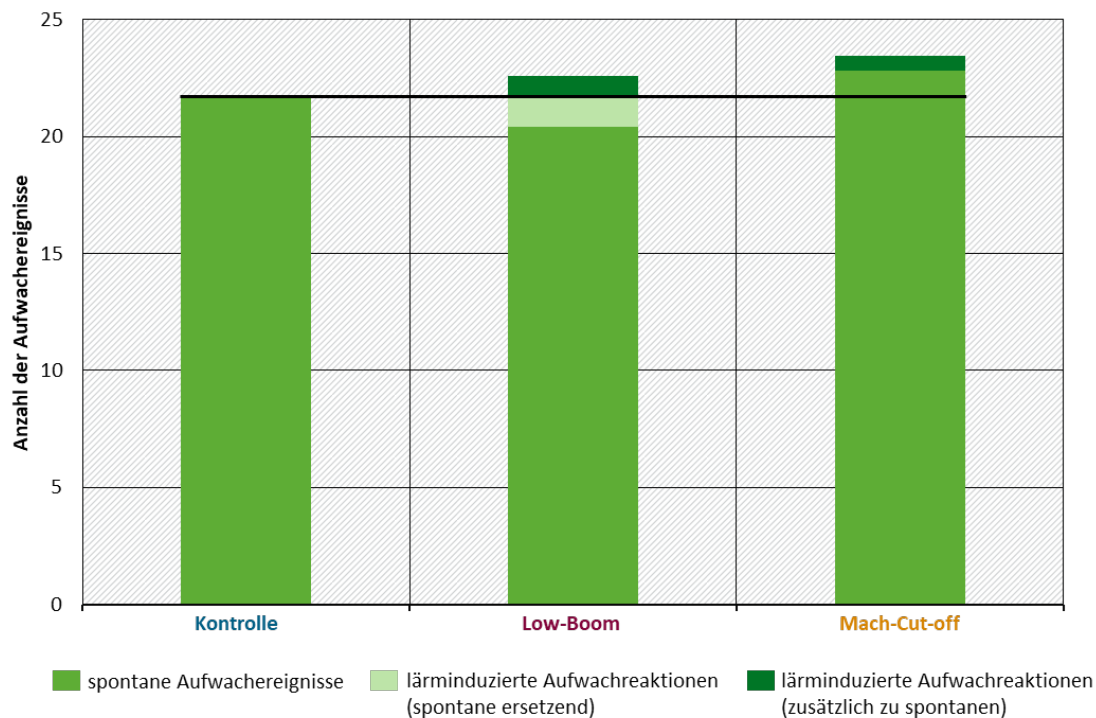
Abbildung 38: Lärminduzierte Aufwach-Rate in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung



Anmerkung: Differenz zur jeweiligen Aufwach-Rate in der Kontrollbedingung zunächst berechnet für jede Versuchsperson und anschließend akkumuliert über alle Versuchspersonen. Die Punkte stellen die gemittelte Aufwach-Rate über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. $N = 37$, *** $p < 0,001$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

In der Low-Boom-Bedingung waren von der Gesamtzahl der Aufwachereignisse (22,59) im Durchschnitt 2,16 Aufwachreaktionen lärminduziert. In der Mach-Cut-off-Bedingung konnten von allen Aufwachereignissen (23,46) 0,62 auf die Lärmereignisse zurückgeführt werden. Da Basner, Müller und Elmenhorst (2011) annehmen, dass lärminduzierte Aufwachreaktionen nicht nur zusätzlich auftreten, sondern auch spontane Aufwachereignisse ersetzen, wurden die lärminduzierten Aufwachereignisse unterteilt in Aufwachreaktionen, die spontane Aufwachereignisse ersetzt haben und in Aufwachreaktionen, die zusätzlich zu den spontanen Aufwachereignissen aufgetreten sind. Es wurde angenommen, dass die Anzahl der Aufwachereignisse in der Kontrollbedingung (21,68) den spontanen Aufwachereignissen entspricht. Abbildung 39 veranschaulicht, dass in der Low-Boom-Bedingung etwas mehr als die Hälfte (58 %) der lärmbedingten Aufwachreaktionen Aufwachereignisse „ersetzen“, die vermutlich spontan aufgetreten wären. In der Mach-Cut-off-Bedingung traten die lärminduzierten Aufwachreaktionen zusätzlich auf und scheinen keine spontanen Ereignisse ersetzt zu haben.

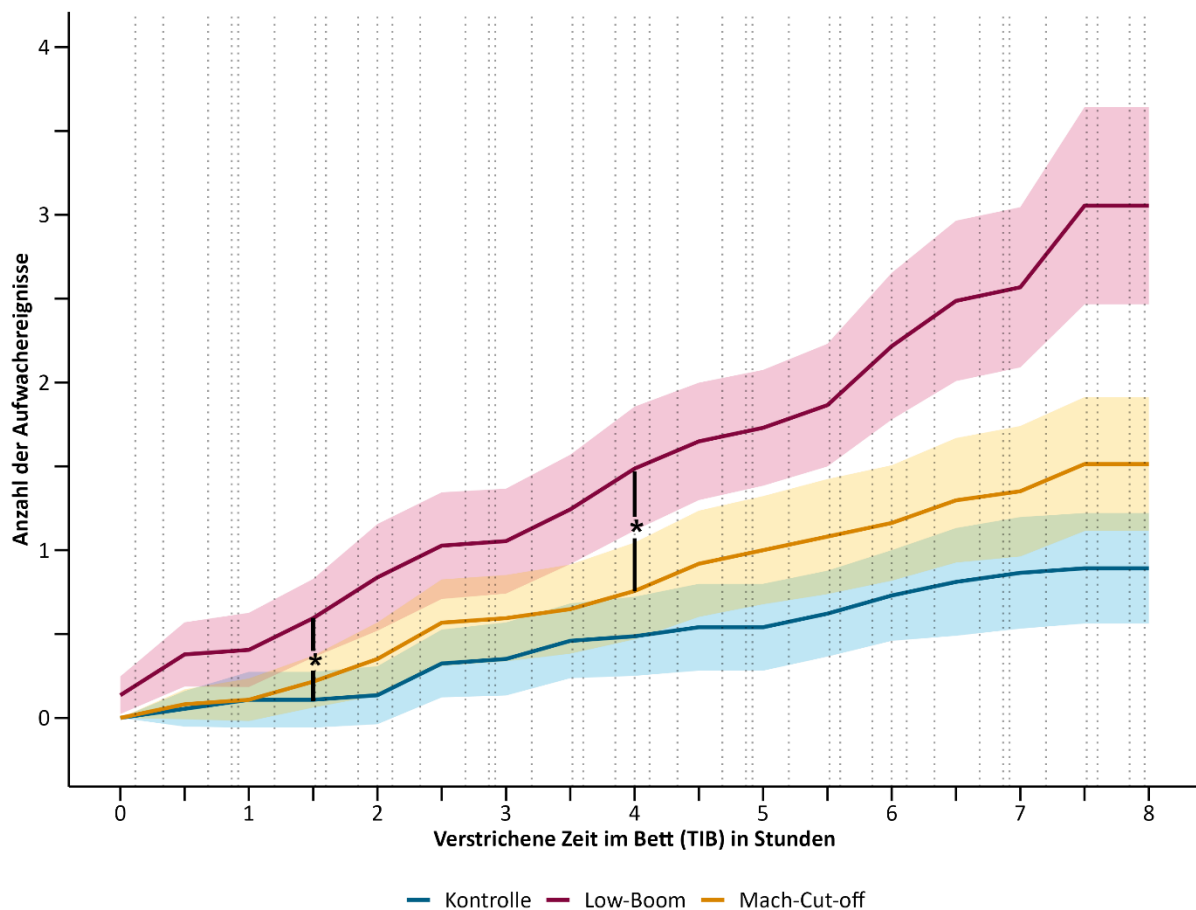
Abbildung 39: Gemittelte Anzahl der Aufwachereignisse für die drei Bedingungen



Anmerkung: Die schwarze Linie stellt die durchschnittliche Anzahl der Aufwachereignisse in der lärmfreien Kontrollnacht dar. N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Abbildung 40 zeigt die kumulierte Anzahl der lärmassoziierten Aufwachereignisse in den beiden Lärmbedingungen und die Anzahl der Aufwachereignisse aufgrund der supponierten Lärmereignisse in der Kontrollbedingung über die verstrichene Zeit im Bett (TIB = 8 Stunden). Zudem sind die Zeitpunkte der 40 (supponierten) Lärmereignisse über die TIB abgebildet. Die Anzahl der Aufwachereignisse in der Low-Boom-Bedingung war nach 1,5 Stunden TIB und damit nach 6 Lärmereignissen bis zum Ende der TIB signifikant höher als die in der Kontrollbedingung ($p < 0,05$). Im Vergleich zur Mach-Cut-off-Bedingung war die Anzahl der Aufwachereignisse in der Low-Boom-Bedingung erst ab der 4. Stunde der TIB und damit nach 19 Lärmereignissen bis zum Ende der TIB signifikant höher ($p < 0,05$). In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass gegen Ende der TIB die Anzahl der Aufwachereignisse in allen Bedingungen nicht mehr ansteigt. Dieses Plateau ist dadurch begründet, dass zu der Zeit bereits einige Versuchspersonen wach waren.

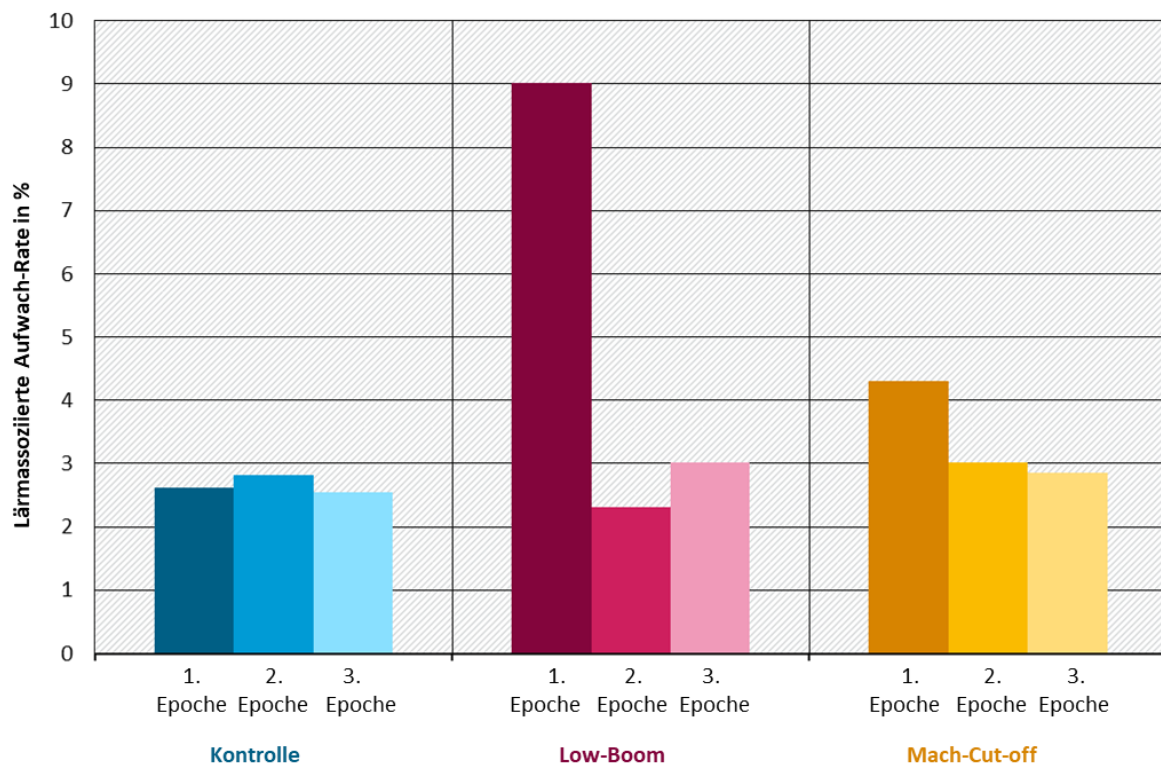
Abbildung 40: Kumulierte Anzahl der Aufwachereignisse



Anmerkung: Für jedes 30 Minuten-Intervall wurde eine Verteilung der kumulierten Aufwachereignisse für jede Versuchsperson und anschließend über alle Versuchspersonen berechnet. Die Bedingungen wurden für jeden 30-Minuten-Zeitpunkt der Bettzeit (TIB) miteinander verglichen. Dargestellt sind die kumulierte Anzahl der Aufwachereignisse für die Kontroll- (dunkelblaue Linie), Low-Boom- (dunkelrote Linie) und die Mach-Cut-off-Bedingung (dunkelorange Linie) und die 95 % -Konfidenzintervalle für die Kontroll- (hellblaue Fläche), Low-Boom- (hellrote Fläche) und die Mach-Cut-off-Bedingung (hellorange Fläche). Die grau-gestrichelten Linien stellen die Zeitpunkte der eingespielten Lärmereignisse in den beiden Lärmbedingungen dar und die der supponierten Lärmereignisse in der Kontrollbedingung. *p < 0,05, N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Um zu überprüfen, ob die erste Epoche nach dem Lärmereignis tatsächlich geeignet war, um die lärmassoziierte Aufwach-Rate für die Überschallknalle vorherzusagen, wurde eine zusätzliche Analyse durchgeführt, bei der die Aufwachereignisse in der zweiten und dritten Epoche nach dem Lärmereignis betrachtet wurden. Anhand Abbildung 41 ist zu erkennen, dass sich die supponierte lärmassoziierte Aufwach-Rate in der Kontrollbedingung zwischen den drei Epochen kaum unterscheidet (1. Epoche: M = 2,6 %, SE = 0,49; 2. Epoche: M = 2,8 %, SE = 0,43; 3. Epoche: M = 2,6 %, SE = 0,51). Da es sich hierbei um die Kontrollbedingung handelt, ist davon auszugehen, dass eine Aufwach-Rate von 2,6 % bis 2,8 % der spontanen Aufwach-Rate entspricht. Die Aufwach-Rate in der zweiten und dritten Epoche unterschied sich nicht zwischen den Bedingungen (p > 0,05). In der Low-Boom- und Mach-Cut-off-Bedingung trat die höchste Aufwach-Rate in der ersten Epoche auf (Low-Boom: M = 9,0 %, SE = 0,86; Mach-Cut-off: M = 4,3 %, SE = 0,59) und die zweite (Low-Boom: M = 2,3 %, SE = 0,40; Mach-Cut-off: M = 3,0 %, SE = 0,41) und dritte Epoche (Low-Boom: M = 3,0 %, SE = 0,48; Mach-Cut-off: M = 2,9 %, SE = 0,50) entsprach dem Niveau der Kontrollbedingung und damit der spontanen Aufwach-Rate.

Abbildung 41: Vergleich der lärmassoziierten Aufwach-Rate in der 1., 2. und 3. Epoche nach dem Lärmereignis



Anmerkung: N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Die Ergebnisse des Vorhersagemodells mittels der logistischen Regressionsanalyse sind in Tabelle 12 dargestellt. Das Modell zeigte, eine signifikant höhere Aufwachwahrscheinlichkeit für die Low-Boom-Bedingung und die Mach-Cut-off-Bedingung im Vergleich zur Kontroll-Bedingung. Zudem zeigte sich, dass wenn es sich bei dem Schlafstadium in der (Referenz-)Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis um SWS handelte, die Aufwachwahrscheinlichkeit geringer war als wenn es sich um S2 handelte. Anhand der durchgeführten Vorwärtsselektion wurde aus den potentiellen Prädiktoren die verstrichene Schlafzeit zwischen dem Schlafbeginn und dem jeweiligen Lärmereignis exklusive der Wachliegezeit selektiert, da diese die Modellgüte verbesserte und die Aufwachwahrscheinlichkeit signifikant beeinflusste. Mit Zunahme der verstrichenen Schlafzeit stieg die Aufwachwahrscheinlichkeit. Zudem wurde eine signifikante Interaktion zwischen dem Schlafstadium und der verstrichenen Schlafzeit selektiert. Die protektive Wirkung von Tiefschlaf nahm im Vergleich zu S2 mit Zunahme der verstrichenen Schlafzeit ab. Das bedeutet, dass der durch Tiefschlaf normalerweise erwartbare Rückgang der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Aufwachreaktionen mit zunehmender Schlafzeit abgeschwächt ist. Die Einbeziehung des Alters als weiterer Prädiktor erreichte keine Signifikanz und verbesserte die Modellgüte nicht.

Tabelle 12: Vorhersagemodell für die lärmassoziierte Aufwachwahrscheinlichkeit

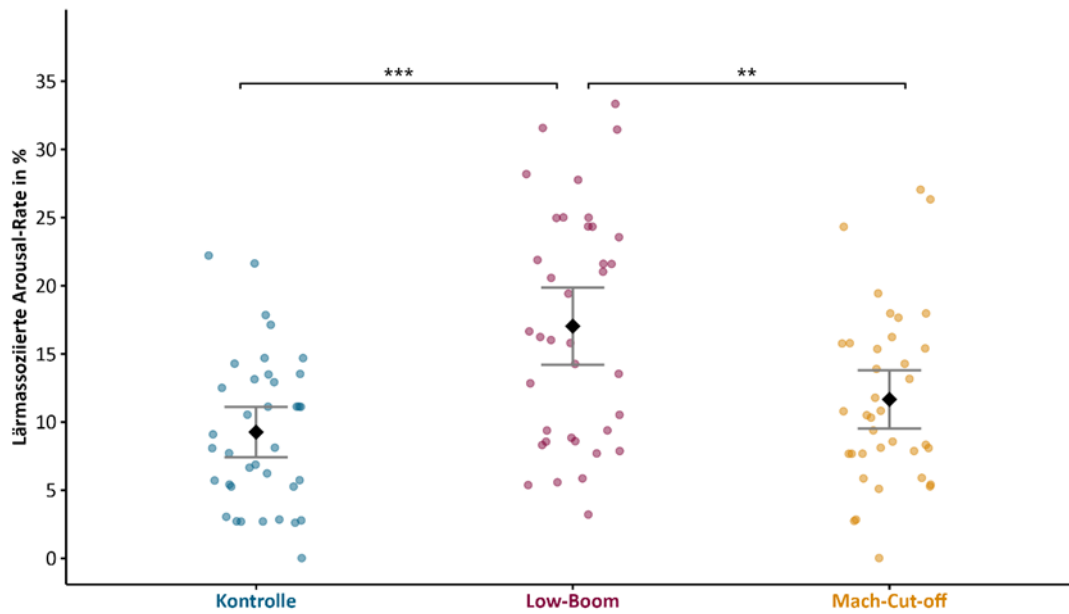
	Regressions- koeffizient	Odds Ratio (OR)	OR 95% KI (unterhalb - oberhalb)	p-Wert
Intercept	-3,712	0,024	0,015 - 0,041	<0,001***
Bedingung: Kontrolle	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
Bedingung: Low-Boom	1,311	3,711	2,497 - 5,516	<0,001***
Bedingung: Mach-Cut-off	0,507	1,660	1,072 - 2,569	0,023*
StadiumVor: S2	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
StadiumVor: SWS	-0,718	0,488	0,240 - 0,993	0,048*
StadiumVor: REMS	-0,4438	0,642	0,239 - 1,720	0,378
STepo	0,031	1,032	0,941 - 1,131	0,508
StadiumVor: S2 x STepo	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
StadiumVor: SWS x STepo	0,249	1,283	1,049 - 1,569	0,015*
StadiumVor: REMS x STepo	0,058	1,059	0,869 - 1,292	0,568

Anmerkung: Logistisches Regressionsmodell mit Random Intercept, N = 37, StadiumVor = Schlafstadium in der Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis, S2 = Stadium 2, SWS = Tiefschlaf (S3 und S4), REMS = REM-Schlaf, STepo = verstrichene Schlafzeit in Stunden zwischen Schlafbeginn und dem jeweiligen Lärmereignis exkl. Wachliegezeit, ***p < 0,001, *p < 0,05.

3.8.3.2 Arousals

Für die ereignisbezogene Analyse konnte für die Analyse die gleiche Anzahl an Lärmereignissen (M = 34,34; SD = 2,82) herangezogen werden wie für die Analyse der Aufwachereignisse. In Abbildung 42 ist die relative prozentuale Rate für die lärmassoziierten Arousals jeder Versuchsperson über die drei Bedingungen dargestellt. Für die Low-Boom-Bedingung zeigte sich die höchste gemittelte Arousal-Rate von 16,6 % (SE = 1,42) und unterschied sich signifikant von der Kontrollbedingung mit 8,9 % (SE = 0,89) (MDiff = 7,749; 95 %-CI [4,674; 10,825]; p < 0,001) und von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 11,6 % (SE = 1,08) (MDiff = 4,998; 95 %-CI [1,922; 8,074]; p = 0,004). Während in der Kontroll- und Mach-Cut-off-Bedingungen jeweils eine Person kein lärmassoziiertes Arousal gezeigt hat, gab es in der Low-Boom-Bedingung keine Versuchsperson, die nicht mit einem Arousal auf eines der Überschallknallereignisse reagiert hat.

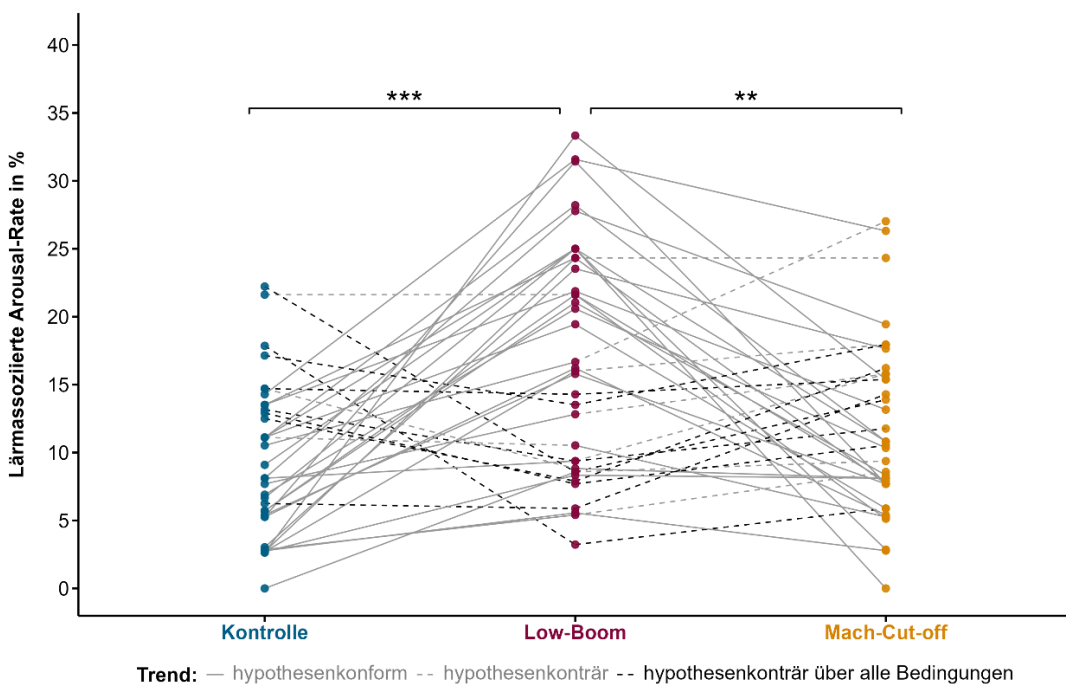
Abbildung 42: Relative Rate der lärmassoziierten Arousal für jede Bedingung



Anmerkung: Die Rauten stellen die gemittelte Arousal-Rate über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. Die einzelnen Punkte repräsentieren die Arousal-Rate für jede Versuchsperson. N = 37, ***p < 0,001, **p < 0,01, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Anhand Abbildung 43 wurde auch hier dargestellt, wie viele Versuchspersonen hypothesenkonforme Arousal-Raten (Low-Boom > Mach-Cut-off > Kontrolle), entgegengesetzte (hypothesenkonträre) Arousal-Raten zwischen zwei Bedingungen und entgegengesetzte Arousal-Raten über alle drei Bedingungen hinweg gezeigt haben. Neun Versuchspersonen zeigten hypothesenkonträre Trends über alle Bedingungen hinweg.

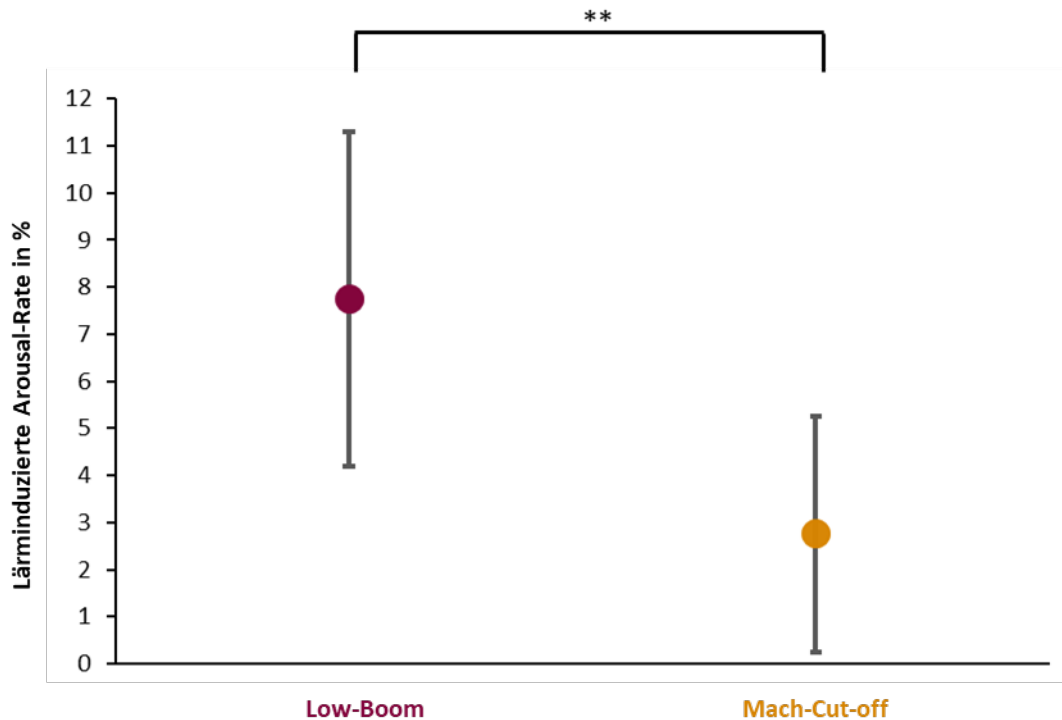
Abbildung 43: Trends der Arousal-Rate für jede Versuchsperson und jede Bedingung



Anmerkung: Die einzelnen Punkte repräsentieren die Arousal-Rate für jede Versuchsperson. N = 37, ***p < 0,001, **p < 0,01, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Nach Abzug der spontanen Arousal-Rate der Kontrollbedingung ergab sich für die Low-Boom-Bedingung eine mittlere lärminduzierte Arousal-Rate von 7,8 % (SE = 1,75) und für die Mach-Cut-off-Bedingung 2,8 % (SE = 1,23) (MDiff = 4,998; 95 %-CI [1,759; 8,238]; $p = 0,003$; Abbildung 44).

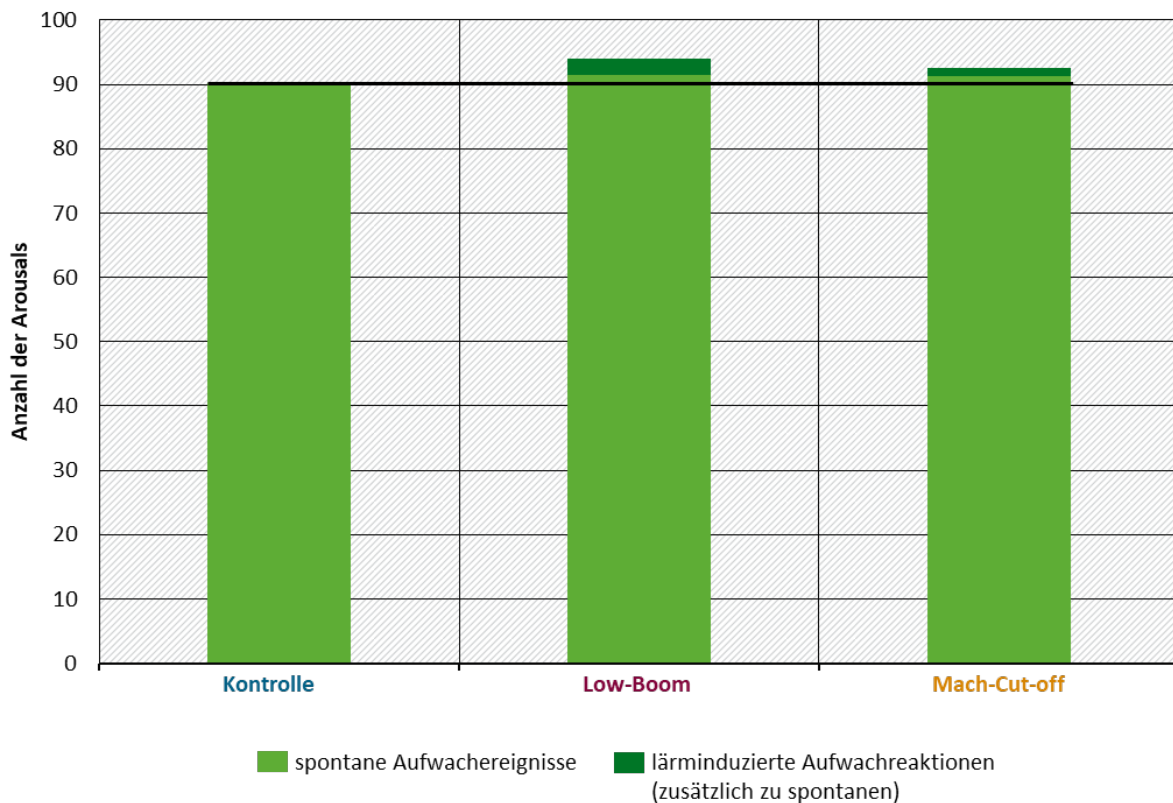
Abbildung 44: Lärminduzierte Arousal-Rate in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung



Anmerkung: Differenz zur Rate der jeweiligen Arousals in der Kontrollbedingung zunächst berechnet für jede Versuchsperson und anschließend akkumuliert über alle Versuchspersonen. Die Punkte stellen die gemittelte Arousal-Rate über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. $N = 37$, $**p < 0,01$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Von den in den Lärmbedingungen aufgetretenen Arousals (Low-Boom: 94,05; Mach-Cut-off: 92,46) waren durchschnittlich 2,65 durch Low-Boom-Ereignissen induziert und 1,11 durch Mach-Cut-off-Ereignisse. In der Kontrollbedingung traten im Durchschnitt 90,11 spontane Arousals auf. Abbildung 45 verdeutlicht, dass in beiden Lärmbedingungen die induzierten Aufwachreaktionen zusätzlich auftraten und keine spontanen Ereignisse ersetzt zu haben scheinen.

Abbildung 45: Gemittelte Anzahl der Arousals für die drei Bedingungen



Anmerkung: Die schwarze Linie stellt die durchschnittliche Anzahl der Arousals in der lärmfreien Kontrollnacht dar. N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Tabelle 13 sind die Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse zu entnehmen. Das Vorhersagemodell zeigt, eine signifikant höhere Arousal-Wahrscheinlichkeit für die Low-Boom-Bedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung. So wie für die Aufwachereignisse wurde auch hier das Schlafstadium in der Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis als weiterer Prädiktor selektiert. Im Vergleich zu S2 kamen Arousals weniger häufig vor, wenn es sich bei dem Schlafstadium um Tiefschlaf handelte, aber häufiger, wenn es sich um REMS handelte. Eine signifikante Interaktion zwischen der Bedingung und dem Schlafstadium in der (Referenz-)Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis verdeutlichte, dass sich die Wirkung des vorherigen Schlafstadiums zwischen den Bedingungen unterscheidet. Alle Effekte sind dabei relativ zur Referenzkombination *Kontrolle x S2* zu interpretieren. Für die Low-Boom-Bedingung zeigte sich, dass der Tiefschlaf im Vergleich zu S2 weniger stark protektiv wirkte als in der Kontrollbedingung. Das bedeutet, dass der durch Tiefschlaf normalerweise erwartbare Rückgang der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Arousals unter Low-Boom abgeschwächt ist. Dagegen war der Anstieg der Wahrscheinlichkeit für Arousals im REM-Schlaf unter Low-Boom geringer als in der Kontrollbedingung, was darauf hindeutet, dass REM-Schlaf unter Low-Boom weniger anfällig für Arousals war als erwartet. Für die Mach-Cut-off-Bedingung ergaben sich keine signifikanten Interaktionen mit dem Schlafstadium. Auch hier erreichte die Einbeziehung des Alters als weiterer Prädiktor keine Signifikanz und verbesserte die Modellgüte nicht.

Tabelle 13: Vorhersagemodell für die Arousal-Wahrscheinlichkeit

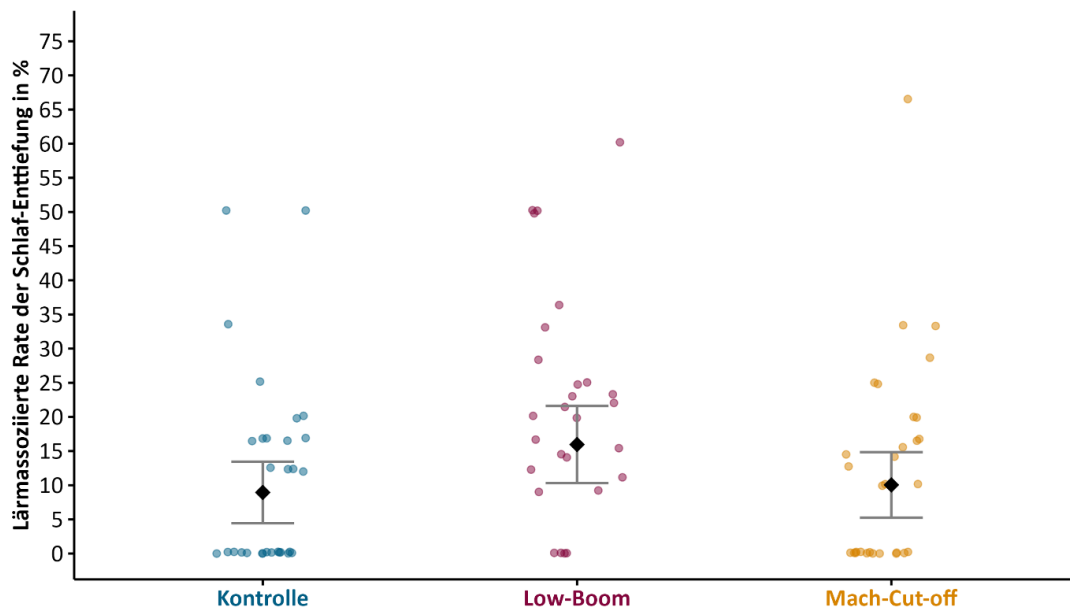
	Regressionskoeffizient	Odds Ratio (OR)	OR 95% KI (unterhalb - oberhalb)	p-Wert
Intercept	-2,425	0,088	0,067 - 0,117	< 0,001***
Bedingung: Kontrolle	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
Bedingung: Low-Boom	0,799	2,223	1,599 - 3,090	< 0,001***
Bedingung: Mach-Cut-off	0,310	1,363	0,964 - 1,928	0,080
StadiumVor: S2	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
StadiumVor: SWS	-1,346	0,260	0,111 - 0,609	0,002**
StadiumVor: REMS	0,759	2,137	1,405 - 3,250	< 0,001***
Bedingung: Kontrolle x StadiumVor: S2	Referenz	Referenz	Referenz	Referenz
Bedingung: Low-Boom x StadiumVor: SWS	1,578	4,844	1,929 - 12,162	0,001**
Bedingung: Mach-Cut-off x StadiumVor: SWS	0,778	2,178	0,800 - 5,924	0,127
Bedingung: Low-Boom x StadiumVor: REMS	-1,080	0,340	0,190 - 0,607	<0,001***
Bedingung: Mach-Cut-off x StadiumVor: REMS	-0,201	0,818	0,464 - 1,440	0,486

Anmerkung: Logistisches Regressionsmodell mit Random Intercept, N = 37, StadiumVor = Schlafstadium in der Epoche vor dem jeweiligen Lärmereignis, S2 = Stadium 2, REMS = REM-Schlaf, SWS = Tiefschlaf (S3 und S4), ***p < 0,001, **p < 0,01.

3.8.3.3 Schlaf-Enttiefungen

Da sich für die ereignisbezogene Analyse der Schlaf-Enttiefungen die Versuchspersonen in der Epoche vor dem Lärmereignis in S3 oder S4 befinden mussten, war die Anzahl der Lärmereignisse, die für die Analyse herangezogen werden konnten deutlich kleiner als die für die Analyse der Aufwachereignisse und Arousals. Im Mittel konnten ~ 7 Lärmereignisse (SD = 23,07) herangezogen werden (Kontrolle: M = 6,92; SD = 3,17; Mo. = 6; Low-Boom: M = 7,70; SD = 3,36; Mo. = 7; Mach-Cut-off: M = 7,43; SD = 2,69; Mo. = 10). Die Anzahl variierte zwischen 1 und 17 Lärmereignissen (Kontrolle: 1 – 17; Low-Boom: 1 – 14; Mach-Cut-off: 3 – 13). Die relative prozentuale Rate der Schlaf-Enttiefungen für jede Versuchsperson über die drei Bedingungen ist in Abbildung 46 dargestellt. Die ereignisbezogenen Analysen der Schlaf-Enttiefungen, also der Wechsel von Tiefschlaf (S3 oder S4) zu REM oder S2, für die Kontrollbedingung die niedrigste gemittelte Rate von 8,9 % (SE = 2,22), gefolgt von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 10 % (SE = 2,37) und der Low-Boom-Bedingung mit der höchsten Rate von 16 % (SE = 2,79). Der Unterschied zwischen den Bedingungen war jedoch statistisch nicht signifikant.

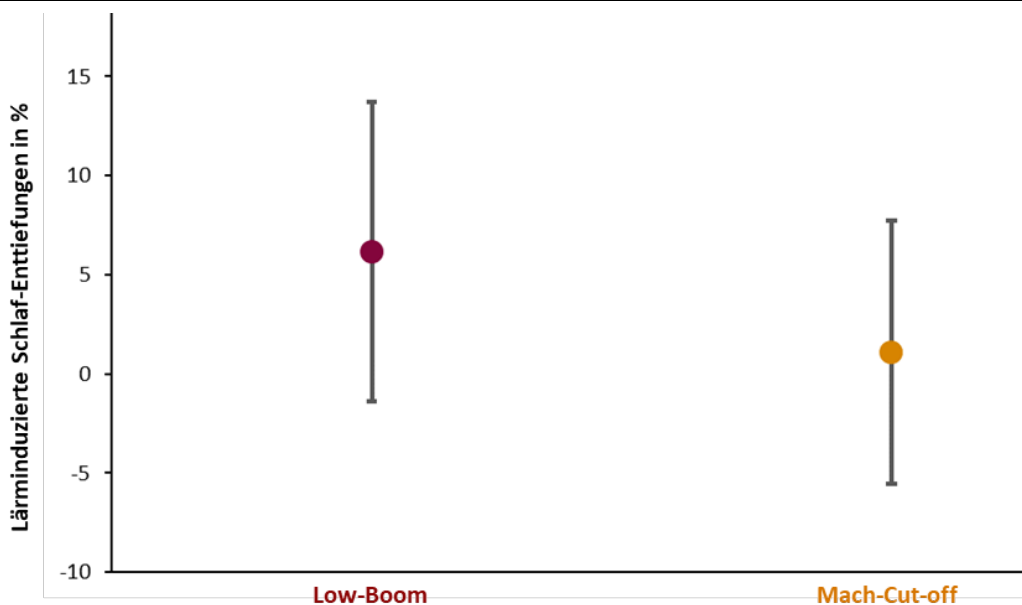
Abbildung 46: Relative Rate der lärmassoziierten Schlaf-Enttiefungen für jede Bedingung



Anmerkung: Die Rauten stellen die gemittelte Rate der Schlaf-Enttiefungen über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. Die einzelnen Punkte repräsentieren die Rate der Schlaf-Enttiefungen für jede Versuchsperson. N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Abbildung 47 veranschaulicht die Ergebnisse zur lärminduzierten Schlaf-Enttiefungen durch Abzug der spontanen Schlaf-Enttiefungen der Kontrollbedingung. Für die Low-Boom-Bedingung ergab sich eine mittlere lärminduzierte Rate von 6,2 % (SE = 3,71) und für die Mach-Cut-off-Bedingung eine Rate von 1,1 % (3,26). Der Unterschied war nicht signifikant.

Abbildung 47: Lärminduzierte Rate der Schlaf-Enttiefungen in der Low-Boom und Mach-Cut-off-Bedingung

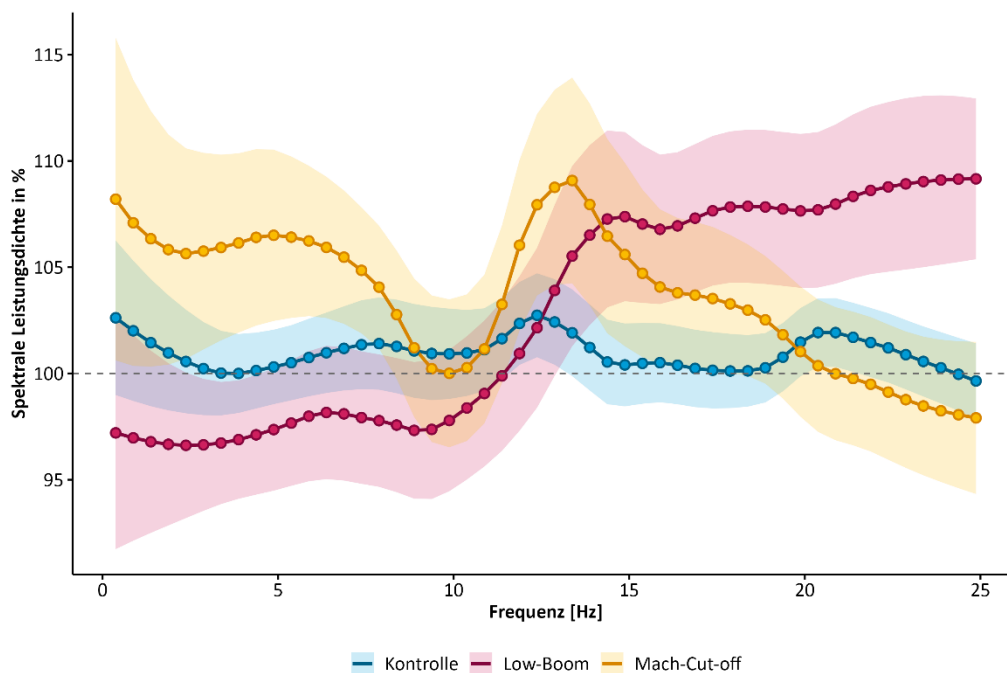


Anmerkung: Differenz zur Rate der jeweiligen Schlaf-Enttiefungen in der Kontrollbedingung zunächst berechnet für jede Versuchsperson und anschließend akkumuliert über alle Versuchspersonen. Die Punkte stellen die gemittelte Rate der Schlaf-Enttiefungen über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.8.3.4 Veränderungen im EEG-Spektrum

Die Enttiefung des NREMS in der ersten Minute unmittelbar nach einem Low-Boom-Ereignis zeigte sich deutlicher im EEG-Spektrum (Abbildung 48). In der Low-Boom-Bedingung war die spektrale Leistungsdichte im Delta-Frequenzband (0,5 – 4 Hz) abgesenkt sowohl im Vergleich zur Kontrollbedingung ($p < 0,05$) als auch im Vergleich zur Mach-Cut-off-Bedingung ($p < 0,001$). Der Unterschied zwischen Mach-Cut-off und Kontrolle war ebenfalls signifikant ($p < 0,02$). Weniger Power im Delta-Bereich weist auf einen weniger tiefen Schlaf hin. Dagegen zeigte sich im Beta-Band (16 – 25 Hz) nach Low-Boom eine Erhöhung sowohl verglichen mit Kontrolle ($p < 0,001$) als auch verglichen mit Mach-Cut-off ($p < 0,001$), während sich Kontrolle und Mach-Cut-off nicht unterschieden. Mehr Power im Beta-Bereich deutet auf einen gestörten Schlaf hin.

Abbildung 48: EEG-Leistungsdichte-Spektren im Non-REM-Schlaf in der ersten Minute nach einem Lärmereignis



Anmerkung: Gezeigt sind Mittelwerte pro 0,5 Hz Bin für die Kontroll- (dunkelblaue Linie), Low-Boom- (dunkelrote Linie) und die Mach-Cut-off-Bedingung (dunkelorange Linie) und \pm Standardfehler für die Kontroll- (hellblaue Fläche), Low-Boom- (hellrote Fläche) und Mach-Cut-off-Bedingung (hellorange Fläche). Die Werte der spektralen Leistungsdichte sind in jeder Bedingung als Prozent der jeweiligen Werte in der letzten Minute vor einem Lärmereignis dargestellt (grau-gestrichelte Linie), $N = 37$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.9 Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Schlaf

3.9.1 Makroparameter und EEG-Spektren im Non-REM-Schlaf

Die vorliegenden Ergebnisse geben erste Einblicke in die Wirkungen von Überschallknallen moderner ziviler Überschallflugzeuge auf die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität.

Auf Basis der aufgestellten Hypothesen wäre zu erwarten gewesen, dass die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität in der Low-Boom-Bedingung niedriger gewesen wäre als in der Kontrollbedingung. Stattdessen unterschied sich die Schlafqualität in der Low-Boom-Bedingung nicht von der Kontrollbedingung.

Daher konnte die folgende aufgestellte Teil-Hypothese zur Beurteilung der globalen Veränderungen in der Schlafarchitektur als sekundäre Zielgröße nicht bestätigt werden:

- ▶ Die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität über die gesamte Nacht, ausgedrückt anhand der Parameter a) Schlafeffizienz, b) Einschlafdauer, c) Anteil des Tiefschlafs an der im Bett verbrachten Zeit, d) Anteil der Wachliegezeit an der im Bett verbrachten Zeit, e) Anzahl der Aufwachereignisse ist in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der ruhigen Kontrollnacht.

In Bezug auf die Mach-Cut-off Bedingung konnte die folgende Hypothese nur teilweise bestätigt werden:

- ▶ Die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität über die gesamte Nacht, ausgedrückt anhand der Parameter a) Schlafeffizienz, b) Einschlafdauer, c) Anteil des Tiefschlafs, d) Anteil der Wachliegezeit an der im Bett verbrachten Zeit, e) Anzahl der Aufwachereignisse ist in der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Signalen niedriger als in der Nacht mit eingespielten Mach-Cut-off-Signalen.

Basierend auf den Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass über die ganze Nacht betrachtet die Anwendung des Mach-Cut-off-Flugverfahrens die negative Wirkung der Überschallknalle von zukünftigen Überschallflugzeugen nur in Bezug auf die TST und die Schlafeffizienz leicht abschwächen konnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Alter die Schlafeffizienz sinkt. Die jüngeren Versuchspersonen erreichten in allen drei Bedingungen eine höhere Schlafeffizienz als die älteren Versuchspersonen. Da keine Interaktion gefunden wurde, kann darauf geschlossen werden, dass die gefundenen Ergebnisse zur Schlafeffizienz für alle Altersklassen gelten.

Die Analysen zum Effekt der Studientage auf die Schlafparameter zeigte nur für den REMS eine signifikante Zunahme von der ersten zur dritten Nacht (ca. 11 Minuten), welche als gering eingestuft werden kann.

Der gefundene moderate Zusammenhang der selbst eingeschätzten mit der elektrophysiologisch gemessenen Schlafqualität reiht sich ein in bisherige Befunde. Die elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität kann nicht vollständig von der selbst eingeschätzten Schlafqualität wiedergegeben werden (z.B. Akerstedt et al. 2002; Edinger et al. 2000; Croy et al. 2017; Griefahn et al. 2006).

Auch zeigte sich kein signifikanter Effekt der Bedingungen auf die EEG-Spektren im NREMS. Damit konnte die folgende sekundäre Hypothese zur Beurteilung der EEG-Spektren über die gesamte Nacht nicht bestätigt werden:

- ▶ Die LWA im EEG des NREMS in der Low-Boom-Bedingung ist niedriger als die LWA in der ruhigen Kontrollnacht. Zudem ist die LWA im EEG des NREMS in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

Diese In-Sensitivität der Makroparameter und EEG-Spektren über die gesamte Nacht ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus Schlafstudien, in denen der Effekt von konventionellem Verkehrslärm (Flugzeug, Straße, Schiene) untersucht wurde (z. B. Basner, Müller & Elmenhorst 2011).

3.9.2 Lärmassoziierte Aufwachereignisse, Arousals, Schlaf-Enttiefungen und Veränderungen des EEG-Spektrums

Bereits seit einiger Zeit berichten Schlafforschende, dass nur wenige der Symptome aufgrund von Schlafstörungen durch Veränderungen in der Makrostruktur erklärt werden können und diskutieren die Unabhängigkeit von Veränderungen in der Makro- und Mikrostruktur. Es wird vermutet, dass Schlaf durch viele kurze Aufwachreaktionen und Arousals fragmentiert wird, was zu einer reduzierten Schlaferholung ohne relevante Veränderung in der Makrostruktur führt (Bonnet 1985; Bonnet 1986; Guilleminault et al. 1993).

Im Gegensatz zu der In-Sensitivität der Makroparameter gegenüber Überschallknallen zeigte die ereignisbezogene Analyse der Aufwachreaktionen und Arousals deutliche Unterschiede zwischen den Bedingungen. Sowohl die primäre Hypothese zur Beurteilung der Aufwachereignisse als auch die folgenden sekundären Hypothesen konnten demnach bestätigt werden.

Primäre Hypothese:

- ▶ Die prozentuale Aufwach-Rate in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die spontane Aufwach-Rate in der Kontrollbedingung ohne Lärmereignisse.

Sekundäre Hypothesen:

- ▶ Die prozentuale Aufwach-Rate in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Aufwach-Rate in der Mach-Cut-off-Bedingung.
- ▶ Die prozentuale Rate der EEG-Arousals in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Rate der spontanen EEG-Arousals in der ruhigen Kontrollnacht. Zudem ist die Arousal-Rate in der Low-Boom-Bedingung größer als die Rate in der Mach-Cut-off-Bedingung.
- ▶ Die LWA im EEG des NREMS unmittelbar, d. h. innerhalb 1 Minute, nach einem Low-Boom-Ereignis ist niedriger als die LWA in einer 1-minütigen ruhigen Situation der Kontrollbedingung. Zudem ist die LWA im EEG des NREMS 1 Minute nach einem Low-Boom-Ereignis niedriger als nach einem Mach-Cut-off-Ereignis.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass Low-Boom-Flugzeuge, trotz geringerer Lärmemissionen als konventionelle Überschallflugzeuge, zu Schlafstörungen führen können. Die Anwendung des Mach-Cut-off-Verfahrens kann diesen Effekt abschwächen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Personen durch die Lärmereignisse leichter aus S2 als aus dem Tiefschlaf geweckt werden und in S2 auch mehr Arousals auftreten. Für den REM-Schlaf ergab sich ein gemischtes Bild: ein erhöhtes Auftreten für Aufwachereignisse im Vergleich zu S2 aber ein geringeres Auftreten für Arousals. Buxton et al. (2012) begründen dies dadurch, dass sich die Wahrscheinlichkeit für solche Reaktionen über die phasischen und tonischen Komponenten dieser Schlafphase hinweg zu verändern scheinen und von der Art des Reizes abhängen. Da in den späteren Stunden REM-Schlaf und S2 überwiegen, ist die Wahrscheinlichkeit einer Aufwachreaktion in der zweiten Nachthälfte höher als in der ersten. Zudem zeigten die Ergebnisse, dass lärmbedingte Aufwachreaktionen spontane Aufwachereignisse ersetzen, dies für Arousals aber nicht zutrifft.

Im Gegensatz zu den ereignisbezogenen Enttiefungen des NREMS im EEG-Spektrum zeigten die Enttiefungen durch Schlafstadienwechsel keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Daher konnten die folgenden Hypothesen nicht bestätigt werden:

- ▶ Die prozentuale Rate der Schlaf-Enttiefungen, d. h. der Wechsel von S4 zu S3, S2 oder REM-Schlaf bzw. von S3 zu S2 oder REM-Schlaf, in der Low-Boom-Bedingung ist größer als die Rate der spontanen Enttiefungen in der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die Rate der Enttiefungen in der Low-Boom-Bedingung größer als in der Mach-Cut-off-Bedingung.

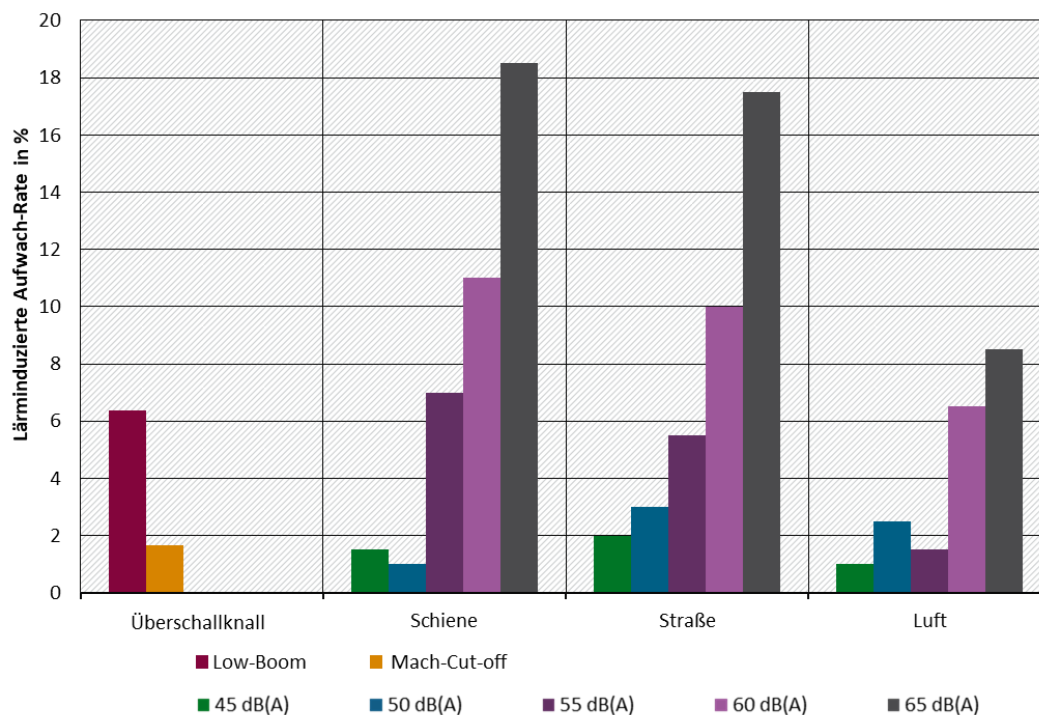
Für die Häufigkeit in Folge eines Überschallknalles zu erwachen wurde die lärminduzierte Aufwach-Rate (= lärmassoziierte Aufwach-Rate – spontane Aufwach-Rate) betrachtet. Lärminduzierte Aufwachreaktionen können entweder die entsprechenden spontanen Veränderungen, die ohnehin zur gleichen Zeit oder etwas später stattgefunden hätten, ersetzen oder über Nacht zu einer Erhöhung ihrer Gesamtzahl führen (d. h. zu zusätzlichen Reaktionen führen). Eine höhere Gesamtzahl dieser Aktivierungen führt zu einer allgemeinen Erhöhung des Erregungsniveaus und kann so den natürlichen Ablauf von Tiefschlaf (SWS, Tiefschlaf) und/oder den REM-Schlaf stören (Basner, Griefahn, van den Berg 2010).

Um die Auswirkungen von nächtlichen Überschallknallen auf den Schlaf einordnen zu können, wurde ein Vergleich zu den Wirkungen anderer Verkehrsträger gezogen. Das Versuchspersonenkollektiv der Vergleichs-Studien umfasste genau wie in der vorliegenden Studie (schlaf-)gesunde, altersentsprechend normalhörende Erwachsene. Die Altersspannen der einbezogenen Versuchspersonen in den Labor- und Feldstudien reichte von 18 bis 61 Jahre (M= 29,1; SD = 11,7; Sanok et al. 2022) und von 18 bis 77 Jahre (M = 44,1; SD = 16,1; Elmenhorst et al. 2024).

Die mittlere lärminduzierte Aufwach-Rate lag für Low-Boom-Ereignisse bei 6,4 %. Um in Laborstudien eine ähnlich hohe Aufwach-Rate für subsonischen, konventionellen Fluglärm zu erreichen, ist ein Maximalschalldruckpegel ($L_{AS,max}$) von ca. 60 dB erforderlich, wobei sich der Maximalpegel auf den, nahe am Ohr der im Bett liegenden Versuchsperson, eingespielten Pegel bezieht. Für Schienenlärm lag der entsprechende Pegel bei etwa 55 dB(A) und bei Straßenlärm zwischen 55 und 60 dB(A) (Basner, Müller & Elmenhorst 2011).

Für eine grobe Einordnung sind in Abbildung 49 die lärminduzierten Aufwach-Raten von Low Boom- und Mach-Cut-off-Ereignissen im Vergleich zu konventionellen Verkehrsträgern (Schiene, Straße, Luft) dargestellt. Als Vergleichswerte dienen die Aufwach-Raten bei den eingespielten Schalldruckpegeln von 45 bis 65 dB(A) von Basner, Müller und Elmenhorst (2011). Da in der Studie keine kontinuierliche Expositions-Wirkungskurve publiziert wurde, konnten nur Pegelbereiche geschätzt werden.

Abbildung 49: Vergleich der Aufwach-Raten durch Überschallknalle mit der Aufwach-Rate durch konventionelle Verkehrsträger



Anmerkung: Dargestellt ist der Vergleich der Aufwach-Rate durch Low-Boom- und Mach-Cut-off-Ereignisse mit der Aufwach-Rate durch Schienen-, Straßen- und Luftverkehr bei Maximalpegeln zwischen 45 und 60 dB(A) basierend auf einer Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011). Eigene Darstellung, DLR.

In Feldstudien lagen die erforderlichen Maximalpegel tendenziell höher, das bedeutet, dass Versuchspersonen im Feld in heimischer Umgebung tendenziell etwas weniger sensitiv gegenüber Verkehrslärm waren. Für Fluglärm waren in Feldstudien Pegel zwischen 60 (Basner & McGuire 2018) und 63 dB(A) (Elmenhorst et al. 2024; Müller 2021) und für Bahnlärm 58 dB(A) (Basner & McGuire 2018). Für Straßenverkehrslärm schwankte der erforderliche Pegel zwischen 58 dB(A) (Basner & McGuire 2018) und nicht mehr erfassbar (Sanok et al. 2022).

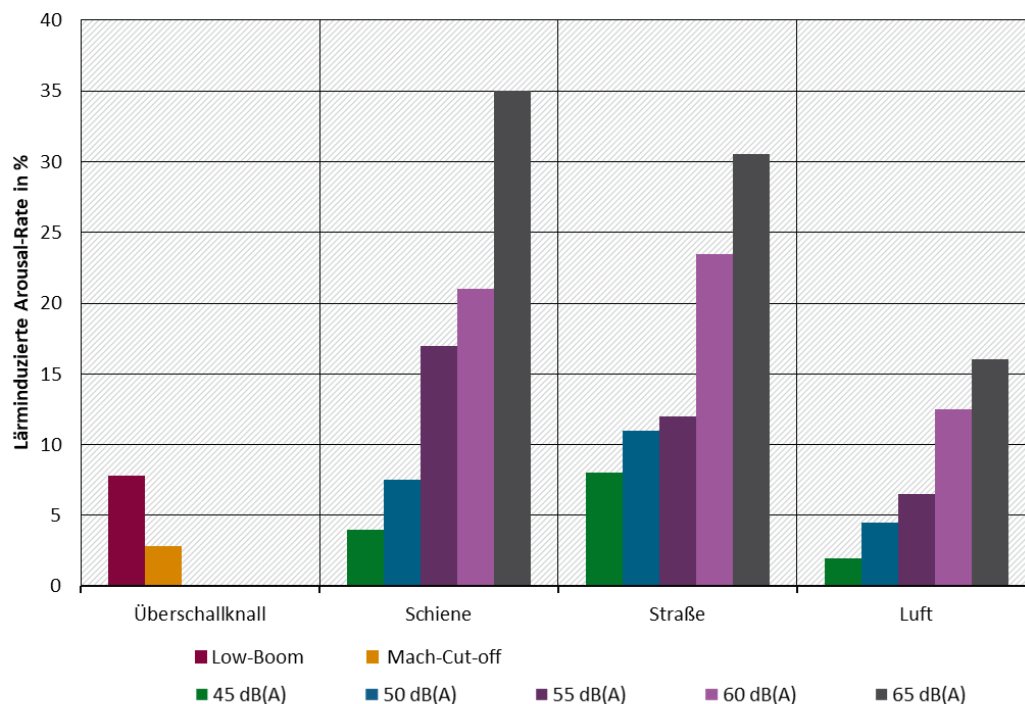
Die mittlere lärminduzierte Aufwach-Rate war mit 1,7 % für Mach-Cut-off-Ereignisse deutlich geringer, was sich in den für eine ähnlich hohe Aufwach-Rate erforderlichen Maximalpegeln konventioneller Verkehrsträger widerspiegelt. Für Flug- und Straßenlärm war in einer Laborstudie bei einem Pegel von 50 dB die Aufwach-Rate von 1,7 % bereits überschritten, für Bahnlärm lag der korrespondierende Pegel im Bereich zwischen 50 und 55 dB(A) (Basner, Müller und Elmenhorst 2011). In Feldstudien waren für eine vergleichbar hohe lärminduzierte Aufwach-Rate bei Fluglärm-Pegel zwischen 40 (Elmenhorst et al. 2024) und 45 dB(A) (Basner & McGuire 2018), bei Bahnlärm 41 dB und bei Straßenverkehrslärm zwischen 44 (Basner & McGuire 2018) und 64 dB(A) (Sanok et al. 2022).

Als zweiter Parameter der Schlaffragmentierung neben lärmbedingten Aufwachreaktionen werden im Folgenden EEG-Arousals betrachtet. Als Vergleichsgrundlage wurde die Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011) herangezogen, in der genau wie in der vorliegenden Studie die Wirkungen einzelner Verkehrslärmereignisse auf die Häufigkeit von Arousals untersucht wurden. Unter Berücksichtigung der spontanen Arousal-Rate in der Kontrollbedingung ergab sich in der vorliegenden Studie für die Low-Boom-Bedingung eine mittlere lärminduzierte Rate von 7,8 %. In der Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011) traten vergleichbare Raten bei Bahnlärm bei Maximalpegeln von 50 dB(A) auf. Bei

Straßenverkehrslärm war die Arousal-Rate von 7,8 % bereits bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) erreicht. Für Fluglärm lagen die, für eine vergleichbare Rate erforderlichen, Maximalpegel zwischen 55 und 60 dB(A). Die mittlere prozentuale Arousal-Rate für Ereignisse in der Mach-Cut-off-Bedingung betrug in der vorliegenden Studie 2,8 %. Eine entsprechende Rate wurde in der Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011) bei Bahn- und Straßenverkehrslärm bereits bei den niedrigsten eingespielten Pegeln von 45 dB(A) überschritten, wohingegen bei Fluglärm Maximalpegel zwischen 45 und 50 dB(A) erforderlich waren.

Erneut sind für eine grobe Einordnung in Abbildung 50 die lärminduzierten Arousal-Raten von Low-Boom- und Mach-Cut-off-Ereignissen im Vergleich zu konventionellen Verkehrsträgern bei eingespielten Pegeln von 45 bis 65 dB(A) dargestellt (Basner, Müller und Elmenhorst 2011).

Abbildung 50: Vergleich der Arousal-Rate durch Überschallknalle mit der Arousal-Rate durch konventionelle Verkehrsträger



Anmerkung: Dargestellt ist der Vergleich der Arousal-Rate durch Low-Boom- und Mach-Cut-off-Ereignisse mit der Arousal-Rate durch Schienen-, Straßen- und Luftverkehr bei Maximalpegeln zwischen 45 und 60 dB(A) basierend auf einer Laborstudie von Basner, Müller und Elmenhorst (2011). Eigene Darstellung, DLR.

Auf Grundlage von ereignisbezogenen Aufwachwahrscheinlichkeiten wurden bereits Lärmschutzkonzepte für den Flughafen Frankfurt, Leipzig/Halle und Zürich abgeleitet (Basner, Isermann & Samel 2006; Brink et al. 2010). Diese basieren auf Wahrscheinlichkeiten aufgrund von Einzelereignissen zu erwachen, wie sie auch in der vorliegenden Studie für Low-Boom-Ereignisse bestimmt wurden. Der Effekt von Low-Boom-Ereignissen auf die Aufwachwahrscheinlichkeit ist vergleichsweise geringer als der von konventionellen Fluglärmereignissen. Jedoch wäre die Anzahl der Betroffenen größer, da der Überschallknall während des gesamten Fluges mit Überschallgeschwindigkeit auftreten würde und einen großen Bereich (ca. 40 km zu beiden Seiten) unterhalb der Flugroute exponieren würde. Während Lärmexpositionen durch konventionelle Flugzeuge die Personen betrifft, die sich in Flughafennähe aufhalten, da sich das Flugzeug dort in geringer Höhe befindet und die höchsten Lärmmissionen durch Start- und Landevorgänge erzeugt werden. Die in der vorliegenden Studie gefundene lärminduzierte Aufwach-Rate von 6,4 % würde bedeuten, dass es bei etwa 16

Überflügen durch Low-Boom-Flugzeuge mit Überschallgeschwindigkeit pro Nacht zu einer lärminduzierten Aufwachreaktion kommen könnte. Jedoch muss bei dieser Annahme berücksichtigt werden, dass die in Laborstudien gefundene Effekte, aufgrund einer schlechteren Schlafqualität im Vergleich zu der in Feldstudien, etwas überschätzt werden. Zudem sind die Ergebnisse nur bedingt übertragbar auf die Allgemeinbevölkerung, da in dieser Studie ausschließlich gesunde und altersentsprechend normal hörende Versuchspersonen untersucht wurden. Der Einfluss von Alter und Geschlecht wurde berücksichtigt, zeigte aber keinen Effekt. In dieser Studie wurden keine durch Überschallknalle zusätzlich verursachten Expositionen wie Rattle (Deutsch: *Klappern*) und Vibration berücksichtigt, die sehr wahrscheinlich zu größeren Effekten führen werden als die alleinige Lärmexposition.

3.10 Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand

3.10.1 Herzratenvariabilität

Ein Überblick zur deskriptiven Statistik der einzelnen HRV-Parameter in den drei Bedingungen findet sich in Tabelle 14. Die Analysen mittels LLM zeigten keinen signifikanten Effekt der Bedingung auf die HRV-Parameter (alle $p > 0,05$).

Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Herzratenvariabilität (HRV) in den einzelnen Bedingungen

HRV-Parameter	Kontrolle M (SE)	Low-Boom M (SE)	Mach-Cut-off M (SE)
Gemittelttes RR-Intervall (ms)	910,89 (18,08)	914,96 (19,15)	907,90 (17,45)
SDNN (ms)	44,17 (2,86)	46,62 (2,71)	46,26 (2,66)
RMSSD (ms)	40,58 (3,08)	41,32 (2,95)	40,10 (2,76)
VLF (ms ²)	162,88 (21,93)	208,88 (31,48)	196,43 (22,30)
LF (ms ²)	1146,60 (181,04)	1256,38 (203,42)	1292,65 (218,67)
HF (ms ²)	807,85 (141,67)	821,75 (123,70)	773,14 (126,13)
LF/HF-Ratio (%)	2,03 (0,24)	2,41 (0,35)	2,44 (0,29)

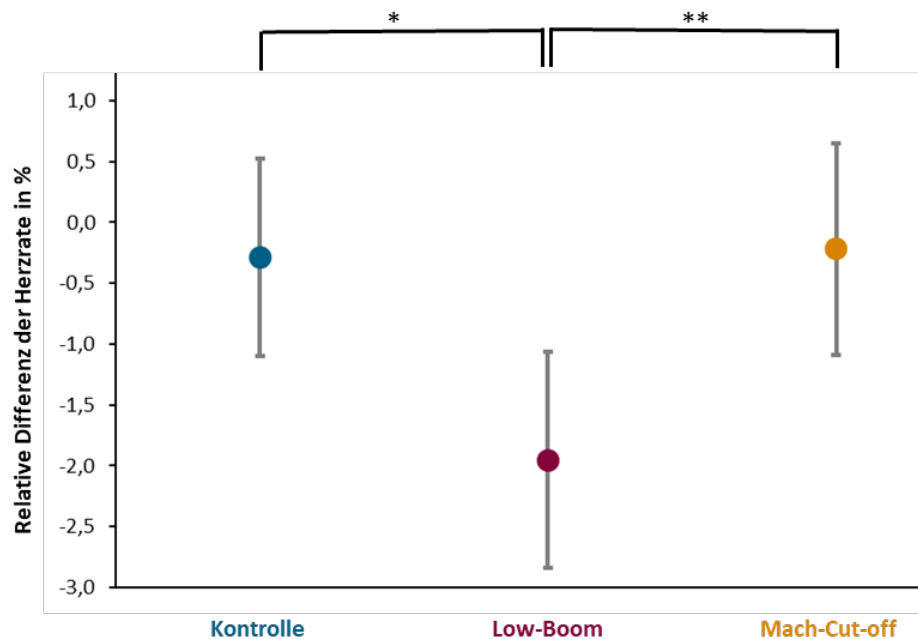
Anmerkung: N = 36.

3.10.2 Herzrate

Überraschenderweise zeigten die Analysen zur Herzrate negative Differenz-Werte über alle Bedingungen. Negative Differenz-Werte deuten darauf hin, dass die Herzrate vor den Lärmereignissen höher war als nach den Lärmereignissen. In Abbildung 51 ist die prozentuale Veränderung der Herzrate als Differenz zwischen der über 10 Sekunden gemittelten Herzrate vor den Lärmereignissen und der über 10 Sekunden gemittelten Herzrate nach den Lärmereignissen dargestellt. Das LMM und die anschließenden paarweisen Vergleiche zeigten eine signifikant höhere Differenz für die Low-Boom-Bedingung im Vergleich zur Kontroll- (MDiff = 1,666; 95%-CI [0,026; 3,307]; $p = 0,030$) und Mach-Cut-off-Bedingung (MDiff = 1,736; 95%-CI

[0,352; 3,119]; $p = 0,008$). Im Vergleich zur Kontrollbedingung mit einer Reduktion von 0,3 % (SE = 0,41) und zur Mach-Cut-off-Bedingung mit 0,2 % (SE = 0,44), verringerte sich die Herzrate nach Einspielung eines Low-Boom-Ereignisses im Mittel kurzzeitig um ca. 2 % (SE = 0,45). In der Low-Boom-Bedingung lag die über 10 Sekunden gemittelte Herzrate bei 67,42 bpm und sank gemittelt über die 10 Sekunden nach dem Lärmereignissen auf 65,96 bpm.

Abbildung 51: Prozentuale Veränderung der Herzrate nach den Lärmereignissen für jede Bedingung

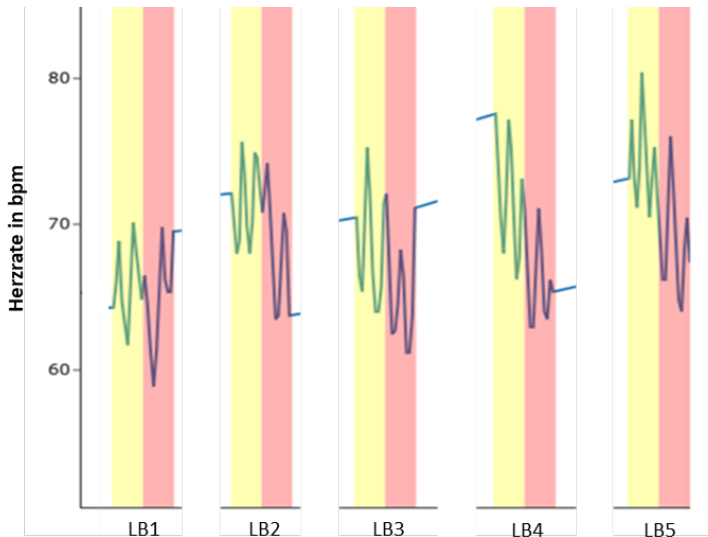


Anmerkung: Differenz zwischen der über 10 Sekunden gemittelten Herzrate vor den Lärmereignissen und der gemittelten Herzrate in den 10 Sekunden nach den Lärmereignissen. Die Punkte stellen die gemittelte Differenz der Herzrate über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. Aufgrund fehlender Werte einer Versuchsperson ergab sich für die Mach-Cut-off-Bedingung $N = 36$ und für die Kontroll- und Low-Boom-Bedingung $N = 37$, $**p < 0,01$, $*p < 0,05$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

In Abbildung 52 ist ein repräsentativer Verlauf der Herzrate von einer Versuchsperson in der Low-Boom-Bedingung mit einem Abfall der Herzrate unmittelbar nach Einspielung der Lärmereignisse dargestellt.

Die Hinzunahme weiterer Faktoren (Alter, Geschlecht, Reihenfolge der Bedingungen, Position der Lärmereignisse) in das Rohmodell führten zu keiner Verbesserung des AIC und zeigten keinen signifikanten Zusammenhang mit der Herzrate ($p > 0,05$).

Abbildung 52: Beispiel für den Verlauf der Herzrate unter Einspielung von Low-Boom-Ereignissen

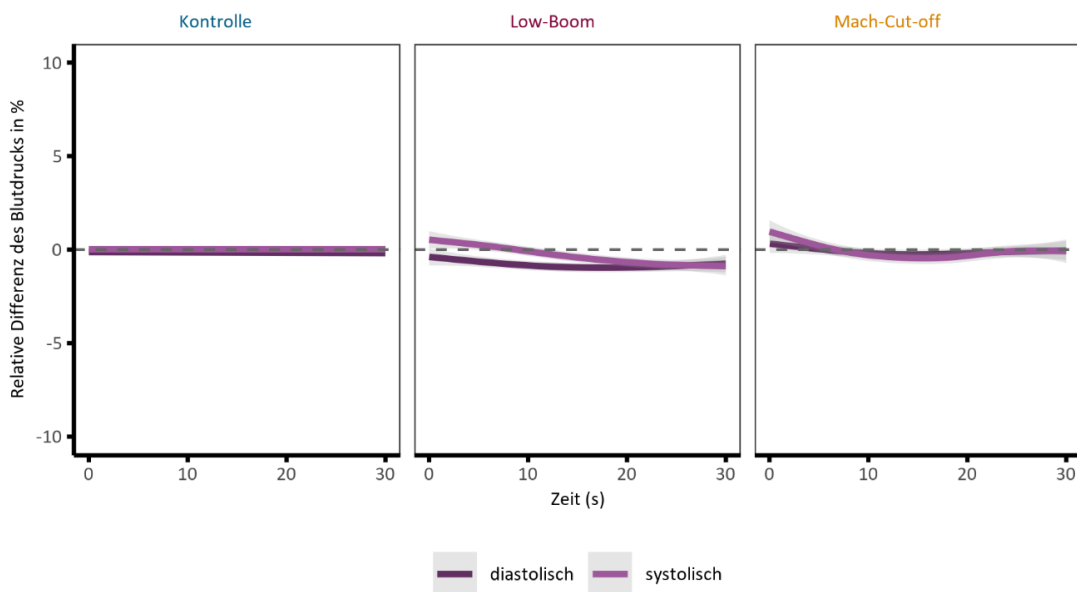


Anmerkung: LB1 bis LB5 repräsentieren die 5 eingespielten Low-Boom-Ereignisse. Der gelbe Bereich stellt den Verlauf der Herzrate 10 Sekunden vor dem Lärmereignis dar und der rote Bereich den Verlauf 10 Sekunden nach dem Lärmereignis.
Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.10.3 Blutdruck

Die Analyse zeigte, dass sich die relativen Differenzen zwischen den Bedingungen nicht signifikant unterschieden ($p > 0,05$). In Abbildung 53 ist die prozentuale Veränderung des diastolischen und systolischen Blutdrucks als Differenz zwischen dem mittleren Blutdruck vor den Lärmereignissen und den Blutdruckwerten in den 30 Sekunden nach den Lärmereignissen dargestellt.

Abbildung 53: Prozentuale Veränderung des Blutdrucks nach den Lärmereignissen für jede Bedingung



Anmerkung: Differenz zwischen dem über 30 Sekunden gemittelten Blutdruck vor den Lärmereignissen und den Blutdruckwerten in den 30 Sekunden nach den Lärmereignissen. Die grau-gestrichelte Linie stellt den über 30 Sekunden gemittelten Blutdruck vor den Lärmereignissen dar. Der graue Bereich bildet das 95 %-Konfidenzintervall ab. $N = 21$, $s =$ Sekunden, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.11 Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der physiologischen Messungen im Wachzustand

Die Untersuchung der HRV ermöglicht es, herauszufinden, ob und wie das autonome Nervensystem durch Lärm beeinträchtigt wird. Auch bei gesunden Menschen liegen große interindividuelle Unterschiede sowie geschlechtsspezifische Unterschiede in der HRV vor, die sich zudem mit dem Alter verändert (Nunan, Sanderock & Brodie 2010; Bonnemeier et al. 2003). Zudem wird die HRV auch durch die Atmung, den Barorezeptorreflex, Veränderungen im Gefäßtonus und das endokrine System beeinflusst (Shaffer & Ginsberg 2017). Die normalen Werte für gesunde Personen weisen daher eine große Bandbreite auf. Auf Basis eines systematischen Reviews stellten Nunan, Sanderock und Brodie (2010) für einige HRV-Parameter Normwerte aus Kurzzeitmessungen (Messungen über ca. 5 min.) zur Verfügung (Mittelwerte, Spanne min - max: IBI (ms) 926, 785 – 1160; SDNN (ms) 50, 32 – 93; RMSSD (ms), 42, 19 – 75; LF (ms²) 519, 193 – 1009; HF (ms²) 657, 83 – 3630; LF/HF-ratio 2,8, 1,1 – 11,6). In der vorliegenden Studie lagen mit Ausnahme der LF-Werte, die die angegebene Spanne in allen Bedingungen nach oben überschritten, alle HRV-Werte im normalen Bereich. Keiner der HRV-Parameter zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen. Auch andere Studien in denen die Wirkung von Lärm auf die HRV untersucht wurde fanden keine signifikanten Effekte (z. B. Manohare et al. 2022; Veternik et al. 2018; Stockfelt et al. 2022; Alves et al. 2018).

Die Ergebnisse zur Analyse der Herzrate waren überraschend. Während sich die Herzrate in der Kontrollbedingung, wie erwartet, vor und nach einem supponierten Lärmereignis nicht änderte und dies auch in der Mach-Cut-off-Bedingung nicht der Fall war, sank die Herzrate zunächst nach einem eingespielten Low-Boom-Ereignis. Auch wenn diese Ergebnisse nicht erwartet wurden, lassen sie sich doch erklären. Akustischer Lärm ruft sowohl eine direkte (d. h. über subkortikale Verbindungen des Gehirns) als auch eine indirekte (d. h. über Weiterleitung sensorischer Informationen vom auditorischen Thalamus zum auditorischen Kortex) Stressreaktion hervor. Dabei wird das Gleichgewicht des autonomen Nervensystems (ANS) aufgrund erhöhter Aktivität im sympathischen Nervensystemzweig und verringerter Aktivität im parasympathischen Nervensystemzweig gestört, die beide die alltäglichen Schwankungen der Herzrate steuern (Eriksson, Pershagen & Nilsson 2019). Eine erhöhte sympathische Kontrolle führt zu einem langsamen (ca. 5 s Verzögerung) Anstieg der Herzrate (Draghici & Taylor 2016), während eine erhöhte parasympathische Kontrolle zu einem schnellen (innerhalb von Millisekunden) Abfall der Herzrate führt (Glick, Braunwald & Lewis 1965). In einer Laborstudie untersuchten Shoushtarian et al. (2019) den Zusammenhang zwischen kurzfristiger Lärmbelastung und akuten Reaktionen des Herz-Kreislauf-Systems. Sie fanden heraus, dass kurze Lärmereignisse (18 s) mit 15 und 40 dB(A) im Vergleich zur Baseline zu einer Verringerung der Herzfrequenz führten, während Lärmereignisse mit 65 und 90 dB(A) zu einer signifikanten Erhöhung der Herzfrequenz führten. Ähnlich wie in der vorliegenden Studie verringerte sich die mittlere Herzrate gegenüber dem Ausgangswert bei einem Lärmpegel von 15 dBA um 1,6 %. Shoushtarian et al. (2019) interpretierten dies als Folge einer schnell einsetzenden Orientierungsreaktion, die durch das Einsetzen von Lärm geringer Intensität ausgelöst wird (Graham & Clifton 1966). Während Abwehr- und Schreckreaktionen auf intensive Reize auftreten und ein Schutzreflex sind, der mit Schmerzempfindungen verbunden ist, erhöht die Orientierungsreaktion die Sensibilität beim Zuhören und erleichtert die Aufnahme sensorischer Informationen. Letztere tritt nachweislich bei jeder erkennbaren Veränderung auf, einschließlich Beginn oder Ende eines Reizes (Smith & Strawbridge 1969). Die Ergebnisse legen nahe, dass die Low-Boom-Ereignisse aufgrund ihrer Charakteristik im Wachzustand nicht zu Schreck- und Abwehrreaktionen geführt haben, sondern eher zu einer Aktivierung der Aufmerksamkeit. Zudem wussten die Versuchspersonen, dass es sich um eine Studie zur

Wirkung von Umgebungslärm handelte und waren darauf vorbereitet, dass Geräusche eingespielt werden.

In Bezug auf den systolischen und den diastolischen Blutdruck im Wachzustand zeigten sich in der vorliegenden Studie keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen. Die Ergebnisse einer Studie von Manohare et al. (2022) lassen darauf schließen, dass Schreckreaktionen und damit ein Abfall der Herzratenvariabilität und ein Anstieg der Herzrate eher mit lauten Stimuli wie z. B. lautes, abruptes Hupen einhergehen. Die in der vorliegenden Studie eingespielten Überschallknalle sind eher mit dem dumpfen Zuschlagen einer Tür vergleichbar, und scheinen keine nachweisbaren Schreckreaktionen hervorgerufen zu haben.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse konnten demnach die folgenden Hypothesen nicht bestätigt werden:

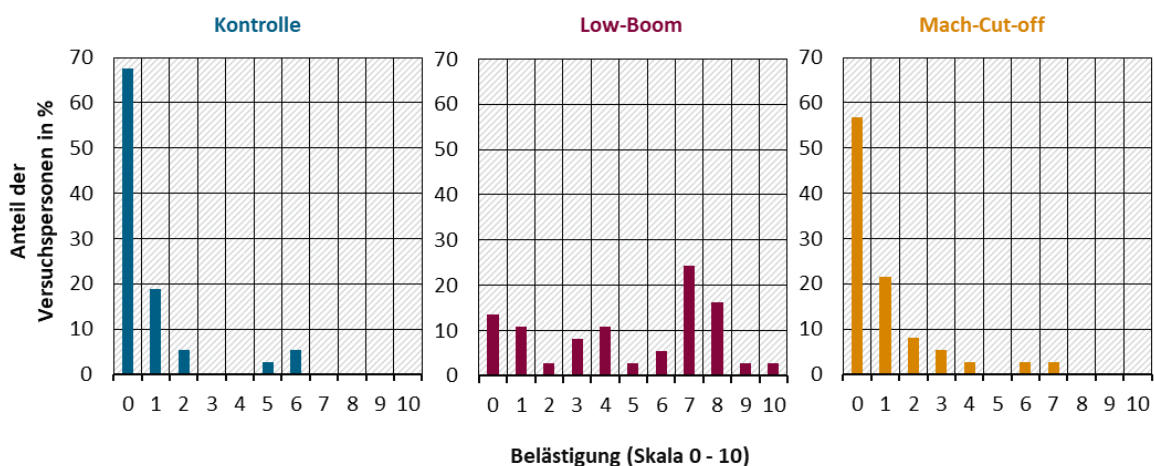
- ▶ Die Herzratenvariabilität (HRV) ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen niedriger als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist die Herzratenvariabilität während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen niedriger als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.
- ▶ Die Herzrate ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist die Herzratenvariabilität während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.
- ▶ Der Blutdruck ist im Wachzustand während der Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als in einer gleich langen geräuschlosen Kontrollperiode. Des Weiteren ist der Blutdruck während gleich langer Perioden bei Einspielung von Low-Boom-Signalen höher als bei Einspielung von Mach-Cut-off-Signalen.

3.12 Ergebnisse der subjektiven Beurteilung

3.12.1 Kurzzeitbelästigung

Abbildung 54 zeigt die Verteilung der Kurzzeit-Belästigung für die drei verschiedenen Bedingungen. Während in der Kontroll- und in der Mach-Cut-off-Bedingung der Großteil der Versuchspersonen angab, nicht belästigt zu sein (0) und das Maximum bei 6 bzw. 7 der Skala lag, verteilten sich die Antworten in der Low-Boom-Bedingung über die gesamte Skala.

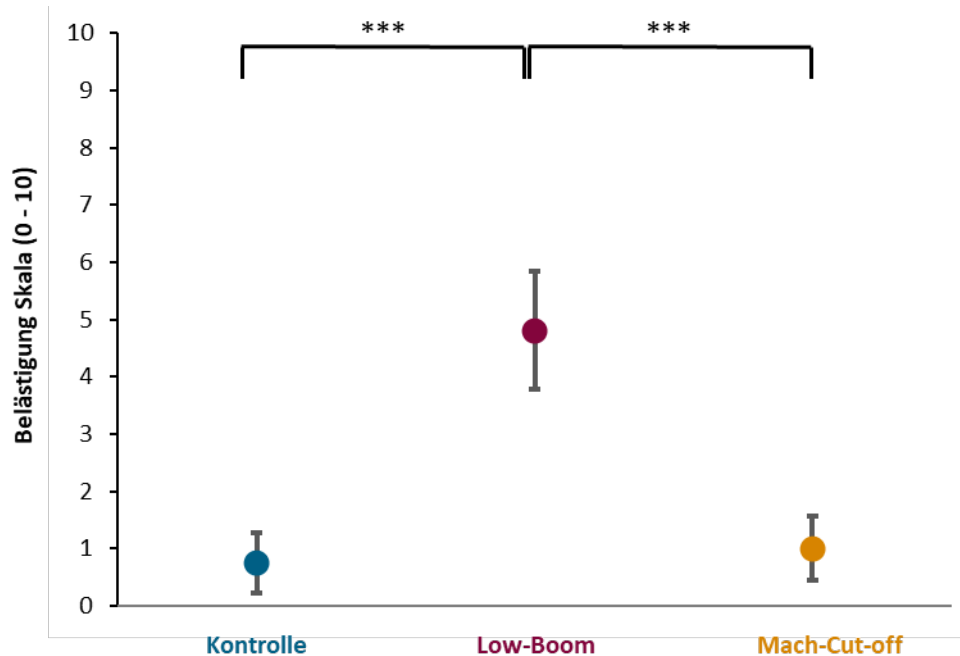
Abbildung 54: Prozentuale Verteilung der Kurzzeit-Belästigung für die drei Bedingungen



Anmerkung: N = 37, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Abbildung 55 veranschaulicht den Effekt der Bedingung auf die Kurzzeit-Belastigung und zeigt die Mittelwerte für die Bedingungen. Gemittelt über die Stichprobe ergab sich die höchste Belastigung durch die Low-Boom-Bedingung mit einem Wert von 4,8 (SE = 0,51) auf der Skala von 0 bis 10, gefolgt von der Mach-Cut-off-Bedingung mit 1,0 (SE = 0,28) und der Kontrollbedingung mit der Bewertung von 0,8 (SE = 0,26). Das LLM und die anschließenden paarweisen Vergleiche zeigten, dass sich die Low-Boom-Bedingung signifikant von der Kontroll- (MDiff = 4,054; 95 %-CI [2,974; 5,134]) und der Mach-Cut-off-Bedingung (MDiff = 3,811; 95 %-CI [2,803; 4,819]) unterschied (beide $p < 0,001$).

Abbildung 55: Effekt der Bedingung auf die Kurzzeit-Belastigung



Anmerkung: Die Punkte stellen die gemittelte Belastigung über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. N = 37, *** $p < 0,001$, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Ausgehend von dem Rohmodell ergab sich die beste Modellgüte für die Hinzunahme der Kontroll- und Copingfähigkeit und der Gewöhnungsfähigkeit als relevante Faktoren neben der Bedingung zur Aufklärung der Varianz in den Belastigungsurteilen (Tabelle 15). Eine niedrige selbst eingeschätzte Fähigkeit Lärm zu bewältigen und sich an Lärm zu gewöhnen ging mit einer höheren Belastigung einher. Die subjektive Schlafqualität korrelierte zwar signifikant mit der Kurzzeit-Belastigung, trug aber nicht zur Verbesserung der Modellgüte bei.

Tabelle 15: Lineares gemischtes Modell zur Belästigung anhand der Bedingung

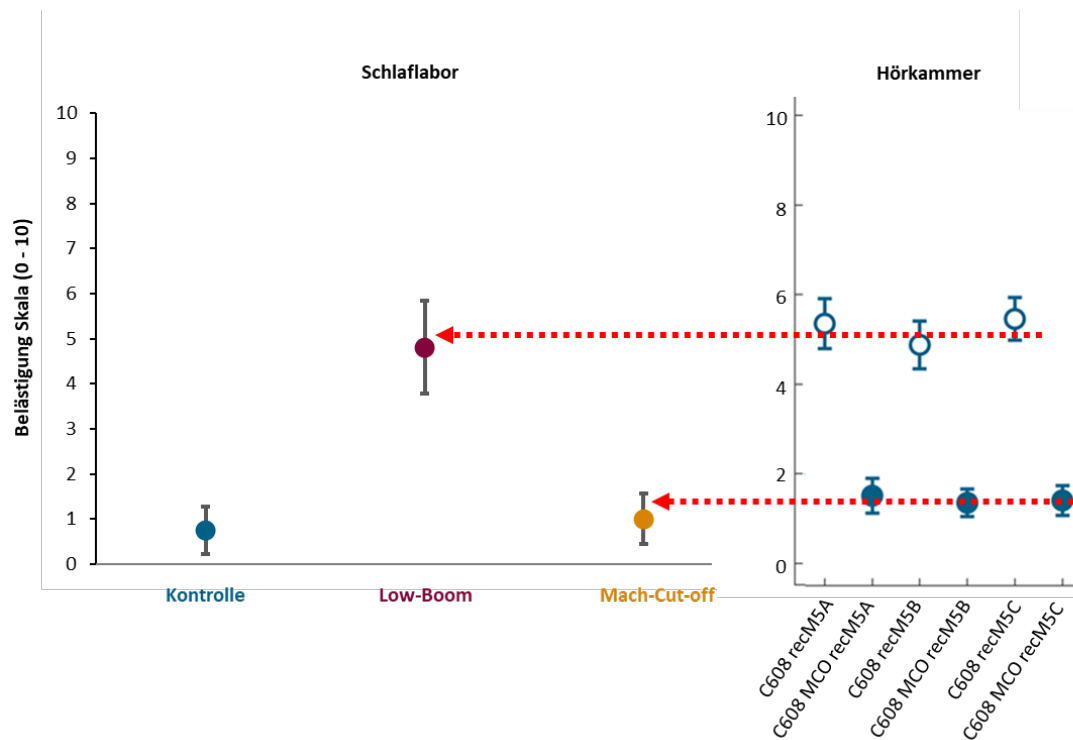
Parameter	Regressionskoeffizient (SE)	p-Wert	AIC nach Hinzunahme
Intercept	5,779 (1,285)	< 0,001***	
Bedingung: Kontrolle	Referenz	Referenz	489
Bedingung: Low-Boom	4,054 (0,450)	< 0,001***	
Bedingung: Mach-Cut-Off	0,243 (0,450)	0,590	
Kontroll- und Copingfähigkeit	-0,147 (0,053)	0,010*	481
Gewöhnungsfähigkeit	-0,605 (0,350)	0,092	478

Anmerkung: Gemischtes lineares Modell mit random intercept, ***p < 0,001, *p < 0,05, SE = Standardfehler, N = 37.

Ein LMM mit den Studientagen (1 bis 3) als unabhängige Variable zeigte, dass die Belästigung nach der ersten Nacht sowohl im Vergleich zur zweiten Nacht (MDiff = 2,108; 95 %-CI (0,683; 3,533)) als auch im Vergleich zur dritten Nacht (MDiff = 2,189; 95 %-CI (0,662; 3,715)) signifikant niedriger war (beide p = 0,003). Die Belästigung unterschied sich nicht zwischen der zweiten und dritten Nacht. Da es sich bei der ersten Nacht um die Kontrollbedingung handelte, sind diese Ergebnisse konsistent mit unseren Erwartungen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die Randomisierung der beiden Bedingungen mit Lärm (Low-Boom, Mach-Cut-off) erfolgreich war und damit ein Reihenfolgeeffekt vermieden werden konnte. Die Lärmbelästigung stieg demnach nicht mit zunehmender Dauer der Lärmbelastung.

Ebenso wie in der beschriebenen Schlafstudie wurden die Versuchspersonen in dem Hörexperiment der Universität Oldenburg, anhand einer 11-stufigen Skala (0 = „überhaupt nicht“ bis 10 = „äußerst“) gefragt, wie belästigend sie die Geräusche fanden (Fields et al. 2001). Abbildung 56 zeigt die Mittelwerte der Kurzzeitbelästigung für die jeweils in der Nacht eingespielten 40 Low-Boom- (C608) und Mach-Cut-off-Signaturen (C608 MCO) erhoben im Schlaflabor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (links) und die Mittelwerte der Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die Aufnahmen der in den drei Räumen des Schlaflabors (A, B, C) wiedergegebenen Signaturen erhoben in der Druckkammer der Universität Oldenburg (rechts). Der direkte Vergleich lässt erkennen, dass die Mittelwerte trotz der unterschiedlichen Laborsettings (Schlaflabor versus Druckkammer) im ähnlichen Wertebereich lagen: das Kurzzeitbelästigungsurteil der Low-Boom-Bedingung im Schlaflabor lag im Mittel bei ca. 4,8 und das Lästigkeits-Urteil für die C608-Aufnahmen bei etwa 5,3; das Kurzzeitbelästigungsurteil der Mach-Cut-off-Bedingung im Schlaflabor lag bei 1,0 und das Lästigkeits-Urteil für die C608-Mach-Cut-off-Aufnahme bei etwa 1,4.

Abbildung 56: Vergleich der Kurzzeitbelästigungs-Mittelwerte für die Low-Boom und Mach-Cut-off-Signaturen im Schlaflabor und in der Druckkammer

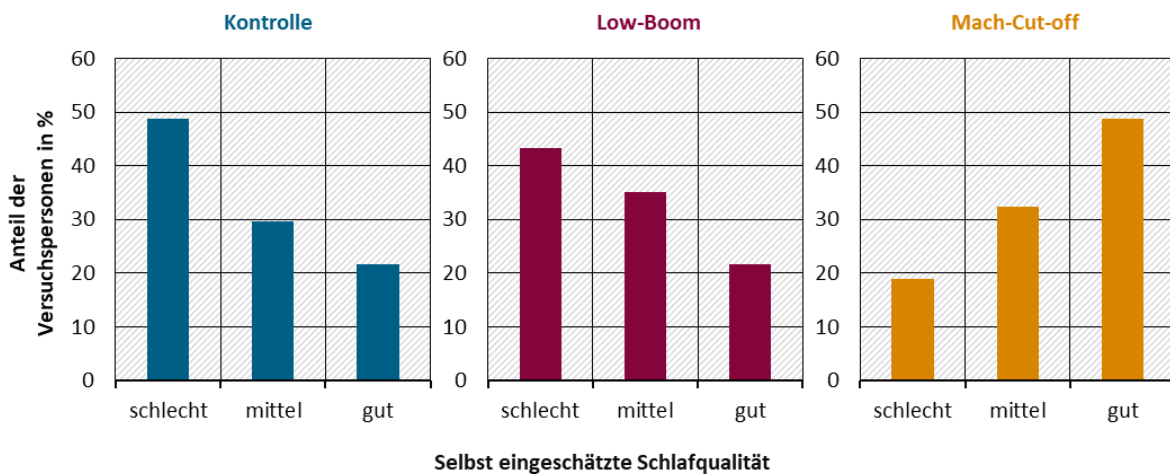


Anmerkung: links: Kurzzeitbelästigung für die im Schlaflabor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt eingespielten Low-Boom- (C608) und Mach-Cut-off-Signaturen (C608 MCO). Die Punkte stellen die gemittelte Belästigung über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. *** $p < 0,001$, $N = 37$; rechts: Kurzzeit-Lästigkeitsurteile für die in der Druckkammer der Universität Oldenburg wiedergegebenen Aufnahmen (recM5) der drei Räume des Schlaflabors (A, B, C). Die Punkte stellen die gemittelte Lästigkeit über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken die Standardfehler. $N = 19$; Quelle: eigene Darstellung, DLR.

3.12.2 Selbst eingeschätzte Schlafqualität und morgendliche Schläfrigkeit

Um die Verteilung der selbst eingeschätzten Schlafqualität über die drei Bedingungen grafisch besser darstellen zu können, wurden die Daten in drei Perzentile aufgeteilt: schlechte (6 – 29), mittlere (30 – 38) und gute (39 – 58) Schlafqualität (Abbildung 57). Während nach der Low-Boom-Bedingung ein größerer Anteil von 43,2 % an Versuchspersonen angab, schlecht geschlafen zu haben, wurde die Schlafqualität nach der Mach-Cut-off-Bedingung von 48,7 % überwiegend gut beurteilt. Überraschenderweise ergab sich sowohl innerhalb der Kontrollbedingung als auch über die drei Bedingungen hinweg, der höchste Anteil von 48,7 % an Versuchspersonen, die ihren Schlaf als schlecht beurteilten.

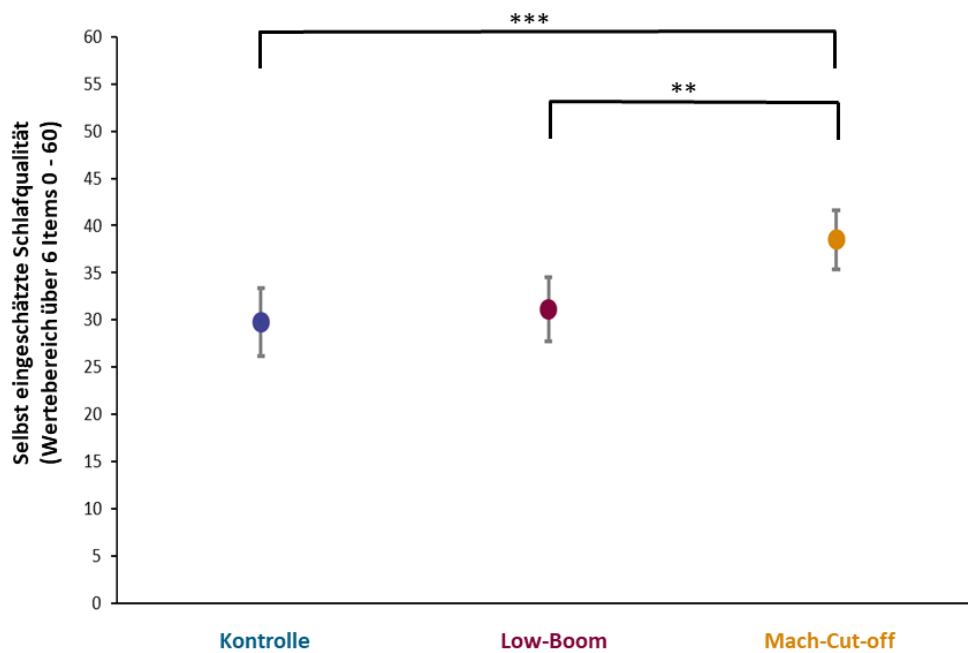
Abbildung 57: Prozentuale Verteilung der selbst eingeschätzten Schlafqualität unterteilt in drei Perzentile für die drei Bedingungen



Anmerkung: N = 37, SQ = Schlafqualität, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Abbildung 58 zeigt den Effekt der Bedingung auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität und die Mittelwerte. Gemittelt über die Stichprobe ergab sich auf der Skala von 0 bis 60, überraschenderweise, der niedrigste Wert von 29,8 (SE = 1,77) und damit die schlechteste Einschätzung der Schlafqualität durch die Kontrollbedingung, gefolgt von der Low-Boom-Bedingung mit einem Wert von 31,1 (SE = 1,68) und der Mach-off-Bedingung mit dem höchsten Wert von 38,5 (SE = 1,54). In dem Rohmodell gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Low-Boom- und der Kontrollbedingung. Jedoch zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Mach-Cut-off- und der Kontrollbedingung. Zudem gab es einen signifikanten Unterschied zwischen der Low-Boom- und der Mach-Cut-off-Bedingung. Die paarweisen Vergleiche zur Mach-Cut-off-Bedingung zeigten, dass die Schlafqualität sowohl nach der Kontrollbedingung (MDiff = 8,730; 95 %-KI (3,726; 13,734); $p < 0,001$) als auch nach der Low-Boom-Bedingung (MDiff = 7,351; 95 %-KI (2,681; 12,021); $p = 0,002$) signifikant schlechter eingeschätzt wurde.

Abbildung 58: Effekt der Bedingung auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität



Anmerkung: Die Punkte stellen die gemittelte selbst eingeschätzte Schlafqualität über alle Versuchspersonen dar und die Fehlerbalken das 95 %-Konfidenzintervall. N = 37, *** = p < 0,001, ** = p < 0,01, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Die beste Modellgüte ergab sich mit der Hinzunahme der selbst eingeschätzten Ein- und Durchschlafschwierigkeiten durch die Polysomnographie und/oder der Laborumgebung (*Schlafstörung durch Setting*) (Tabelle 16). Eine schlechte Schlafqualität korrelierte mit der Angabe, sich durch die Polysomnographie und/oder der Laborumgebung gestört gefühlt zu haben.

Tabelle 16: Lineares gemischtes Modell zur selbst eingeschätzten Schlafqualität anhand der Bedingung, Referenz: Kontrollbedingung

Parameter	Regressionskoeffizient (SE)	p-Wert	AIC nach Hinzunahme
Intercept	31,131 (1,720)	<0,001***	
Bedingung: Kontrolle	Referenz	Referenz	817
Bedingung: Low-Boom	1,226 (2,058)	0,553	
Bedingung: Mach-Cut-off	8,577 (2,058)	<0,001***	
Schlafstörung durch Setting: nein	Referenz	Referenz	808
Schlafstörung durch Setting: Ja	-5,649 (2,343)	0,018*	

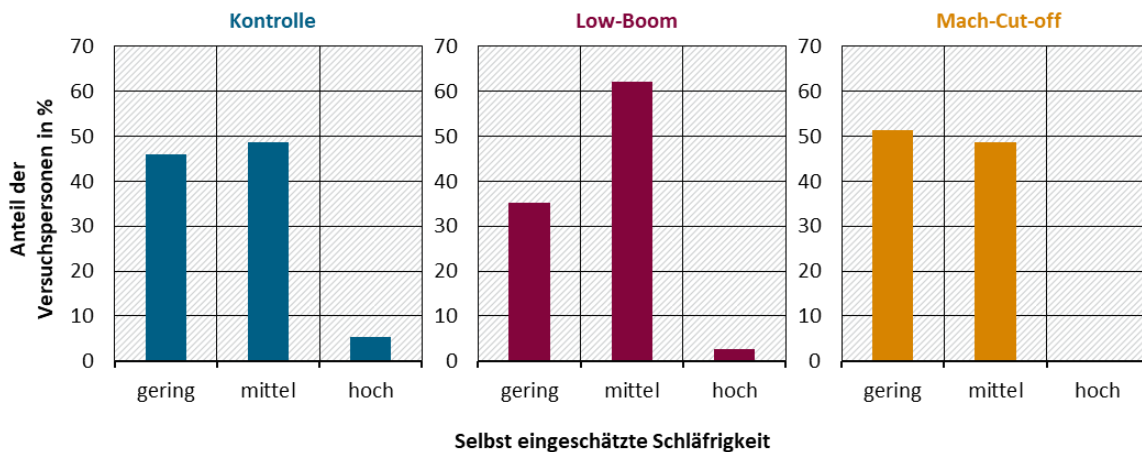
Anmerkung: Gemischtes lineares Modell mit Random Intercept, N = 37, *** = p < 0,001, * = p < 0,05, SE = Standardfehler.

Um zu kontrollieren, ob sich mit zunehmender Dauer im Labor die selbst eingeschätzte Schlafqualität der Versuchspersonen veränderte, wurde analog zur Kurzzeit-Belästigung, ein gemischtes Rohmodell mit den Studientagen (1 - 3) als unabhängige Variable erstellt. Auch hier zeigte sich, dass die Schlafqualität nach der ersten Nacht im Vergleich zur dritten Nacht (MDiff =

6,351; 95 %-KI (0,982; 11,720); $p = 0,018$) signifikant schlechter beurteilt wurde. Die Einschätzung der Schlafqualität unterschied sich jedoch nicht zwischen der zweiten und dritten Nacht ($p > 0,05$).

Da laut Akerstedt und Gillberg (1990) KSS-Werte > 7 auf eine hohe Schläfrigkeit und Werte < 4 auf eine geringe Schläfrigkeit hinweisen, wurden die Daten zur selbst eingeschätzten morgendlichen Schläfrigkeit in drei Gruppen unterteilt: geringe (1 – 3), mittlere (4 – 7) und hohe (8 – 9) Schläfrigkeit. Abbildung 59 ist zu entnehmen, dass nach der Kontrollbedingung die Schläfrigkeit fast zu gleichen Anteilen als gering (46 %) und als mittel (48,7 %) und, überraschenderweise, zu einem kleinen Teil mit 5,1 % sogar als hoch eingestuft wurde. Nach der Low-Boom-Bedingung schätzte der Großteil der Versuchspersonen von 62,2 % die Schläfrigkeit als mittel ein und zu einem geringen Prozentsatz von 2,7 % als hoch. Nach der Mach-Cut-off-Bedingung wurde die Schläfrigkeit von keiner der Versuchspersonen als hoch beurteilt und der Großteil von 51,4 % gab eine geringe Schläfrigkeit an.

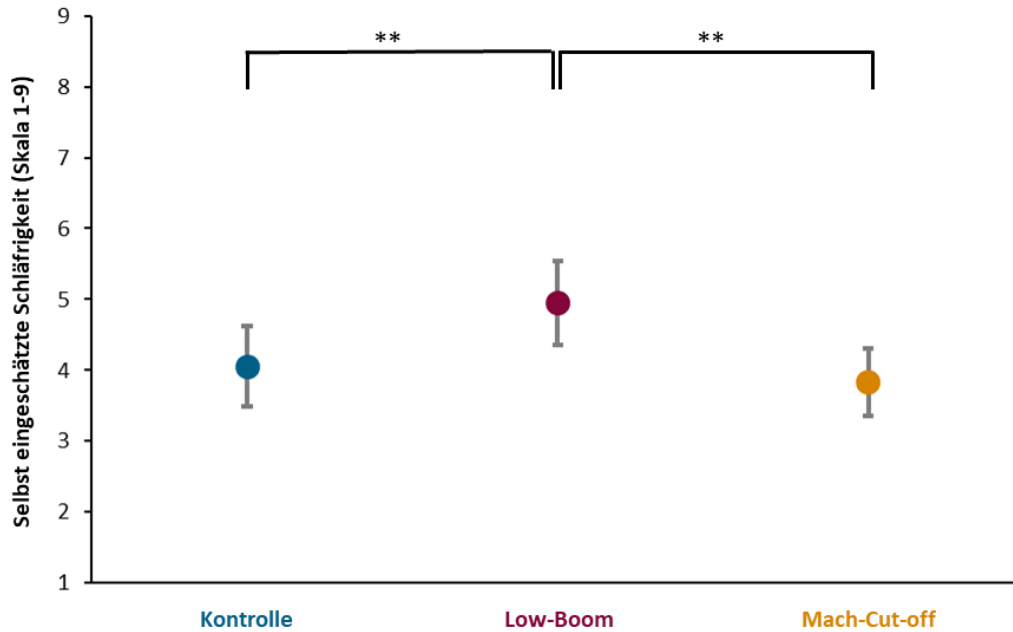
Abbildung 59: Prozentuale Verteilung der selbst eingeschätzten Schläfrigkeit (KSS) unterteilt in drei Gruppen für die drei Bedingungen



Anmerkung: N = 37, SQ = Schlafqualität, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

In Abbildung 60 werden die Mittelwerte für die drei Bedingungen dargestellt. Auf der Skala von 1 bis 9 ergab sich die höchste selbst eingeschätzte Schläfrigkeit für die Low-Boom-Bedingung mit einem Wert von 5,0 (SE = 0,29), gefolgt von der Kontrollbedingung mit 4,1 (SE = 0,28) und der Mach-Cut-off-Bedingung mit einem Wert von 3,8 (SE = 0,23). Das Rohmodell und die paarweisen Vergleiche zeigten eine signifikant höhere Einschätzung der Schläfrigkeit nach der Low-Boom- als nach der Kontrollbedingung (MDiff = 0,892; 95 %-CI [0,211; 1,573]; $p = 0,008$) und als nach der Mach-Cut-off-Bedingung (MDiff = 1,108; 95 %-CI [0,378; 1,838]; $p = 0,003$).

Abbildung 60: Effekt der Bedingung auf die selbst eingeschätzte morgendliche Schläfrigkeit (KSS)



Anmerkung: N = 37, Fehlerbalken bilden das 95 %-Konfidenzintervall, ** = p < 0,01, Quelle: eigene Darstellung, DLR.

Ausgehend von dem Rohmodell wurde auch hier die iterative Hinzunahme derselben potentiellen Prädiktoren getestet wie für das Modell zur selbst eingeschätzten Schlafqualität. Da die selbst eingeschätzte Schlafqualität eine mittlere Korrelation mit der Schläfrigkeit aufwies ($r = 0,36$, $p < 0,001$), wurde diese ebenfalls als Kovariable getestet und führte zur höchsten Modellgüte (Tabelle 17). Je schlechter die Versuchspersonen die Schlafqualität einschätzten, desto höher beurteilten sie die Schläfrigkeit. Obwohl die selbst eingeschätzte Schlafqualität auch mit der Bedingung korrelierte (siehe Tabelle 16) konnte eine kritische Kolinearität ausgeschlossen werden ($VIF < 10$).

Tabelle 17: Lineares gemischtes Modell zur Vorhersage der selbst eingeschätzten Schläfrigkeit (KSS) anhand der Bedingung, erweitertes Modell, Referenz: Kontrollbedingung

Parameter	Regressionskoeffizient (SE)	p-Wert	AIC nach Hinzunahme
Intercept	5,749 (0,483)	< 0,001***	
Bedingung: Kontrolle	Referenz	Referenz	415
Bedingung: Low-Boom	0,970 (0,280)	0,001**	
Bedingung: Mach-Cut-off	0,281 (0,304)	0,359	
Selbst eingeschätzte Schlafqualität	-0,057 (0,014)	< 0,001***	406

Anmerkung: Gemischtes lineares Modell mit random intercept, *** = p < 0,001, ** = p < 0,01, SE = Standardfehler, N = 37.

3.13 Schlussfolgerung anhand der Ergebnisse der subjektiven Beurteilung

Die vorliegenden Ergebnisse geben erste Einblicke in die Wirkungen von Überschallknallen zukünftiger ziviler Überschallflugzeuge auf die Kurzzeit-Belästigung. Zudem wird auch bei diesen neuartigen Überschallknallen die Bedeutung von nicht-akustischen Faktoren im

Belästigungsurteil deutlich. In der vorliegenden Studie zeigte sich die selbst eingeschätzte Fähigkeit Lärm zu bewältigen und sich an Lärm zu gewöhnen relevant für die Belästigung. Diese Ergebnisse sind konsistent zu denen aus Studien zu anderen konventionellen Verkehrslärmquellen (Weidenfeld et al. 2021; Bartels et al. 2022; Guski 1999).

Die folgende sekundäre Hypothese konnten anhand der Resultate bestätigt werden:

- ▶ Die lärmbedingte Kurzzeit-Belästigung ist nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der ruhigen Kontrollnacht. Des Weiteren ist die Kurzzeit-Belästigung nach der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Signalen höher als nach der Nacht mit eingespielten Mach-Cut-off-Signalen.

Demnach können die Lärmimmissionen der Low-Boom-Flugzeuge Belästigungsreaktionen im mittleren Bereich hervorrufen, auch wenn sie im Vergleich zu konventionellen Überschallflugzeugen geringer sein werden. Die Anwendung des lärm mindernden Mach-Cut-off-Flugverfahrens während eines Überland-Fluges mit einem Low-Boom-Flugzeug könnte Belästigungsreaktionen hingegen reduzieren.

Zudem geben die Ergebnisse erste Einblicke in die Wirkungen von Überschallknallen auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität und die Schläfrigkeit am Morgen. Anhand der Ergebnisse zur Kurzzeit-Belästigung und der aufgestellten Hypothesen wurde erwartet, dass die selbst eingeschätzte Schlafqualität in der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Signalen schlechter ist als in der Kontrollbedingung und dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Kontroll- und der Mach-Cut-off-Bedingung gibt. Stattdessen wurde die Schlafqualität nach der Low-Boom-Bedingung und der Kontrollbedingung ähnlich beurteilt, während sie für die Mach-Cut-off-Bedingung vergleichsweise besser ausfiel. Zur vergleichsweise schlechten Schlafqualität in der Kontrollbedingung könnte ein Reihenfolgeeffekt beigetragen haben. Während die beiden Lärmbedingungen randomisiert wurden, war die Kontrollbedingung immer als erste Studiennacht angesetzt, um mögliche Carry-Over-Effekte der Lärmwirkung auf die folgenden Nächte zu vermeiden. Trotz einer Adaptationsnacht bzw. Probenacht im Labor vor der eigentlichen Studie konnte somit ein Reihenfolgeeffekt in Bezug auf die subjektive Schlafqualität nicht komplett ausgeschlossen werden. Die vorliegenden Ergebnisse lassen sich mit denen von früheren Studien vergleichen (z. B. Akerstedt et al. 2002, Edinger et al. 2000), wonach die objektiv gemessene Schlafqualität meist von der subjektiven Einschätzung abweicht.

In den Resultaten zur Beurteilung der Schläfrigkeit spiegelten sich die Ergebnisse zur selbst eingeschätzten Schlafqualität jedoch nicht wider. Hier verursachte die Low-Boom-Bedingung eine leicht erhöhte Schläfrigkeit im Vergleich zur Kontroll- und Mach-Cut-off-Bedingung. Die Zunahme der selbst eingeschätzten Schlafqualität verbesserte die Modellgüte.

Aufgrund der Ergebnisse konnte die folgende aufgestellte Teil-Hypothese nicht bestätigt werden:

- ▶ Die von den Versuchspersonen selbst eingeschätzte Schlafqualität ist in der Low-Boom-Bedingung niedriger als in der ruhigen Kontrollnacht.

Die folgenden Teil-Hypothesen konnten jedoch bestätigt werden:

- ▶ Die selbst eingeschätzte Schlafqualität ist in der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Signalen niedriger als in der Nacht mit den eingespielten Mach-Cut-off-Signalen.
- ▶ Die morgendliche Schläfrigkeit ist nach der Low-Boom-Bedingung höher als nach der ruhigen Kontrollnacht.

- ▶ Die morgendliche Schläfrigkeit ist nach der Nacht mit eingespielten Low-Boom-Signalen höher als nach der Nacht mit eingespielten Mach-Cut-off-Signalen.

Obwohl die Lärmimmissionen der Low-Boom-Flugzeuge im Vergleich zu konventionellen Überschallflugzeugen geringer sein werden, scheinen sie dennoch eine leicht erhöhte Schläfrigkeit am Morgen hervorzurufen. Zudem kann geschlossen werden, dass die Anwendung des Mach-Cut-off-Flugverfahrens die negative Wirkung der Überschallknalle von zukünftigen Überschallflugzeugen auf die selbst eingeschätzte Schlafqualität abschwächen kann.

4 Arbeitspaket 3 - Entwicklung und Anwendung von Zumutbarkeitskriterien

Die Entwicklung und Anwendung von Zumutbarkeitskriterien beinhalteten die folgenden Arbeitsschritte:

- 1) ausführliche Recherche und -auswertung der nationalen und internationalen, einschlägigen Fachliteratur über die Lärmwirkungen von zivilen Überschallflügen;
- 2) das Verfolgen laufender nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten zu dem Thema;
- 3) das Aufgreifen und die Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie (Kapitel 3.7 bis 3.12);
- 4) daraus ableitend die Erarbeitung eines Vorschlags für Kriterien, um die Zumutbarkeit von Überschallknallen durch zukünftige zivile Überschallflugzeuge für die Bevölkerung in Europa zu beurteilen.

4.1 Literaturanalyse

4.1.1 Literaturanalyse nach dem Konzept von ‚Scoping Reviews‘

Die vorgesehene ausführliche Literaturanalyse wurde methodisch an die Vorgehensweise eines ‚Scoping Reviews‘ angelehnt (von Elm, Schreiber & Haupt 2019). Die in einem Scoping Review vorgesehenen Schritte lauten (von Elm, Schreiber & Haupt 2019):

1. Zielsetzung, Fragestellung(en) des Reviews;
2. Ein- und Ausschlusskriterien der Literatursuche;
3. Vorgehen bei der Literatursuche (Fachdatenbanken, Suchstrings);
4. Darstellung der Ergebnisse:
 - a) Literatursuche: Anzahl/Art eingeschlossener Literatur, Anzahl ausgeschlossener Literatur und Ausschlussgründe,
 - b) extrahierte Information aus der eingeschlossenen Literatur;
5. Zusammenfassung von und Schlussfolgerung aus den Ergebnissen.

4.1.2 Zielsetzung und Fragestellung der Literaturanalyse

Die Fragestellung für die Literaturanalyse in diesem Projekt wurde anhand des PEOS-Systems (Population, Exposition, *Outcomes* [Wirkungszielvariablen/Ergebnisse], Studiendesign) formuliert (Freiberg et al. 2019), welches sich wiederum an dem PECO-System (Population, Exposition, *Comparator* [Kontrollbedingung], *Outcomes*) orientiert (Morgan et al. 2018). D. h., die Fragestellung bezieht sich auf die zu untersuchende Population, die Exposition (Art, Intensität, Charakteristik, etc.), die zu betrachtenden Wirkungen und schließlich das Studiendesign und gegebenenfalls hierauf bezogene Vorgaben zu Mindestanforderungen.

Die Fragestellung nach der PEOS-Einteilung, welche die Literatursuche in diesem Projekt leitete, ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Fragestellung der Literaturanalyse aufgegliedert nach der PEOS-Einteilung (Freiberg et al. 2019)

Population	Bei welcher Population (z. B. Studierende, Bevölkerung, Angehörige von [Militär-]Flugplätzen) ...
Exposition	... haben Überschallgeräusche künftiger ziviler Überschallflugzeuge (Low Sonic Booms) sowie die Geräusche von Überschallüberflügen nach dem Mach-Cut-off-Verfahren ...
Outcome	... welche relevanten Lärmwirkungen auf die Tages- und Nachtzeit...
Studiendesign	... und mit welchem Studiendesign (Laborstudie, Feldexperiment, Simulation, etc.) wurde dies untersucht?

4.1.3 Ein- und Ausschlusskriterien der Literatúrauswahl

Für die Auswahl der Literatur wurden im nächsten Schritt Ein- und Ausschlusskriterien definiert (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Ein- und Ausschlusskriterien für die Literatúrauswahl

	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Population	Menschen (Bevölkerung, Anwohnende, Studierende bzw. Uni-Angehörige, Angehörige von Armee/Luftfahrt, Militäreinrichtungen, Flugplätzen)	Tiere, Gebäude
Exposition	Low-Sonic-Boom-Signaturen, (herkömmliche) Sonic-Boom-Signaturen (sogenannte N-Wave-Signaturen), soweit im Hinblick auf Low-Sonic-Boom-Fragestellung (adaptiert) verwendet; Mach-Cut-off-Signaturen, en-route Überschallflugeräusche	andere Expositionen, z. B. Fluglärm von im Unterschallgeschwindigkeitsbereich fliegenden Flugzeugen, Geräusche von LTO-Flügen (LTO = Landing, Take-off Operations), sonstige andere Lärmquellen, Luftschadstoffemissionen von Überschallflugzeugen
Outcomes	Schlafstörungen (selbstberichtet, physiologisch), Lärmbelästigung, Störungen von Aktivitäten, kognitive Leistung, physiologische, psychologische Akutreaktionen (Stressreaktionen, Schreckreaktionen), sonstige für Überschallgeräusche relevante Lärmwirkungen	Gebäudeschäden, monetäre Wirkungen
Studiendesign	Längsschnittstudie, Querschnittsstudie, Laborstudie, Laborexperiment, Feldexperiment, Simulationsstudie, Review	

4.1.4 Vorgehen bei der Literatúrsuche (Fachdatenbanken, Suchstrings)

Für die Literaturanalyse wurde die relevante Literatur systematisch in relevanten Fachdatenbanken recherchiert. Die Suche bezog sich einerseits auf die Thematik der Überschallknalle und des „Low Sonic Booms“ und dessen Wirkungen, andererseits auf Literatur zur Geräuschwirkung von „Mach-Cut-off Flügen“. Es wurde nach deutscher und englischer Literatur anhand von folgenden Suchbegriffen gesucht:

- ▶ Deutsch: (Überschall **OR** Schall **OR** Mach **OR** X-59 **OR** LBFD¹) **AND** (Flug **OR** Knall **OR** Betrieb **OR** Spur) **AND** (Belästigung **OR** Schlaf **OR** Störung **OR** kardio **OR** Herzkreislauf **OR** psychisch **OR** kognitiv **OR** Hör **OR** Reaktion **OR** Gesundheit **OR** Wahrnehmung **OR** Empfindung **OR** erschrecken)
- ▶ Englisch: (low-sonic **OR** sonic **OR** supersonic **OR** low-boom **OR** Mach-Cut **OR** Mach cut **OR** X-59 **OR** LBFD) **AND** (flight **OR** boom **OR** thump **OR** operation **OR** aircraft **OR** signature) **AND** (annoyance **OR** sleep **OR** disturbance **OR** cardiovascular **OR** mental **OR** cognitive **OR** hearing **OR** reaction **OR** response **OR** health **OR** perception **OR** startle)

Die Suche erfolgte in den Datenbanken PsychINFO, Psynindex, und PubMed. Darüber hinaus erfolgte die Suche in BASE (Bielefeld Academic Search Engine), in der auch „graue“ Literatur gut recherchiert werden kann (Dissertationen, Forschungsberichte, Tagungsbeiträge).

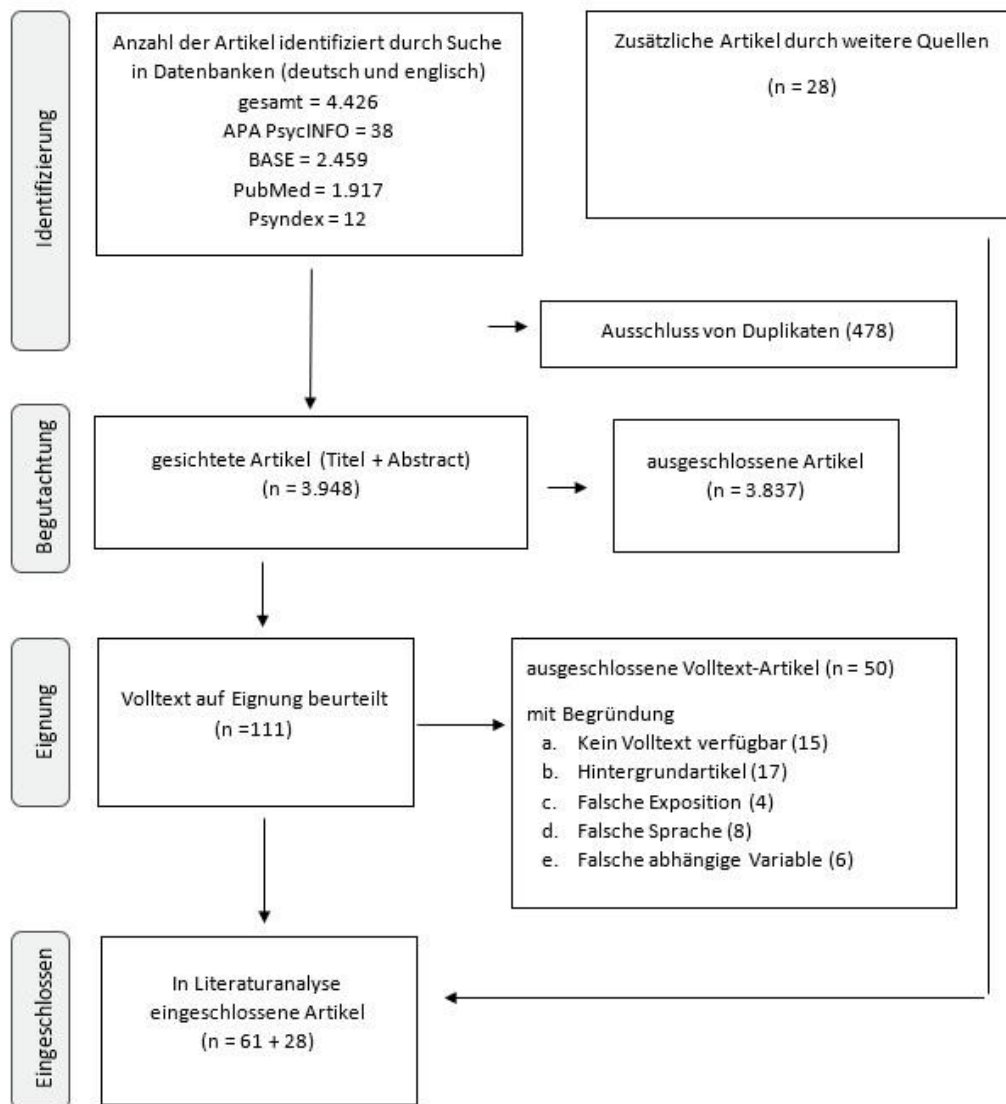
Weiterhin sollte in die Literaturrecherche die Sichtung von Tagungsbänden einschlägiger Fachkonferenzen einbezogen werden (z. B. der American Sociological Association Annual Meetings, Euronoise, Forum Acusticum, International Congress on Acoustics, Congress of International Commission on Biological Effects of Noise, Inter-Noise). Eine weitere Literaturquelle war der eigene umfangreiche Literaturbestand der Auftragnehmer, der unter anderem im Zuge der Bearbeitung einschlägiger Forschungsprojekte (unter anderem das H2020-Projekt RUMBLE; Regulation and norm for low sonic Boom Levels) aufgebaut wurde.

4.1.5 Literatúrauswahl und Extraktion von Informationen

Der Prozess der Literatúrauswahl und -analyse wurde angelehnt an einschlägige Empfehlungen zur Durchführung und Dokumentation von systematischen Reviews und Metaanalysen. Als hilfreich hat sich hierbei die Orientierung am PRISMA-Statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) erwiesen (Moher et al. 2009). In Abbildung 61 ist eine Übersicht der gefundenen Literatur nach PRISMA dargestellt.

¹ LBFD = Low Boom Flight Demonstrator

Abbildung 61: Flussdiagramm zum Vorgehen zur Literatursuche bei der systematischen Literaturrecherche nach PRISMA (Moher et al. 2009)



Anmerkung: Quelle: Darstellung nach Moher et al. 2009

4.2 Berücksichtigung kürzlich abgeschlossener und laufender Forschungsarbeiten

International sind aktuell verschiedene Forschungsgruppen in laufenden Forschungsprojekten aktiv oder haben kürzlich Forschungsvorhaben abgeschlossen (siehe unter anderem Etter & Coen 2016; Page & Loubeau 2019 für eine Übersicht). Zu nennen sind hierbei unter anderem:

- ▶ das im Dezember 2020 abgeschlossene 3-jährige EU-Horizon-2020-Vorhaben RUMBLE (<https://rumble-project.eu/i/>);
- ▶ das im Jahr 2020 publizierte Projekt der NASA (National Aeronautics and Space Administration) QSF18 (Quiet Supersonic Flights 2018): Feldstudie zur Wirkung von durch spezielle Flugmanöver von Militärjets erzeugte Low-Sonic-Boom Geräuschen auf die Bevölkerung von Galveston, Texas in den USA (Page et al. 2020; Fidell et al. 2020);

- ▶ die laufenden Forschungsaktivitäten der NASA zur Entwicklung und Testung des Low-Sonic-Boom-Demonstrators X59 (<https://www.nasa.gov/X59>) und der dazu in Planung befindlichen künftigen Wirkungsstudie (Community Response Survey);
- ▶ Forschungsaktivitäten des Forschungsverbundes Aviation Sustainable Center (ASCENT) auch bekannt als Federal Aviation Administration Center of Excellence for Alternative Jet Fuels & Environment (<https://ascent.aero>) zu Mach-Cut-off Flügen, deren akustische Modellierung und Wahrnehmung der von Mach-Cut-off Flügen ausgehenden Geräusche (<https://ascent.aero/project/acoustical-model-of-mach-cut-off/>; z. B. Sparrow & Vigeant 2019);
- ▶ die Forschungsaktivitäten der japanischen Luft- und Raumfahrtforschungseinrichtung JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) zu shaped Booms (veränderte Überschallknalle) und zur Wahrnehmung von und Belästigung durch diese Geräusche in Laboruntersuchungen (z. B. Veggeberg 2012; Naka 2013).

4.3 Ergebnisse der Literaturanalyse

Im Jahr 1947 flog der erste Mensch mit Überschallgeschwindigkeit (Maglieri et al. 2014). Als in den USA militärische Flugzeuge vermehrt mit Überschallgeschwindigkeit flogen, berichteten einige Anwohner von einem lauten Knallgeräusch. Man wusste zwar, dass eine Schockwelle durch Überschallflüge erzeugt wird, dass diese Schockwelle jedoch den Boden erreicht und ein hörbares Geräusch, den sogenannten Überschallknall (Englisch: *Sonic Boom*), produziert, war unerwartet (vgl. von Gierke 1966).

Erste Studien zum Phänomen der Überschallknalle untersuchten zunächst eine etwaige direkte Wirkung der Überschallknalle auf die physische Gesundheit von Menschen, z. B. direkte Wirkungen auf das Gehör (Maglieri, Huckel & Parrott 1961). Erst nach und nach wurden auch andere mögliche Auswirkungen der Überschallknalle untersucht, wie Lärmbelästigung, Startleffekt (Deutsch: *Aufschrecken*) und Schlafstörungen. Neben dem Geräusch der Überschallknalle ist ein weiteres wichtiges Phänomen das mit der Schockwelle einhergehende Rattle (Deutsch: *Klappern*) von Gegenständen oder Fenstern innerhalb eines Hauses. Zusätzlich können bei geringer Frequenz spürbare taktile Vibrationen auftreten. Sowohl die Wirkungen von Überschallknallen als auch von Rattle und Vibrationen wurden daher in zahlreichen Studien untersucht. Es zeigte sich beispielsweise, dass Personen, die sich während der Überschallknalle in einem Gebäude aufhielten, höher belästigt waren, als Personen, die sich draußen aufhielten (Nixon & Borsky 1966). Ein Erklärungsansatz ist, dass es innerhalb des Hauses durch die Schalldruckwelle zu Rattle kommt; dieser Zusammenhang zeigte sich auch bei explosionsartigen Geräuschen (Schomer & Averbuch 1989). Durch Rattle und Vibrationen und dadurch, dass Überschallknalle sich außerhalb eines Gebäudes anders anhören als innerhalb eines Gebäudes, wird oft zwischen Überschallknallen, wie sie innerhalb eines Hauses bzw. drinnen zu hören sind (*indoor*), und Überschallknallen, wie sie außerhalb eines Hauses bzw. draußen zu hören sind (*outdoor*), unterschieden. Ähnlich kann auch die Wirkung für outdoor oder indoor bestimmt werden.

Die älteren Studien untersuchten die Wirkungen von herkömmlichen Überschallknallen auf den Menschen. Erst um die Jahrtausendwende wurden erstmals Studien mit simulierten „Low“ Sonic Booms durchgeführt; also mit Überschallknallen, die geringere Amplituden aufwiesen. Die Low Sonic Booms sollten das Problem der lauten Überschallknalle lösen. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organisation, ICAO), zugehörig zu den Vereinten Nationen (UN), verfolgt das Ziel, den international zivilen Luftfahrverkehr nachhaltig zu fördern und „inakzeptable Situationen für die Bevölkerung durch Überschallknalle von zivilen Überschallflugzeugen“ zu vermeiden (ICAO 2022, I-76).

Es ist anzumerken, dass in den älteren Studien die Überdrucklevel beispielsweise in Form von pounds per square foot (Pfund pro Quadratfuß; psf, lb/sq ft) oder Millibar (mbar) angegeben worden sind. Diese wurden in diesem Vorhaben für eine bessere Vergleichbarkeit in dB Sound Pressure Level (SPL) konvertiert. Es wurden insgesamt in der Literatursuche 61 relevante Publikationen identifiziert, darunter 12 Reviews. Zunächst werden die im Rahmen der Literaturanalysen identifizierten Reviews zusammenfassend dargestellt, anschließend Einzelpublikationen zu Studien zur Lärmbelästigung, Startle-Reaktion und Schlafstörungen, und zuletzt werden die Ergebnisse weiterer Publikationen, die nicht innerhalb der Literatursuche gefunden wurden, jedoch für das Forschungsthema relevant sind, hinzugezogen und ebenfalls dargestellt.

4.3.1 Reviews

Von Gierke (1966) gab im Rahmen des Sonic-Booms Symposiums einen Überblick über die bis dato durchgeführten Studien zu den Wirkungen von Überschallknallen auf den Menschen. Frühe Studien befassten sich zunächst insbesondere mit direkten physischen Einflüssen von Überschallknallen auf den Menschen (z. B. Maglieri, Huckel & Parrott 1961; Guild 1962). So wurden in der Studie „Little Boom“ 50 Teilnehmende Überschallflügen von etwa 169 dB SPL (120 lb/sq ft) ausgesetzt, ohne dabei physischen Schaden zu erleiden (Maglieri, Huckel & Parrott 1961).

Ein anderes Review gibt einen Überblick zu Laborstudien zu psychologischen und physiologischen Wirkungen von Überschallknallen auf den Menschen (Kryter 1966). Kryter bezog hierbei Laborstudien zur Lautstärke von Überschallknallen mit unterschiedlichen Wellenformen, die Wahrnehmung von Überschallknallen im Vergleich zu anderen Geräuschquellen, Startle-Reaktionen und Schlaf ein. Zusammenfassend berichtet Kryter (1966), dass die Anstiegszeit der Überschallknalle die wahrgenommene Lautheit des Überschallknalls beeinflusst: Überschallknalle mit einer kürzeren Anstiegszeit werden als lauter wahrgenommen als Überschallknalle mit einer längeren Anstiegszeit; die Dauer des Überschallknalls scheint hingegen keinen Effekt auf das Lautheitsempfinden zu haben. Das Herausfiltern von tiefen Frequenzen unter 40 Hz hatte ebenfalls keinen Einfluss auf die wahrgenommene Lautheit. Im Vergleich zu Lärm von Flugzeugen, die Unterschallgeschwindigkeit fliegen, werden Überschallknalle draußen als weniger störend wahrgenommen und als störender, wenn die Person sich im Haus aufhält, was durch Rattle und Vibrationen innerhalb des Hauses erklärt werden kann. Weiterhin gäbe es Hinweise aus der gesichteten Literatur, dass die Startle-Reaktionen mit mehrfacher Exposition zu Überschallknallen zurückgehen könnten (Kryter 1966).

In einem im Jahr 1972 erschienenen Review fasste Borsky Studien in Bezug zur Belästigungswirkung von Überschallknallen zusammen. Die erste größere Feldstudie wurde 1961 in St. Louis, USA, durchgeführt und umfasste die Befragung von etwa 1300 Personen (siehe auch Abschnitt 4.3.2). Eine andere größere Lärmwirkungsstudie wurde 1964 in Oklahoma City, USA, in einem Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt (Borsky 1965). Das Untersuchungsgebiet wurde tagsüber im Untersuchungszeitraum 1253 Überschallknallen ausgesetzt ($M = 129,17$ dB SPL outdoor) und es wurden Befragungen vor, während und nach Abschluss der Flugbewegungen durchgeführt. Im Laufe der Studie wurde der Überdruck der Überschallknalle erhöht: Während in den ersten 11 Wochen der SPL im Durchschnitt bei 128,64 dB lag, stieg er in den folgenden 8 Wochen auf 129,38 dB SPL und in den letzten 7 Wochen auf 131,66 dB SPL. Insgesamt nahmen 2852 Teilnehmende an allen drei Befragungen teil. Von durch den Überschallknall verursachte Vibrationen und Rattle bedingten Störungen berichteten beinahe alle Teilnehmenden. Von 40 % der näher an der Flugbahn wohnenden Teilnehmenden (0 bis etwa 13 km) und von 30 % der entfernter lebenden Teilnehmenden wurden Startle-Reaktionen

und Angst als Reaktionen auf die Überschallknalle genannt. Bei der dritten Erhebung, also nach der 6-monatigen Exposition von Überschallknallen, berichteten 56 % der Teilnehmenden von einer hohen Belästigung und 27 % gaben an, es nicht akzeptieren zu können, Überschallknallen auf unbestimmte Zeit ausgesetzt zu sein. Etwa ein Fünftel der Teilnehmenden berichtete von Schlafstörungen, die aufgrund der Überschallknalle auftraten. Anzumerken ist hier, dass die Geräuschexposition nur tagsüber stattfand, sodass wahrscheinlich Ein- und/oder Ausschlafstörungen gemeint waren. Vibrationen und Rattle waren die meist genannten unerwünschten Begleiterscheinungen von Überschallknallen (94 %). Durch die allmähliche Überdruckerhöhung der Überschallknalle konnten etwaige separate Effekte von der Anzahl und dem Überdruck der Überschallknalle nicht untersucht werden (Borsky 1972). In Frankreich wurde 1970 eine Studie mit 3900 Teilnehmenden durchgeführt (Brémond 1971) und im selben Jahr eine Studie in Großbritannien mit ca. 3000 Teilnehmenden (McKennell 1971). In der französischen Studie gaben 5 % der Teilnehmenden an, durch die Überschallknalle schlafgestört zu sein. 65 % fänden nächtliche Überschallknalle inakzeptabel und rund 50 % fühlten sich durch die Überschallknalle belästigt. Wie in der Oklahoma City Studie zählten auch bei den französischen Teilnehmenden Rattle und Vibrationen zu den unerwünschten Auswirkungen der Überschallknalle (72 %). In der britischen Studie berichtete etwa ein Drittel der Befragten von Belästigung durch Überschallknalle.

Von Gierke und Nixon (1972) identifizierten verschiedene Labor- und Feldstudien und fassten die Ergebnisse in einem 1972 veröffentlichten Review zusammen. Insbesondere der Spitzenüberdruck und die Anstiegszeit stünden in Verbindung mit der Belästigung bzw. der wahrgenommenen Lautheit der Überschallknalle (z. B. Shepherd & Sutherland 1967). So sind Überschallknalle mit einer kürzeren Anstiegszeit belästigender bzw. werden als lauter wahrgenommen (vgl. auch Kryter 1966). Weiterhin stehen höhere Spitzenüberdrücke mit einer höheren wahrgenommenen Lautheit in Zusammenhang. Überschallknalle werden in der Regel innerhalb des Hauses als belästigender wahrgenommen, was unter anderem mit Vibrationen und Rattle eines Überschallknalls in Verbindung stehen kann. Vibrationen und Rattle eines Überschallknalls verringern die Akzeptanz. Überschallknalle können mit Startle-Reaktionen einhergehen und ab einem Pegel von 127,6 dB SPL wurden in den berücksichtigten Studien Schlafstörungen festgestellt. Spitzenüberdrücke von 107 dB SPL (0,1 psf) bis 125 dB SPL (0,75 psf) schlugen von Gierke und Nixon (1972) als akzeptable Level vor. Die Autoren geben abschließend zu bedenken, dass durch den Einsatz von kommerziellen Überschallflugzeugen eine breite Masse an Menschen Überschallknallen ausgesetzt werden würde. Da Pegel ab 127 dB SPL (1 psf) als inakzeptabel angesehen werden, halten die Autoren die Entscheidung, Überschallflüge nur über Wasser zuzulassen, für sinnvoll (von Gierke & Nixon 1972).

Rice (1972) sowie Pearson und Kolleg*innen (1989) gaben in jeweils einem Review den aktuellen Stand zu Wirkungen von Überschallknallen auf den Schlaf wieder. Unter anderem zeigte sich, dass Erwachsene im mittleren Alter bei Überschallknallen zwischen 121,94 dB SPL bis 143,5 dB SPL in 30 % der Fälle aufwachen (Rice 1972). Zepler und Kolleg*innen (1973) fassten unter anderem Studienergebnisse von May (1971a, 1971b, 1971c) zusammen. May (1971a, 1971b, 1971c) erstellte anhand von mehreren Studien eine Funktion, die bei Bekanntsein des Überdrucks und der Anstiegszeit die Startle-Reaktionen auf Überschallknalle vorhersagen kann. Die Funktion beruht allerdings auf Daten von Personen, die bereits vorab Erfahrungen mit Überschallknallen hatten. Hintergrundgeräusche hatten ebenfalls einen Einfluss auf die Startle-Reaktionen (Zepler et al. 1973).

Ein weiteres Review kam zu dem Schluss, dass der Grad der Startle-Reaktionen auf einen Überschallknall bei Einzelpersonen nicht mit der Intensität des Überschallknalls assoziiert ist, allerdings ein solcher Zusammenhang bei Gruppen von Menschen beobachtet werden konnte (Rylander 1974). Die betrachteten Publikationen deuteten weiterhin auf einen

Gewöhnungseffekt bei 10 oder mehr Überschallknallen hin und zeigte negative Wirkungen der Überschallknalle auf den Schlaf (Rylander 1974).

Darden stellte zu Beginn der 2000er fest, dass sich auf Basis der publizierten Studien keine Überdruckschwellenwerte festlegen lassen, bis zu denen Überschallknalle zweifelslos akzeptabel werden würden (Darden 2002). Es müssten weitere relevante akustische Faktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Anzahl an und Auftretungszeit (tagsüber oder nachts) der Ereignisse(n), die Intermitenz sowie die individuellen Signaturen (Darden 2002).

Drei Publikationen (Shepherd et al. 1995; Leatherwood et al. 2002; Sullivan 2006) fassten NASA-Studien zur Wirkung von Überschallknallen zusammen. Shaped (veränderte) Überschallknallsignaturen gehen mit einer geringeren wahrgenommenen Lautheit und Belästigung einher (Leatherwood et al. 2002). Vergleiche zwischen symmetrischen und asymmetrischen Signaturen ergaben, dass asymmetrische Signaturen als weniger laut eingeschätzt werden als symmetrische Signaturen. Stevens' Perceived Level (PL) zeigte sich dabei als bester Prädiktor für die selbst-berichteten Überschallknallwirkungen (siehe z. B. McCurdy, Brown & Hilliard 1995, 2004).

4.3.2 Studien zu Lärmbelästigung, Schlafstörungen und Startle-Reaktionen durch Überschallknalle

In den folgenden beiden Abschnitten (Abschnitte 4.3.2 und 4.3.3) werden die in der Literatursuche identifizierten Publikationen sowie auch die zusätzlich gefundene, relevante Literatur beschrieben. In Anhang A.1 Tabelle 20 sind alle der im Rahmen der Literaturanalyse identifizierten Studien nach PEOS kurz mit den wichtigsten Informationen dargestellt.

Eine der ersten größeren Studien zu Überschallknallen wurde 1961 und 1962 in der Umgebung von St. Louis, USA, durchgeführt (Nixon & Hubbard 1965). Über einen Zeitraum von 7 Monaten wurden Anwohnende 79 Überschallflügen ausgesetzt. Es gab zwei Erhebungen und an beiden nahmen insgesamt 1043 Personen aus dem Untersuchungsgebiet und knapp 300 Personen für eine Kontrollgruppe teil. Die von den Flugzeugen erzeugten Überschallknalle wurden gemessen und im Anschluss mit den berichteten Störungen, der Lärmbelästigung und den eingegangenen Beschwerden in Zusammenhang gebracht. Die Überschallknalle erreichten einen durchschnittlichen SPL von 132,69 dB (1,8 psf). 90 % der Teilnehmenden berichteten Störungen durch die Überschallknalle: Die häufigsten Störungen waren Erschütterungen des Gebäudes und Startle-Reaktionen. 35 % der Teilnehmenden fühlten sich durch die Überschallknalle belästigt und 10 % erwogen die Einreichung einer Beschwerde, wovon 1 % im Untersuchungszeitraum auch tatsächlich eine Beschwerde einreichten. Es gab allerdings in den drei Monaten nach Abschluss der Hauptstudie noch insgesamt 74 weitere Überflüge mit Überschallknallen, was zu weitaus mehr Beschwerden führte. 42 % der Teilnehmenden berichteten zudem von Überschallknall-bedingten Schlafstörungen. Die Überschallknalle wurden von Teilnehmenden, die sich während des Überflugs drinnen aufhielten, als weniger akzeptabel bewertet (Nixon & Borsky 1966). Weiterhin war die Akzeptanz für nächtliche Überflüge und damit einhergehender nächtlicher Exposition zu Überschallknallen geringer als für den Tageszeitraum. Ein ähnliches Bild zeigte sich im Vergleich zwischen militärischen und kommerziellen Überflügen: Zu Letzteren fiel die Akzeptanz ebenfalls geringer aus. Laut Meinung der Autoren sei insgesamt ein einzelner Überdruckwert gegebenenfalls nicht ausreichend, um die Wirkung von Überschallknallen adäquat abbilden zu können (Nixon & Borsky 1966).

Im Umfeld der Militärbasis Edwards in den USA wurde eine Studie zur Akzeptanz von Überschallknallen durchgeführt (Kryter, Johnson & Young 1967, 1968). Diejenigen, die bereits seit einigen Jahren regelmäßig Überschallknallen ausgesetzt waren, zeigten eine höhere Toleranz gegenüber Überschallknallen als Teilnehmende, die keine Vorerfahrung mit

Überschallknallen hatten. Überschallknalle mit 132,19 dB SPL wurden von Teilnehmenden, die Überschallknallen bereits regelmäßig ausgesetzt waren, genauso wenig akzeptiert wie Geräusche von Flugzeugen mit Unterschallgeschwindigkeit mit Spitzenpegeln in Höhe von 109 Perceived Noise Level (PNL) dB. Insbesondere der Frequenzbereich von 20 bis 500 Hz stand mit den Reaktionen bzw. Wirkungen in Zusammenhang.

Nixon et al. untersuchten 1968 die Wirkung von Überschallknallen auf Bodenpersonal und die Bevölkerung (hier: selbst-berichtete physiologische Symptome). Das Personal zeigte zwar Startle-Reaktionen, jedoch keine Unterbrechung beim Durchführen von Aufgaben und aus der Bevölkerung wurden keine physiologischen Symptome berichtet.

Im Rahmen einer kleineren Studie wurden 39 Anwohnende des militärischen Flugplatzes in Meppen in Deutschland zur Belästigungswirkung von Überschallknallen befragt (May 1972). An 10 Tagen wurden Teilnehmende 53 Überschallknallen mit durchschnittlich 131 dB SPL und einer Anstiegszeit von 2 ms (Millisekunden) bis 39 ms ausgesetzt. Es wurden nur die Überschallknalle berücksichtigt, die draußen wahrgenommen und nicht jene, die drinnen wahrgenommen wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass eine kürzere Anstiegszeit bei gleichem Pegel mit einer höheren Belästigung einherging als längere Anstiegszeiten.

Thackray et al. ließen 40 Studenten eine 30-minütige Tracking Aufgabe durchführen, während 4 simulierte Überschallknalle, wie sie draußen zu hören wären, zwischen 127,6 dB SPL und 139,6 dB SPL mit einer Anstiegszeit von 295 ms abgespielt wurden (Thackray, Touchstone & Jones 1971). Als Wirkung wurden die Hautleitfähigkeit und Herzrate gemessen. Es zeigte sich, dass die Studenten die Aufgabe nach einem Überschallknall besser ausführten. Weiterhin stieg die Hautleitfähigkeit an und die Herzrate verlangsamte sich. Die Autoren schlossen daraus, dass die hier untersuchten Überschallknalle anstelle einer Startle-Reaktion eher eine Art Orientierungs- bzw. Alarmreaktion auslösten. Allerdings wurde in der Studie nur eine konstante Anstiegszeit benutzt und unterschiedliche Anstiegszeiten könnten einen Einfluss auf die untersuchten Wirkungen haben (Thackray, Touchstone & Jones 1971).

Etwaige Einflüsse von nächtlicher Überschallknallexposition auf die Stimmung als Proxy für Schlafeffekte wurde in einer Laborstudie von Smith und Hutto (1972) mit 24 Teilnehmenden untersucht. Insgesamt schliefen die Teilnehmenden an 21 aufeinanderfolgenden Nächten im Schlaflabor, wovon sie in den Nächten 6 bis 17 jeweils stündlich simulierten Überschallknallen (107,58 dB SPL in den Schlafräumen) ausgesetzt wurden. Es fand sich kein signifikanter Effekt der Überschallknalle auf die Stimmung der Teilnehmenden, woraus die Autoren schlossen, dass die genutzten Überschallknalle keinen signifikanten Effekt auf den Schlaf der Teilnehmenden hatten, da sich andernfalls Stimmungseffekte gezeigt hätten (Smith & Hutto 1972). Inwiefern Stimmungseffekte tatsächliche Rückschlüsse auf den Schlaf zulassen, wurde allerdings nicht untersucht.

In Schweden führten Rylander und Kolleg*innen zwei Studien zur Wirkung von Überschallknallen durch (Rylander, Sörensen, Berglund & Brodin 1972; Rylander, Sörensen & Berglund 1972). Eine Studie fand in Nausta mit 165 Soldaten und 33 zivilen Teilnehmerinnen statt (Rylander, Sörensen, Berglund & Brodin 1972). Während der Studienzeit gab es 42 Überschallknalle mit Maximalpegeln von bis zu 142 dB SPL. Beide Gruppen machten Angaben zu Aktivitäten zum Zeitpunkt des Überflugs und zur Wirkung von Überschallknallen. Die 33 Teilnehmerinnen führten darüber hinaus eine visuelle Performanceaufgabe und eine Tracking Aufgabe durch. Höhere Pegelwerte gingen mit einem höheren Anteil an hochbelastigten Personen einher. Bei einem Pegel von 133 dB SPL waren 50 % der Teilnehmenden belastigt und bei einem Pegel von 132 dB SPL waren 8 % hoch belastigt. Die teilnehmenden Soldaten zeigten eine höhere Belästigung durch die Überschallknalle als die zivilen Teilnehmerinnen. Die Überschallknalle hatten einen signifikant negativen Einfluss auf den Performancetest und

verminderten die Genauigkeit in der Tracking Aufgabe, unabhängig des Pegels. Der Anteil der belästigten Personen fällt in der Studie von Rylander und Kolleg*innen bei einem Pegel von 130,8 dB SPL leicht höher aus (60 %) als beispielsweise in der Oklahoma Studie (56 %). Rylander et al. führten ebenfalls eine Schlafstudie zu Überschallknallen durch (Rylander, Sörensen & Berglund 1972). In der Studie wurden 189 Soldaten und 212 zivile Teilnehmende in einem 3-monatigen Zeitraum insgesamt 7 Überschallknallen ausgesetzt, die jeweils morgens um 04:25 Uhr stattfanden. Die übrigen Nächte dienten als Kontrollnächte. Die Überschallknalle erreichten Pegelwerte in Höhe von 109,5 dB SPL bis 130,1 dB SPL. Beide Teilnehmendengruppen nahmen an einer Befragung teil, in der Fragen zur Belästigung und zu Aufwachreaktionen durch Überschallknalle sowie zum Vergleich mit anderen Geräuscharten (z. B. Verkehrsgeräusche und Schießlärm/ Artillerieschüsse) und zur Persönlichkeit gestellt wurden. Zivile Teilnehmende wurden weiterhin gefragt, wie viele Überschallknalle sie gehört hatten und, ob sie aufgewacht sind und Schwierigkeiten hatten wieder einzuschlafen. Bei den Soldaten wurden Schlafstörungen mittels eines Bewegungsmessgeräts unter ihren Betten gemessen. Zudem wurden sie aufgefordert, bei Aufwachen einen Knopf am Kopfende des Bettes zu drücken. Lautere Überschallknalle waren mit mehr Schlafstörungen assoziiert. Bei einem SPL von 129,5 dB wachten die Soldaten 10 % häufiger auf. Die Anstiegszeit, der Überdruck und die Schlafstörungen standen in keinem Zusammenhang zueinander. Insgesamt wiesen die Soldaten, die durch die Überschallknalle aufwachten, höhere Werte bei Neurotizismus auf. 21 % der Soldaten bewerteten die Überschallknalle als belästigend und 3 % als sehr belästigend. Über Schwierigkeiten, nach einem Überschallknall wieder einzuschlafen, berichteten 2 %. Bei einem SPL von 109,5 dB zeigten sich keine signifikanten Effekte auf den Schlaf. 56 % der zivilen Teilnehmenden berichtete über Durchschlafstörungen. Ein höheres Alter war mit höheren Schlafstörungen assoziiert, was auf die ältere Bevölkerung als vulnerable Gruppe hinweisen kann. Die Anzahl von 7 Überschallknallen über einen Zeitraum von 3 Monaten ist jedoch relativ gering.

In einer weiteren schwedischen Studie wurde anhand von 60 Teilnehmerinnen die Startle-Reaktionen auf Überschallflüge und herkömmliche Überflüge (129,5-146,4 dB SPL outdoor Level) untersucht (Thackray, Rylander & Touchstone 1973). Als Referenzgeräusch wurde täglich nach dem letzten Überflug ein Startschuss abgefeuert (107 dB SPL). Die Startle-Reaktion wurde mittels eines Arm-Handstabilität-Apparates gemessen. Lautere Überschallknalle führten zu mehr Startle-Reaktionen, wobei ältere Teilnehmerinnen insgesamt weniger Startle-Reaktionen zeigten. Bei Überschallknallen mit 143,5 dB SPL (outdoor) war bei 75 % der Teilnehmerinnen eine Startle-Reaktion zu sehen und bei 10 % bei Pegelwerten zwischen 130,8 und 135,5 dB SPL. Thackray et al. vermuten eine Schwelle für Startle-Reaktionen von 127,95 dB SPL oder weniger. Es zeigten sich insgesamt keine Hinweise auf einen Gewöhnungseffekt an die Überschallknalle.

12 Familien nahmen an einer Studie teil, in der ein Community Noise Simulation System bei ihnen zu Hause aufgestellt wurde, welches tagsüber simulierte Überschallknalle abspielte (Mabry & Oncley 1973). Aus den Ergebnissen leiteten Mabry und Oncley einen akzeptierbaren Schwellenwert für Überschallknalle in Höhe von 87 dB (Stevens' Mark VI) für das Leben in Innenräumen und eine maximale Anzahl an Überschallknallen von 15 am Tag und keine nächtlichen Überschallknalle ab.

Leatherwood und Sullivan (1993) zeigten in einer Laborstudie, dass die Belästigungswerte für die Innengeräusche der Überschallknalle deutlich höher ausfielen als die Lautheitswerte für diese Geräuschart. Aus den Ergebnissen leitet sich ebenfalls die Empfehlung zur Nutzung des PL als Prädiktor für die Wirkung von Überschallknallen ab. In einer Experimentenreihe von denselben Autor*innen (Leatherwood & Sullivan 1994) wurden etwaige Unterschiede in der Belästigung von verschiedenen Geräuschmetriken (Stevens' Perceived Level, PL; PNL; C-gewichteter SEL, CSEL; A-gewichteter SEL, ASEL) und Anstiegszeiten (1 ms und 3 ms) von

symmetrischen N-Wave Überschallknallen und regulären Überflugeräuschen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei gleichem Belästigungsgrad, der C-gewichtete SEL um knapp 10 dB bis 15 dB höher liegt als beim A-gewichteten SEL. Laut Autor*innen könnte dieser Unterschied jedoch auch auf Ungenauigkeiten in den Berechnungen und Messungen zurückzuführen sein. Weiterhin fielen die Pegel der verschiedenen Geräuschmetriken mit Ausnahme vom A-gewichteten SEL bei gleichem Belästigungsgrad bei den Überschallknallen höher aus als bei den regulären Überflugeräuschen. Eine andere Studie zeigte, dass die Lautheit von asymmetrischen N-Wave Überschallsignaturen bei gleichem PL als geringer eingeschätzt wird als bei symmetrischen N-Wave Überschallsignaturen: Je höher die Asymmetrie der Überschallsignatur, desto geringer die wahrgenommene Lautheit (Leatherwood & Sullivan 1992).

Eine Studie aus dem Jahr 1997 fand anhand von Paarvergleichen heraus, dass Überschallknalle belästigender wahrgenommen werden als explosionsartige Geräusche bei gleichem CSEL (Schomer, Sias & Maglieri 1997). Zudem hängen outdoor CSEL besser mit der indoor erfassten Belästigung zusammen als indoor CSEL. Fidell und Kolleg*innen (2002) nutzten ebenfalls Paarvergleiche um die Belästigung durch simulierte indoor Überschallknalle und aufgezeichnete reguläre Überflugeräusche zu untersuchen. Je höher der Geräuschpegel, desto höher fiel die Belästigung aus. Überschallknalle mit Rattle wurden als belästigender wahrgenommen. Dieser Effekt war stärker bei niedrigeren Pegeln als bei höheren Pegeln. Bei gleicher Belästigung waren die durchschnittlichen dB-Werte von nicht-impulsiven Variablen um 5 dB höher bei Überschallknallen mit Rattle im Vergleich zu Überschallknallen ohne Rattle.

Griefahn (1975a, 1975b) untersuchte in einer Schlaflaborstudie die Wirkung von nächtlichen Überschallknallen auf den Schlaf mittels Pulsfrequenz- und EEG-Messungen (Elektroenzephalogramm). Jeweils zwei Teilnehmende waren 19 bzw. 53 Nächte 2 bis 16 Überschallknallen von durchschnittlich 83,5 dB(A) (A-bewertete Dezibel; 80-89 dB(A); 137,6-137,2 dB SPL) ausgesetzt. Die Exposition mit Überschallknallen während des Schlafs ging mit einer signifikanten Verringerung der Pulsfrequenz einher. Es wurde jedoch kein Zusammenhang zwischen der Pulsfrequenz und der Intensität der Überschallknalle gefunden. Es fand keine Adaption an die Geräusche statt, sondern eine Form von Kompensation und die nächtliche Exposition mit Überschallknallen verkürzte signifikant die Tiefschlafphasen (Griefahn & Jansen 1975).

In zwei Experimenten untersuchten Ludlow und Morgan (1972) die Wirkung von unterschiedlich lauten Überschallknallen auf den Schlaf. Jeweils 8 Teilnehmer nahmen an jedem Experiment teil. Im ersten Experiment wurden simulierte Überschallknalle mit Pegelwerten von 71,2 dB(A), 74,2 dB(A) und 77,6 dB(A) verwendet und im zweiten Experiment 69 dB(A), 79 dB(A) und 84,5 dB(A). Schlafstörungen und weitere relevante Variablen wurden wie folgt erfasst: Subjective Stress Scale, Subjective Fatigue Scale, Clyde Mood Scale, Persönlichkeitstest, Schlaffragebogen und Aufwachen anhand eines Knopfdrückens. Im ersten Experiment wurde kein signifikanter Effekt der Überschallknalle auf die Aufwachhäufigkeit gefunden; die Überschallknalle hatten jedoch einen signifikanten Effekt auf die selbst-berichtete Müdigkeit (Subjective Fatigue Scale). Im zweiten Experiment wurden signifikant mehr Aufwachreaktionen bei höheren Geräuschpegeln gefunden und auch die übrigen Messinstrumente zeigten einen negativen Einfluss der Überschallknalle.

Zwei Experimente verglichen die Wirkung von Überschallknallen und Überflügen mit Unterschallgeschwindigkeit auf den Schlaf (gemessen mittels EEG) zwischen verschiedenen Altersgruppen (Lukas & Kryter 1970; Lukas, Dobbs & Kryter 1971). Es zeigte sich, dass insbesondere ältere Menschen deutlich häufiger Aufwachreaktionen bei sowohl Überschallknallen als auch Unterschallflügen aufwiesen als Menschen mittleren Alters. Kinder im Alter von 7 bis 8 Jahren zeigten in beiden Experimenten kaum bis gar keine Reaktionen auf

beide Geräuscharten (Lukas & Kryter 1970; Lukas, Dobbs & Kryter 1971). Die Stichproben in beiden Studien waren je Altersgruppe jedoch recht klein, weswegen keine verallgemeinerbaren Aussagen getroffen werden können.

Fields (1997) untersuchte in 2 Regionen (Region A bei Las Vegas und Region B bei Los Angeles) im Westen der USA die Belästigungswirkung von Überschallknallen. Beide Regionen waren bereits seit einigen Jahren Überschallknallen ausgesetzt. In den hochbelasteten Gemeinden beliefen sich die Pegelwerte innerhalb der 6 Monate auf 55 dB CSEL bzw. 40 dB ASEL und in den am wenigsten belasteten Gemeinden auf 40 dB CSEL bzw. 25 dB ASEL. Startle-Reaktionen, Rattle und Vibrationen sowie Sorge um etwaige Schäden durch die Sonic Booms wurden als besonders störend genannt. Von den Teilnehmenden, die Startle-Reaktionen zeigten, berichteten die meisten, dass sie keinen Gewöhnungseffekt bei sich beobachteten. Zwischen den beiden Regionen unterschieden sich die Wirkungen der Überschallknalle: So gab es beispielweise in der Region bei Las Vegas bei 30 bis 40 dB(A) 35 % sehr belästigte Personen (4-Punkte Skala) und in der Region bei Los Angeles bei dem gleichen dB(A)-Wert 5 %. Überschallknalle wurden bei gleichem Pegel als belästigender wahrgenommen als Fluglärm. Fields schlussfolgerte, dass sich dieser Unterschied auf 10 dB belaufen kann, jedoch auch höhere dB-Werte (20 bis 40) möglich wären bzw. nicht ausgeschlossen werden könnten (Fields 1997).

In einer kürzlich erschienenen Publikation reanalysierten Schomer et al. (2023) vorhandene Daten zur Wirkung von Überschallknallen und Rattle (unter anderem Daten der St. Louis und Oklahoma City Studie). Rattle stellte sich hierbei als wichtigster Prädiktor für die Belästigung durch Überschallknalle heraus. Die Beziehung zwischen Rattle und dem Belästigungsempfinden war nicht-linear (Schomer, Naidu & Naidu 2023).

4.3.3 Studien zu Low Sonic Booms

Studien aus ungefähr den letzten 20 Jahren befassten sich vornehmlich mit der Wirkung von Low Sonic Booms auf den Menschen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Überschallknallen sind Low Sonic Booms wesentlich leiser und sollen sich dadurch weniger negativ auf den Menschen auswirken. Ein hörbares Geräusch, Vibrationen und Rattle bleiben jedoch bestehen. Bislang waren die Studien zu Low Sonic Booms Laborstudien, da noch kein Flugzeugdemonstrator bestand, welcher Low Sonic Booms produzieren kann.

McCurdy und Kolleg*innen (2004) untersuchten in einem 8-wöchigen Feldexperiment die Belästigungswirkung von verschiedenen simulierten Überschallknallen. Dafür wurde in den Häusern der 33 Teilnehmenden ein System aufgebaut, welches 4 bis 63 Überschallknalle (N-Wave Überschallknalle draußen und drinnen und shaped Überschallknalle draußen) mit 66 dB ASEL, 70 dB ASEL oder 74 dB ASEL am Tag erzeugte. Je mehr Überschallknalle eine teilnehmende Person ausgesetzt war, desto belästigter war sie. Es zeigte sich kein Unterschied in der Belästigung zwischen den verschiedenen Wellenformen. Teilnehmende, die eine Startle-Reaktion zeigten, waren belästigter. Im Rahmen der Studie wurden auch verschiedene Geräuschmetriken miteinander verglichen und PL zeigte sich als bester Prädiktor für Lärmbelästigung. Bei Erholungsaktivitäten wie Schlafen erhöhte sich die Belästigung in dB entsprechend um 1,5 dB PL pro Stunde. Bei Gesprächen mit anderen Personen oder Musikhören verringerte die Belästigung sich hingegen um ein Äquivalent von 0,75 dB PL und 0,5 dB PL je Stunde. Die Belästigung stieg um ein Äquivalent von 0,25 dB PL pro Anstieg im Alter um ein Jahr.

2006 führten Sullivan et al. eine 3-wöchige Studie zur Wirkung von Low Sonic Booms durch (Sullivan et al. 2010). Innerhalb dieses Zeitraums bewerteten 77 Teilnehmende die Belästigung durch reale Low Sonic Booms sowie durch synthetische Low Sonic Booms, während sie sich sowohl draußen als auch drinnen in einem Gebäude aufhielten. Die Low Sonic Booms erreichten Pegel zwischen 107,58 dB SPL und 123,15 dB SPL. Eine F18 überflog das Gebäude und

produzierte anhand eines bestimmten Flugverfahrens Low Sonic Booms. Die Belästigung durch einen Low Sonic Boom war für denselben Pegel höher, wenn Teilnehmende sich im Gebäude befanden im Vergleich zu draußen. Allerdings unterschied sich die Belästigung durch einen bestimmten Low Sonic Boom nicht signifikant zwischen outdoor und indoor. Die meisten Teilnehmenden bewerteten die indoor Low Sonic Booms in einem Nachher-Fragebogen insgesamt als belästigender als die outdoor Low Sonic Booms, was im Kontrast zur Bewertung der einzelnen Low Sonic Booms steht. Ein Erklärungsansatz der Autor*innen ist, dass eventuell alle genutzten Geräusche innerhalb des Gebäudes als belästigender wahrgenommen werden, gegebenenfalls aufgrund einer anderen Erwartungshaltung gegenüber Geräuschquellen innerhalb und außerhalb eines Gebäudes. Die Autor*innen gehen zudem von einer geringeren Wirkung von Rattle auf die Belästigung als andere Studien aus, da im genutzten Gebäude Rattle durch Türen und Fenster vorkam, der Belästigungsgrad durch individuelle Low Sonic Booms sich jedoch nicht zwischen indoor und outdoor unterschied. Es ist jedoch anzumerken, dass in dieser Studie das Vorhandensein und die Intensität des Rattle nicht kontrolliert wurde und nicht teil des Studiendesigns war.

In ihrer Dissertation untersuchte Miller unter anderem den Einfluss von unterschiedlichen Hörumgebungen auf das Belästigungsempfinden durch aufgezeichnete indoor und outdoor Low Sonic Booms (2011). Teilnehmende hörten die Low Sonic Booms über Kopfhörer sowohl in einer Büroumgebung als auch auf einer Außenterrasse. Dieselben Low Sonic Booms wurden als belästigender wahrgenommen, wenn Teilnehmende sich drinnen aufhielten, und die aufgezeichneten indoor Low Sonic Booms waren mit einer höheren Belästigung assoziiert als die aufgezeichneten outdoor Low Sonic Booms. Beim Vergleich von verschiedenen Merkmalen von Räumlichkeiten, die einen Einfluss auf das Belästigungsempfinden durch Low Sonic Booms nehmen könnten, wie Größe und Form, zeigte sich, dass Low Sonic Booms in kleinen, quadratischen Räumen und Räumen mit einer höheren Nachhallzeit der Low Sonic Booms am belästigsten wahrgenommen werden (Giacomoni & Davies 2013).

In zwei weiteren NASA Studien wurde der Effekt von Rattle unter anderem auf die Belästigung untersucht (Loubeau et al. 2013; Rathsam, Loubeau & Klos 2013). Insgesamt fanden die Autor*innen einen Zuschlag zwischen 3 und 9 dB für das Vorhandensein von Rattle. Rattle von kleinen Gegenständen wie Gläsern oder Bildern wurde als weniger belästigend wahrgenommen als Rattle von Fenstern und Türen, obwohl alle Rattle Geräusche auf denselben dB PL gesetzt wurden (Loubeau et al. 2013). Darüber hinaus wurden Low Sonic Booms zusammen mit Rattle als belästigender wahrgenommen als nur Low Sonic Booms. Die Moore und Glasberg Stationary Loudness (MGSL) zeigte sich für Low Sonic Boom in Kombination mit Rattle als bester Belästigungsprädiktor. Andere Studien weisen aber auf PL als bester Prädiktor für Belästigung hin (z. B. Rathsam, Loubeau & Klos 2012). Zum dB-Zuschlag für die Wirkung von Vibrationen zeigten Studien Werte zwischen 0 und 8 dB (Carr & Davies 2015; Rathsam, Loubeau & Klos 2015; Rathsam & Klos 2016).

In einer weiteren Studie wurde der Zusammenhang zwischen kurzzeitiger und langzeitiger Belästigung durch Low Sonic Booms untersucht (Fidell 2013). 49 Teilnehmende wurden über einen Zeitraum von 2 Wochen Überschallflügen, die Low Sonic Booms produzierten, in ihrem zu Hause ausgesetzt. Die Studie erfasste sowohl die Kurzzeitbelästigung nach jedem Low Sonic Boom Ereignis als auch die Langzeitbelästigung am Ende jedes Tages. Das als am belästigsten empfundene Einzelereignis eines Low Sonic Booms eignete sich besonders als Prädiktor der Langzeitbelästigung. Zusätzlich zeigten sich die Anzahl der Startle-Reaktionen an einem Tag und die höchste Belästigung durch Rattle als signifikante Prädiktoren für die Langzeitbelästigung (Fidell 2013).

Die von der NASA durchgeführten Studien zum Low Sonic Boom fokussierten insbesondere auf die Wirkung innerhalb eines Gebäudes und den Einfluss verschiedener Wellenformen auf die Belästigung und die Eignung unterschiedlicher akustischer Metriken (Loubeau, Rathsam & Klos 2013; Page & Loubeau 2019). Rathsam und Kolleg*innen (Rathsam, Loubeau & Klos 2015) nutzten vier Low Sonic Booms mit PL in Höhe von 65 dB, 73 dB und 81 dB ohne Rattle, verknüpften diese mit Rattle Geräuschen ebenfalls mit unterschiedlichen PL (53 dB, 61 dB, 69 dB) und spielten diese Geräusche 33 Teilnehmenden vor. Die Belästigung wurde auf einer kontinuierlichen Skala erfasst, wobei die Angabe im Anschluss zu einem numerischen Ausdruck umgewandelt wurde. Zusätzlich wurden die Metriken PL, CSEL und ASEL in ihrer Eignung zum Vorhersagen der Belästigung miteinander verglichen. Die Autor*innen fanden heraus, dass PL (indoor) die Belästigung innerhalb des Hauses gut vorhersagen kann; dies gilt für Low Sonic Booms sowohl mit als auch ohne Rattle. Low Sonic Booms mit Rattle, wie sie draußen zu hören sind, eignen sich um die Belästigung in der Bevölkerung vorherzusagen.

In zwei Untersuchungen - eine in NASA Forschungsräumlichkeiten und eine im Labor der Purdue Universität - wurden verschiedene Geräuscharten (Low Sonic Booms, Türeenschlagen, Explosionen, Schüsse) und Geräuschmetriken (PL, PNL, ASEL, BSEL, CSEL, ESEL, zeitabhängige Lautheit (Glasberg & Moore 2002), Zwicker Lautheit, Dauer, Heaviness (H; Unterschied zwischen CSEL-ASEL)) miteinander verglichen (Carr & Davies 2015; Carr et al. 2020). Die Purdue Untersuchung fand in Laborräumlichkeiten statt und die Geräusche wurden über Kopfhörer eingespielt. Die NASA Untersuchung fand in einem Simulator statt (siehe auch Klos, Sullivan & Shepherd 2013) und es wurde zusätzlich die Wirkung von Vibrationen untersucht, in dem Teilnehmende jeweils einen Teil der Untersuchung auf einem isolierten Stuhl (keine Vibration) und für den anderen Teil der Studie auf einem nicht isolierten Stuhl saßen und somit Vibrationen ausgesetzt waren. In beiden Untersuchungen wurde die Wirkung der Geräusche auf die Lärmbelästigung untersucht, allerdings mit zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen: Purdue nutzte die 5-stufige Skala der IC BEN (International Commission on Biological Effects of Noise) zur Erfassung der Lärmbelästigung (Fields et al. 2001) und NASA zwar ebenfalls eine 5-stufige Skala mit gleichen Werten, es war aber auch möglich zwischen die vorgegebenen Skalenwerten zu klicken, sprich Dezimalzahlen auszuwählen. Am belästigsten wurden laute, synthetische Überschallknalle wahrgenommen, bei denen kein 50 Hz Hochpassfilter angewendet wurde. Eine verringerte niedrige Frequenz ging mit einer geringeren Belästigung einher und zusätzliche niedrige Frequenzen (25-50 Hz) können zu einer höheren Belästigung führen. Zudem waren lautere Überschallknalle belästigender. Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungen zeigten sich bei den Belästigungswerten: Der Mittelwert der Belästigung bei Werten unter 5 fällt bei der Purdue Untersuchung höher aus als bei der NASA Untersuchung. Die Modelle mit der höchsten Varianzaufklärung ($R^2 > 0,89$), in denen mehrere Metriken Berücksichtigung fanden, enthielten H, PL, die Dauer und die Lautheit. Alle vier Variablen erreichten Signifikanz. Sowohl Metriken für indoor wie auch outdoor eignen sich als Prädiktoren für die Belästigung durch Innengeräusche. Den Ergebnissen zufolge erfassen Lautheit und Belästigung unterschiedliche Konstrukte und niedrigere Frequenzen zeigten einen anderen Einfluss auf das Belästigungsempfinden im Vergleich zur Lautheit. In der NASA Untersuchung zeigte sich ebenfalls ein kleiner Effekt der Vibrationen auf die Lärmbelästigung (Rathsam, Klos & Loubeau 2015).

2011 wurde das Pilotprojekt „Waveforms and Sonic boom Perception and Response (WSPR)“ in der Edwards Air Force Basis in Kalifornien, USA, durchgeführt, um die Anwendbarkeit und Effizienz von verschiedenen Studiendesigns zur Erhebung von Daten zur Lärmwirkung von Low Sonic Booms zu testen (Page et al. 2014). 51 Teilnehmende nahmen an der 2-wöchigen Studie teil, in der gleichzeitig 110 Low Sonic Booms von einem F18 Flugzeug erzeugt wurden. Das Gebiet um die Air Force Basis ist allerdings regelmäßig - auch vor der Studie - Überschallknallen

ausgesetzt. Die Befragung setzte sich aus der Bewertung von Einzelereignissen und einer Befragung zum Ende jedes Tages zusammen. Ergebnisse zeigten, dass das Belästigungsempfinden insbesondere mit den erlebten Störungen durch die Low Sonic Booms zusammenhing.

In der QSF18 Studie der NASA wurde die Gemeinde von Galveston, Texas in den USA, im November 2018 52 realen Low Sonic Booms über einen Zeitraum von 2 Wochen ausgesetzt (Page et al. 2020). Ein F18 Flugzeug überflog die Gemeinde mit einem speziellen Flugverfahren und erzeugte so die Low Sonic Booms mit einem Pegel zwischen 56 bis 90 dB PL (Lee, Rathsam & Wilson 2020). Die meisten Low Sonic Booms waren nicht lauter als 73,7 dB PL (Page et al. 2020). In dieser Studie wurde die Wirkung der einzelnen Low Sonic Booms und eine Gesamtbewertung der Belästigung für jeweils einen Tag erfasst. Insgesamt nahmen 476 Teilnehmende an der Studie teil (Page et al. 2020). 1 % der Stichprobe war durch die Low Sonic Booms hoch belästigt (1 %HA). Die Low Sonic Boom Pegelwerte waren positiv mit %HA für die Einzelereignisbewertung assoziiert. Für die Gesamtbewertung der Low Sonic Booms am Ende jedes Tages zeigte sich hingegen keine signifikante Beziehung zwischen den Pegelwerten und %HA, was auf die relativ geringe Anzahl an hoch belästigten Personen zurückzuführen sein könnte. Mit den Daten von 371 Personen wurden zwei verschiedene Regressionen gerechnet: eine Multilevel logistische Regression und eine Multilevel ordinale Regression (Lee, Rathsam & Wilson 2020). Die beiden Modelle unterschieden sich laut Auto*innen bei einem fixierten %HA um 2,5 dB, wobei dies noch innerhalb der Konfidenzintervalle (KI) liegt (Lee, Rathsam & Wilson 2020). Die Belästigungsergebnisse sind ähnlich der WSPR Studie, obwohl Teilnehmende der letzteren Studie bereits vor der Studie regelmäßig Überschallknallen ausgesetzt waren.

Töpken und van de Par verglichen die Lautheits- und kurzzeitige Belästigungswirkung, gemessen anhand einer 11-Punkte Skala, von herkömmlichen outdoor N-Wave Überschallknallen mit outdoor Low Sonic Booms (EU-Projekt RUMBLE, 2020; 2021). Insgesamt nutzten sie 24 verschiedene Überschallknalle und Low Sonic Booms mit dB-Werten zwischen 55,5 dB ASEL bis 69,8 dB ASEL. Die Ergebnisse ergaben einen signifikanten Unterschied zwischen den unterschiedlichen Signaturen und Pegelwerten (Töpken & van de Par 2020). Darüber hinaus wurde bei den unterschiedlichen Signaturen die Lautheit und Belästigung unterschiedlich je nach Pegelwerten bewertet. Belästigung und Lautheit sind insbesondere auf mittlere und höhere Frequenzen (> 1000 Hz) zurückzuführen und weniger auf Frequenzen unterhalb von 1000 Hz. Ein höherer dB-Wert war mit einer höheren Belästigung sowie einer höheren Lautheit assoziiert (Töpken & van de Par 2020). Für die Belästigung und die Lautheit ging ein Anstieg von 6 dB mit einer 2 bis 3 Punkte-Erhöhung auf der jeweiligen Skala einher. In einer anderen Studie aus dem EU-Projekt RUMBLE wurden 41 Teilnehmende in einem dafür präparierten Gebäude, welches sich auf dem Campus der Universität Sorbonne in Frankreich befindet, Low Sonic Booms ausgesetzt (Marmel et al. 2024; 2025). Es sollte die Wirkung von outdoor Low Sonic Booms (62,1 dB ASEL bis 69,5 dB ASEL) auf Teilnehmende innerhalb des Gebäudes, speziell im Wohnzimmer und in der Küche des Gebäudes, untersucht werden. Die zwei Räumlichkeiten wurden gewählt, da dort jeweils unterschiedliche Rattle-Effekte durch die Low Sonic Booms hervorgerufen wurden. Die Teilnehmenden führten während der Beschallung mit Low Sonic Booms verschiedene Aufgaben durch (Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis, zur Motorik und Kommunikation sowie eine affektive Kognitionsaufgabe) oder hatten eine Pause (keine Aufgabe aber Exposition zu Low Sonic Booms). Im Anschluss beantworteten sie unter anderem Fragen zur Belästigung und Unannehmlichkeit der Low Sonic Booms und des Rattles (z. B. „Wie sehr haben die Booms/das Rattle Sie bei der Aufgabe gestört?“, „Wie unangenehm klangen die Booms/das Rattle?“) und ihrer Stimmung (nur vor und nach Pausen). Es fanden sich kleine, aber signifikante negative Effekte der Low Sonic Booms auf die affektive Kognitionsaufgabe sowie auf die Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis und zur Motorik.

Es wurde kein Startle-Effekt bei der motorischen Aufgabe entdeckt. Bei der Kommunikationsaufgabe wurde zwar ein Trend zu einer Verschlechterung durch die Exposition beobachtet, dieser war allerdings nicht signifikant. Diese Effekte fanden sich bei Pegelwerten zwischen 60 dB ASEL und 70 dB ASEL, wobei höhere Pegelwerte nicht mit einer weiteren Verschlechterung der Performance einhergingen. Dies könnte dadurch bedingt sein, dass die Unterschiede in den Pegelwerten sich verringern, sobald die Low Sonic Booms ins Gebäude eintreten. Zudem schienen die Low Sonic Booms bei Teilnehmerinnen größere Effekte auszulösen als bei Teilnehmern (Marmel et al. 2024). Die Low Sonic Booms störten mehr in Pausen als während der Durchführung von Aufgaben und höhere Boom-Level störten mehr als niedrigere Boom-Level (Marmel et al. 2025). Weiterhin wurden die Booms als belästigend und unangenehm wahrgenommen, insbesondere bei hohen Boom-Pegeln und dem Vorhandensein von Rattle (Marmel et al. 2025).

Auch die JAXA führte diverse Studien in ihrem Sonic Boom Simulator durch, unter anderem auch zum Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Lautheit verschiedener Low Sonic Booms und unterschiedlichen akustischen Metriken (z. B. Naka 2013). Ergebnisse einer Studie ergaben, dass die wahrgenommene Lautheit indoor und outdoor hoch mit ASEL, ESEL (E-gewichteter SEL), PNL sowie verschiedenen Lautheitsmetriken korreliert (Naka 2013). Eine kumulative Auswertung von NASA und JAXA Studiendaten ergab, dass PL, BSEL (B-gewichteter SEL), DSEL (D-gewichteter SEL) und ESEL gute Prädiktoren für die Belästigung durch Low Sonic Booms darstellen (Loubeau et al. 2015; DeGolia & Loubeau 2017). Daneben zeigte sich ISBAP (Indoor Sonic Boom Annoyance Predictor), welches unter anderem auch die Heaviness (H) berücksichtigt, als geeignet (DeGolia & Loubeau 2017).

Neben Studien zu Low Sonic Booms gibt es auch vermehrt Forschung zum sogenannten Mach-Cut-off Flugverfahren (z. B. Sparrow & Vigeant 2019). Mach-Cut-off kann unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen und einer bestimmten Flugzeuggeschwindigkeit vorkommen. Durch Mach-Cut-off gelangen Überschallknalle nicht bis zum Boden und ihre Signatur unterscheidet sich auch im Hörerlebnis von herkömmlichen N-Wave Überschallknallen (Sparrow & Vigeant 2019). Sparrow und Kolleg*innen untersuchten die Wirkungen dieses Mach-Cut-off Verfahrens auf den Menschen. Zunächst sollten passende Beschreibungen der Geräusche identifiziert werden. Aus einem ersten Hörexperiment leiteten sich die Begriffe donnernd (*thunderous*), polternd (*rumbly*) und rauschend (*swooshing*) zur Beschreibung der Mach-Cut-off Geräusche ab. Zusätzlich wurde belästigend (*annoying*) als Attribut erfragt. Es zeigte sich, dass insbesondere die Beschreibung als donnernd mit der Belästigungswertung zusammenhing.

4.4 Fazit aus der Literaturanalyse

Die hier beschriebenen Studien erfassen die Lärmwirkungen teilweise sehr unterschiedlich und die Stichprobengrößen variieren sehr stark. Insgesamt zeigt sich, dass Überschallknalle und auch Low Sonic Booms in der Regel innerhalb eines Gebäudes als belästigender wahrgenommen werden. Dies ist unter anderem auf begleitende Vibrationen und Rattle zurückzuführen, die das Belästigungsempfinden verstärken können (z. B. Kryter 1966; Miller 2011). Einige Studien untersuchten daher auch einen etwaigen dB Zuschlag bei Vorhandensein von Rattle und Vibrationen (z. B. Sullivan et al. 2010). Die Bandbreite von möglichen dB-Zuschlagswerten für Rattle (vgl. auch Sullivan et al. 2010) – verursacht durch teilweise den Überschallknallen ähnliche Geräusche - reicht von 0 dB (Pearsons et al. 1993; Cawthorn, Dempsey & DeLoach 1978) bis 20 dB: 5 dB (Fidell, Silvati & Pearsons 2002), 3 dB und 9 dB (Loubeau et al. 2013; Rathsam, Loubeau & Klos 2013), 13 dB bis 20 dB (Pearsons & Kryter 1964; Schomer & Neathammer 1987; Schomer & Averbuch 1989). Für Vibrationen ergaben zwei Studien Zuschlagswerte von 0 dB bis 8 dB (Carr & Davies 2015; Rathsam, Klos & Loubeau 2015; Rathsam & Klos 2016). Auch die Anstiegszeit zeigte sich bei älteren Studien als relevanter Einflussfaktor

auf die Belästigung und wahrgenommene Lautheit (z. B. May 1972). Die Berücksichtigung von Rattle und Vibrationen scheint daher sehr relevant für die Untersuchung und Vorhersagen von Lärmbelästigung durch Überschallknalle und Low Sonic Booms zu sein. In den hier berücksichtigten Publikationen, die verschiedene akustische Metriken miteinander vergleichen, weist sich häufig PL als bester Prädiktor für Lärmbelästigung aus (vgl. McCurdy, Brown & Hilliard 2004; Rathsam, Loubeau & Klos 2012; Rathsam, Loubeau & Klos 2015; Carr & Davies 2015; Carr et al. 2020).

Anders als bei Unterschallflügen, bei denen hauptsächlich bei Start und Landungen Anwohnende Fluglärm ausgesetzt sind, wäre eine breite Masse an Menschen Low Sonic Booms sowie den damit verbundenen Vibrationen und Rattle ausgesetzt, die während des gesamten Fluges mit Überschallgeschwindigkeit auftreten können.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Schlafstudie und der Literaturanalyse sowie Ableitung von Zumutbarkeitskriterien

Laut § 29b Abs. 1 des Luftverkehrsgesetzes ist die „[...] Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm zu schützen. Auf die Nachtruhe der Bevölkerung ist in besonderem Maße Rücksicht zu nehmen.“ Weiterhin hat das Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm den Zweck, „[...] in der Umgebung von Flugplätzen bauliche Nutzungsbeschränkungen und baulichen Schallschutz zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Fluglärm sicherzustellen“ (§ 1 FluLärmG). In Deutschland werden durch das FluLärmG beispielsweise zwei Tages- und eine Nachtschutzzone im Umfeld von Flugplätzen anhand von Pegelwerten definiert. In einer Schutzzone befinden sich jene Gebiete, in denen die festgesetzten Werte überschritten werden. Für neu oder wesentlich baulich veränderte zivile Flughäfen gelten beispielsweise folgende Werte: Tag-Schutzzone 1 mit $L_{Aeq,Tag} = 60 \text{ dB(A)}$; Tag-Schutzzone 2 mit $L_{Aeq,Tag} = 55 \text{ dB(A)}$ und die Nachtschutzzone mit $L_{Aeq,Nacht} = 50 \text{ dB(A)}$ und $L_{Amax} = 6 \text{ mal } 53 \text{ dB(A)}$ (§ 2 FluLärmG).

Die WHO spricht in ihren Environmental Noise Guidelines for the European Region (WHO 2018) wiederum Empfehlungen für Pegelwerte für verschiedene Umgebungslärmquellen aus, um die Bevölkerung vor adversen Gesundheitswirkungen zu schützen. So wird beispielsweise für Fluglärm empfohlen, Pegelwerte von $45 \text{ dB } L_{den}$ und für die Nacht von $40 \text{ dB } L_{night}$ zu unterschreiten. Um die Bevölkerung vor Fluglärm adäquat schützen zu können, bedarf es also klar definierten, messbaren Größen, anhand derer festgelegt werden kann, bis zu welchem Wert Wirkungen zumutbar sind und ab wann nicht mehr. Hierzu ist eben einerseits eine Definition der Wirkungen der Lärmquelle notwendig und andererseits werden akustische Kenngrößen benötigt, die definieren, ab wann Lärmwirkungen auftreten können.

Auf europäischer Ebene hatte beispielsweise das von 2017-2020 durchgeführte EU-Horizon 2020-Projekt RUMBLE (RegUlation and norM for low sonic Boom LEvels) zum Ziel, wissenschaftliche Grundlagen zur Regulation und Normung von Überschallgeräuschen neuer Überschallflugzeuggenerationen zu erarbeiten. Die laborexperimentellen Ergebnisse aus RUMBLE zur Wirkung von Überschallgeräuschen (Töpken & van de Par, 2020, 2021; Marmel et al., 2024, 2025) liefern wichtige Wirkungshinweise, Zumutbarkeitsgrenzen oder Schwellenwerte zu Überschallgeräuschen sind daraus allerdings nicht direkt ableitbar. Das aktuell laufende EU Horizon2020 Forschungsprojekt MORE&LESS (Multidisciplinary Design Optimization and REgulations for Low boom and Environmentally Sustainable Supersonic aviation) soll auf Basis von Modellierungen und Testkampagnen den Einfluss zukünftiger Überschallluftfahrt auf die Umwelt untersuchen und die Entwicklung globaler Umweltstandards durch evidenzbasierte Empfehlungen unterstützen. MORE&LESS behandelt allerdings keine gesundheitsbezogenen Wirkungen von Überschallgeräuschen.

Ein zentrales Element des vorliegenden Projektes ist die Ableitung von Zumutbarkeitskriterien für Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flüge zum Schutz der Bevölkerung. Dazu wird die Gesamtheit der Ergebnisse zum einen aus der durchgeführten Schlafstudie und zum anderen aus der Literaturanalyse aufgegriffen und dargelegt, welche Konsequenzen sich aus diesen Ergebnissen für Zumutbarkeitskriterien ergeben.

Im Gegensatz zum Fluglärm und zu herkömmlichen Überschallknallen liegen zu Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen bislang allerdings nur begrenzte Forschungsergebnisse zu deren Wirkungen vor. Insbesondere langfristige Wirkungen im Feld konnten bislang nicht

erforscht werden. Teilweise könnten sich die Wirkungen von herkömmlichen Überschallknallen jedoch auf Low Sonic Booms übertragen lassen. Im Folgenden werden auf Basis der im Projekt durchgeführten Schlafstudie und der Literaturanalyse verschiedene messbare Kenngrößen, die sich als Zumutbarkeitskriterien eignen, vorgestellt und beschrieben.

Im Rahmen der Schlafstudie wurden folgende Kenngrößen erfasst bzw. berücksichtigt:

- ▶ Anzahl der Lärmereignisse (Kontrollbedingung vs. Low Sonic Boom vs. Mach-Cut-off Bedingung);
- ▶ Selbst-berichtete Schlafparameter anhand eines Fragebogens:
 - selbst eingeschätzte Schlafqualität;
 - morgendliche Schläfrigkeit;
 - Kurzzeitbelästigung;
- ▶ Physiologisch gemessene Schlafparameter:
 - Elektrophysiologisch gemessene Schlafqualität: a) Schlafeffizienz, b) Einschlafdauer, c) Anteil des Tiefschlafs, d) Anteil der Wachliegezeit an der im Bett verbrachten Zeit, e) Anzahl der Aufwachereignisse
 - Physiologisch gemessene Aufwach-Rate;
 - Physiologisch gemessene Arousals;
 - Physiologisch gemessene Schlaf-Enttiefungen.

Die Ergebnisse der Schlafstudie können wie folgt zusammengefasst werden:

Die elektrophysiologisch messbare Schlafqualität in der Low-Boom-Bedingung unterschied sich nicht signifikant von der Kontrollbedingung, was entgegen der Erwartungen steht. Es zeigten sich jedoch nicht-signifikante Trends: in der Low-Boom-Bedingung war die Schlafeffizienz geringfügig niedriger und WASO, SOL, die Anzahl der Aufwachereignisse und der Arousals fielen etwas höher aus als in der Kontrollbedingung. Jedoch zeigen die Ergebnisse eine signifikante Verbesserung der Schlafeffizienz in der Mach-Cut-off-Bedingung im Vergleich zur Low-Boom-Bedingung.

Die durchschnittliche lärminduzierte Aufwach-Rate lag für Low-Boom-Ereignisse bei 6,39 % und für Mach-Cut-off-Ereignisse bei 1,67 %. Eine lärminduzierte Aufwach-Rate von 6,39 % entspricht im Vergleich bei herkömmlichem Fluglärm etwa einem Maximalschalldruckpegel $L_{AS,max}$ von 60 dB, bei Straßenverkehrslärm zwischen 55 bis 60 dB sowie 55 dB bei Schienenverkehrslärm (ebenfalls im Labor-Setting). Die für die Mach-Cut-off-Bedingung gefundenen 1,67 % wären bei herkömmlichem Fluglärm und Straßenverkehrslärm bei 50 dB überschritten und lag bei Schienenverkehrslärm zwischen 50 und 55 dB. Die Ergebnisse in Bezug auf Arousals zeigen eine durchschnittliche prozentuale Arousal-Rate von 7,8 % für Low Sonic Booms (im Vergleich dazu für herkömmlichen Fluglärm zwischen 55 und 60 dB, für Straßenverkehrslärm bei 45 dB, und für Schienenverkehrslärm bei 50 dB) sowie 2,8 % für die Mach-Cut-off-Bedingung (im Vergleich dazu bei Fluglärm zwischen 45 und 50 dB, bei Straßen- und Schienenlärm bereits bei den niedrigsten eingespielten Pegeln von 45 dB überschritten).

Die Ergebnisse der Analyse zur Herzrate deuten auf eine Orientierungsreaktion auf die Low Sonic Booms hin: Die Herzrate war nach Einspielung der Low Boom Lärmereignisse langsamer als vor den Lärmereignissen.

Die Ergebnisse zu den selbst-berichteten Schlafparametern zeigen, dass die morgendliche Schläfrigkeit nach der Kontrollbedingung geringer ist als nach der Low-Sonic-Boom-Nacht. Die Schlafqualität wurde nach der Kontrollbedingung genauso schlecht beurteilt wie nach der Low-Boom-Bedingung und beide Bedingungen wurden schlechter beurteilt als die Mach-Cut-off-Bedingung. Ein Erklärungsansatz könnte die noch ungewohnte Labor-Umgebung in der ersten Nacht (= Kontrolle) sein.

Hinweis zur Schlafstudie und Einordnung der Ergebnisse

Es ist in Bezug auf die Ergebnisse der Schlafstudie darauf hinzuweisen, dass im Rahmen der vorliegenden Schlafstudie nur die Geräusche eines Low-Sonic-Boom-Flugzeugs und die eines Low-Sonic-Boom-Flugzeugs unter Anwendung des Mach-Cut-Off-Verfahrens in die Schlafräume der Versuchspersonen eingespielt worden sind; Effekte wie Rattle (Deutsch: *Klappern*) und Vibrationen konnten nicht berücksichtigt werden.

Aus der Literaturanalyse zeigen sich verschiedenste Kriterien zur Beurteilung der Zumutbarkeit als relevant. Diese können in akustische Parameter und Lärmwirkungen differenziert werden.

5.1 Akustische Parameter als Zumutbarkeitskriterien

In Bezug auf Low Sonic Booms wurden unterschiedliche Metriken in den Studien genutzt und miteinander verglichen. Naka (2013) fand, dass die wahrgenommene Lautheit (indoor und outdoor) hoch mit ASEL, ESEL, PNL sowie mit verschiedenen Lautheitsmetriken korreliert. Gemeinsame Auswertungen von NASA und JAXA Studiendaten ergaben, dass die akustischen Metriken PL, BSEL, DSEL und ESEL die Belästigung durch Low Sonic Booms gut vorhersagen (Loubeau et al. 2015; DeGolia & Loubeau 2017). Laut Ergebnissen des EU Horizon Projekts RUMBLE sagt die Metrik ASEL die Belästigung durch Low Sonic Booms gut vorher (Töpken & van de Par 2020). Bei Vergleichen zwischen mehreren Metriken, findet sich PL häufig als bester Prädiktor für die Belästigung. Es ist anzumerken, dass hier nur ein Überblick der genutzten Metriken gegeben werden kann; die Wahl einer akustischen Metrik als Zumutbarkeitskriterium kann derzeit nicht getroffen werden.

Für die Beurteilung der Zumutbarkeit von Low Sonic Booms sind ebenfalls Rattle und Vibrationen zu berücksichtigen, die als Nebeneffekte auftreten können, wenn die Schalldruckwelle den Erdboden und somit auch Gebäude und darin befindliche Gegenstände erreicht. Studien zeigten unterschiedliche dB-Zuschlagswerte für Rattle (Überschallknalle und Low Sonic Booms; siehe auch Sullivan et al. 2010):

- ▶ 0 dB ASEL (Pearsons et al. 1993, Cawthorn, Dempsey & DeLoach 1978);
- ▶ 5 dB ASEL (Fidell, Silvati & Pearsons 2002);
- ▶ 3 dB und 9 dB PL (Loubeau et al. 2013; Rathsam, Loubeau & Klos 2013);
- ▶ 13 dB bis 20 dB ASEL (Pearsons & Kryter 1964; Schomer & Neathammer 1987; Schomer & Averbuch 1989).

In einer Studie fanden Loubeau et al. (2013) zudem, dass die durch Rattle verursachte Belästigung je nach Gegenstand variieren kann. So werden klappernde Fenster und Türen als belästigender wahrgenommen als Rattle von kleineren Gegenständen wie Gläsern (Loubeau et al. 2013). Im Hinblick auf durch Low Sonic Booms verursachte Vibrationen zeigen Studien dB-Zuschlagswerte zwischen 0 dB bis 8 dB (Carr & Davies 2015; Rathsam, Klos & Loubeau 2015; Rathsam & Klos 2016).

Ein weiteres wichtiges Kriterium, das Berücksichtigung finden sollte, ist die Anzahl der Lärmereignisse: die Anzahl der Low Sonic Booms bzw. Mach-Cut-off Flüge (z. B. pro Tag). Sowohl in den Studien zu Überschallknallen als auch zu Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen werden zwar unterschiedliche Anzahlen von Lärmereignissen verwendet, eine Aussage darüber, wie viele Lärmereignisse noch zumutbar sind und ab welcher Anzahl es unzumutbar wird, lässt sich jedoch nicht definieren. Eine Studie fand in Bezug auf Low Sonic Booms, dass das am meisten belästigende Einzelereignis eines Low Sonic Booms sich besonders gut als Prädiktor für die Langzeitbelästigung eignet (Fidell 2013).

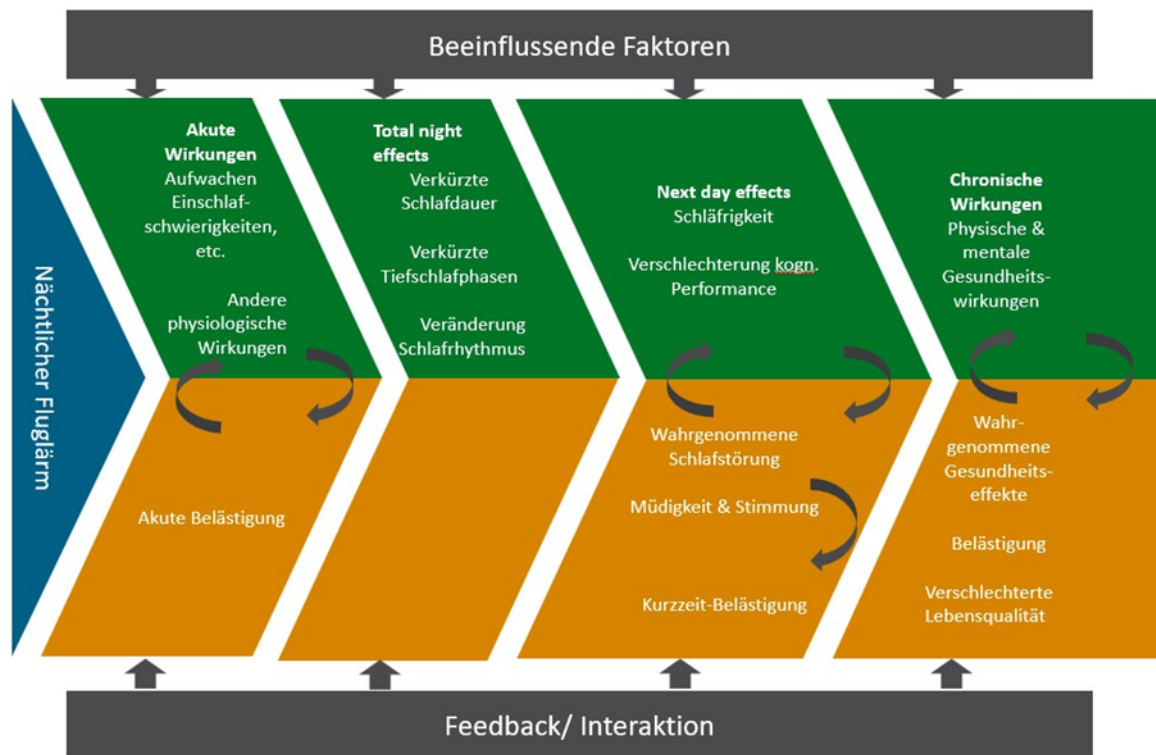
Bei herkömmlichen Überschallknallen wurde weiterhin herausgefunden, dass eine kürzere Anstiegszeit mit einer höheren Belästigung bzw. höheren wahrgenommenen Lautheit einhergeht (vgl. auch Kryter 1966, May 1972).

5.2 Lärmwirkungen als Zumutbarkeitskriterien

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung von Zumutbarkeiten sind die Lärmwirkungen; diese können sowohl von einer nächtlichen als auch einer Exposition am Tage hervorgerufen werden und treten ebenfalls in diesen beiden Tageszeiten auf. Für die Lärmwirkungen in der Nacht (Schlafstörungen) postuliert Griefahn (1990) eine Unterscheidung von Lärmwirkungen auf Basis ihres Auftretenszeitpunktes sowie ihrer Dauer in primäre, sekundäre und tertiäre Wirkungen. Unter primären Wirkungen fasst Griefahn (1990) akute Reaktionen auf Lärmereignisse wie Aufwachreaktionen, die in derselben Nacht kompensierbar sind, zusammen. Sekundäre Wirkungen entstehen aus der Summe der primären Wirkungen und sind nicht mehr in derselben Nacht kompensierbar. Hierunter fallen die wahrgenommene Schlafqualität und die kognitive Leistungsfähigkeit am Folgetag. Bei langfristiger Exposition können primäre und sekundäre Wirkungen irgendwann nicht mehr kompensiert werden und es kommt zu tertiären Wirkungen.

Ein von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) entwickeltes Modell macht eine ähnliche jedoch differenziertere Unterscheidung bezüglich des zeitlichen Auftretens von verschiedenen Lärmwirkungen. Die Autor*innen konzentrieren sich in ihrem Modell ebenfalls auf die nächtliche Fluglärmaxposition und teilen die daraus resultierenden Lärmwirkungen in vier Wirkungslevel auf: Akute Wirkungen, Wirkungen über die gesamte Nacht (*Total night effects*), Wirkungen am darauffolgenden Tag (*next day effects*) und chronische Wirkungen (siehe Abbildung 62). Zwischen den dargestellten Wirkungen kommt es laut Autor*innen zusätzlich zu Interaktionen und Wechselwirkungen.

Abbildung 62: Konzeptuelles Modell zur Wirkung von nächtlichem Fluglärm von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000)



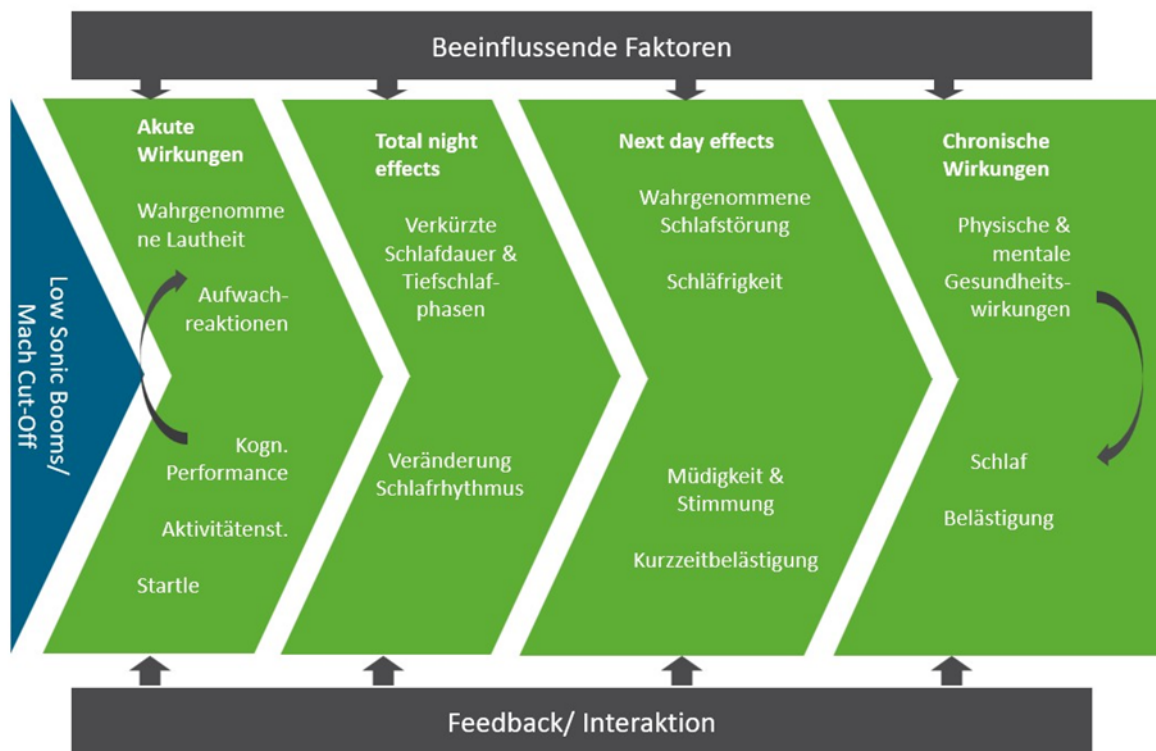
Anmerkung: Quelle: übersetztes Modell von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000).

Unter akuten Wirkungen von nächtlichem Fluglärm verstehen Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) direkte oder unmittelbare physiologische und psychische Wirkungen. Zu den physiologischen Wirkungen zählen beispielsweise Schlafstörungen, die sich durch Aufwachen, Einschlafschwierigkeiten oder Veränderung in der Tiefe des Schlafes auszeichnen. Weitere physiologische Wirkungen von nächtlichem Fluglärm können eine kurzzeitige Erhöhung der Herzrate und des Blutdrucks sein. Eine akute psychische Wirkung ist die akute Belästigung. Die sogenannten „Total night effects“ beinhalten Wirkungen, die sich durch die akuten Wirkungen über die gesamte Nachtzeit akkumulieren. Hierzu gehört beispielsweise eine verringerte Schlafdauer insgesamt, eine verringerte Dauer des Tiefschlafs sowie eine generelle Änderung des normalen Schlafrhythmus. Im 3. Wirkungslevel befinden sich Wirkungen, die am nächsten Tag spürbar werden und durch die ersten beiden Wirkungslevel entstehen („next day effects“). Schläfrigkeit, verringerte kognitive Leistungen, Lärmbelästigung, selbst-berichtete Schlafgestörtheit in der vorherigen Nacht und Stimmungsschwankungen zählen unter anderem zu diesen next day effects. Das 4. und letzte Wirkungslevel umfasst langfristige, chronische Wirkungen („chronic effects“), die aufgrund der ersten drei Wirkungslevel in Erscheinung treten können. Chronische Wirkungen sind unter anderem kardiovaskuläre Erkrankungen, Bluthochdruck, psychische Erkrankungen, Lärmbelästigung sowie eine verringerte Lebensqualität. Die in dem Modell erfassten und beschriebenen Wirkungen sind abhängig voneinander und können sich gegenseitig beeinflussen. Des Weiteren betonen die Autor*innen, dass es zahlreiche Faktoren gibt, die neben den akustischen Merkmalen des Fluglärms, einen Einfluss ausüben. Dies sind beispielsweise Einstellungen, Vertrauen in Verantwortliche oder die individuelle Lärmempfindlichkeit (Porter, Kershaw & Ollerhead 2000).

Die in der Schlafstudie verwendeten und im Rahmen der Literaturanalyse identifizierten Lärmwirkungen, die ggf. als Zumutbarkeitskriterien Anwendung finden könnten, überlappen

sich teilweise mit den von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) genannten Lärmwirkungen und lassen sich in einem adaptierten Modell den verschiedenen Wirkungsleveln zuordnen. Im Gegensatz zu dem Modell von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000), welches sich auf die nächtliche Fluglärmexposition fokussiert, findet in dem adaptierten Modell sowohl die nächtliche als auch die Exposition am Tage Berücksichtigung. In Anlehnung an das Modell von Porter, Kershaw und Ollerhead (2000) wurden die als relevant identifizierten Wirkungen von Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen den vier Wirkungsleveln zugeordnet. Abbildung 63 zeigt eine Übersicht dieser Zuordnung und im Folgenden werden die einzelnen Wirkungen genauer beschrieben.

Abbildung 63: Adaptiertes Modell (nach Porter, Kershaw & Ollerhead 2000) mit relevanten Lärmwirkungen für Zumutbarkeitskriterien



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS, angepasstes Modell nach Porter, Kershaw und Ollerhead (2000).

Akute Wirkungen von Low Sonic Booms umfassen die wahrgenommene Lautheit, Aufwachreaktionen, kognitive Performance, Aktivitätenstörungen und die Startle-Reaktion (Deutsch: *Aufschrecken*). Die Startle-Reaktion wurde in Bezug auf herkömmliche Überschallknalle umfangreich untersucht. In der St. Louis Studie fühlten sich beispielsweise 90 % der Teilnehmende am häufigsten durch Erschütterungen des Gebäudes und Startle-Reaktionen durch Überschallknalle gestört (Nixon & Hubbard 1965; Nixon & Borsky 1966). Fidell (2013) stellte in einer Studie fest, dass die Anzahl der Startle-Reaktionen an einem Tag und die höchste Belästigung durch Rattle signifikante Prädiktoren für die Langzeitbelästigung darstellten.

Die wahrgenommene Lautheit kann ebenfalls relevant sein: so fanden Töpken und van de Par (2020) einen positiven Zusammenhang zwischen der Lautstärke (dB) und der wahrgenommenen Lautheit. Eine Erhöhung um 6 dB ging mit einer höheren wahrgenommenen Lautheit von 2 bis 3 Punkten auf der jeweiligen Skala einher (Töpken & van de Par 2020). Low Sonic Booms können ebenfalls die kognitive Performance beeinträchtigen. Marmel et al. (2024)

untersuchten diesen Zusammenhang und es zeigten sich kleine, aber signifikante negative Effekte auf die affektive Kognitionsaufgabe und Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis und zur Motorik.

Die *total nights effects* umfassen eine verkürzte Schlafdauer, weniger bzw. verkürzte Tiefschlafphasen sowie eine durch die Störungen hervorgerufene Änderung des Schlafrhythmus. Nach einer lärmgestörten Nacht (*next day effects*) kann es unter anderem zu Schläfrigkeit und Stimmungsschwankungen kommen sowie zu Belästigung (Kurzzeitbelästigung). So berichteten beispielsweise 42 % der Teilnehmenden der St. Louis Studie über Schlafstörungen (Nixon & Hubbard 1965) und nächtliche Überschallflüge waren weniger akzeptabel als Überschallflüge am Tag (Nixon & Borsky 1966). Ergebnisse der in diesem Projekt durchgeführten Schlafstudie zeigten, dass die Teilnehmenden nach der Low-Sonic-Boom-Bedingung ihre morgendliche Müdigkeit höher einschätzten als nach der Kontrollbedingung. Für die Kurzzeitbelästigung durch Low Sonic Booms zeigten Töpken und van de Par (2020), dass ein Anstieg von 6 dB mit einer Erhöhung von 2 bis 3 Punkten auf der jeweiligen Skala einhergeht (Töpken & van de Par 2020).

Langfristige Wirkungen von Fluglärm umfassen chronische Schlafstörungen, langfristige Belästigung sowie erhöhte physische und psychische Erkrankungsrisiken. Diese Wirkungen sind auch bei Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen zum jetzigen Forschungsstand nicht auszuschließen, auch wenn zu langfristigen Wirkungen von diesen Lärmarten noch keine Forschungsergebnisse vorliegen. Ergebnisse der WSPR-Studie zeigen, dass das Belästigungsempfinden vor allem mit den durch die Low Sonic Booms verursachten Störungen zusammenhängt (Page et al. 2014). In der QSF18-Studie waren 1 % der Teilnehmenden durch Low Sonic Booms hochbelastigt (1 %HA). Zwischen Pegel und %HA lag für die Einzelereignisbewertung eine positive Assoziation vor. Hingegen gab es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Belästigungsbewertung für Low Sonic Booms am Ende jeden Tages und den Pegelwerten; dies könnte allerdings auf den relativ geringen Anteil %HA zurückzuführen sein (Page et al. 2020; Lee, Rathsam & Wilson 2020).

Nicht zwingend als Zumutbarkeitskriterium selbst, jedoch als Anmerkung ist zu erwähnen, dass Studien mit herkömmlichen Überschallknallen aus den 60er Jahren herausfanden, dass militärische Überschallflüge eine höhere Akzeptanz erfahren als kommerzielle Überschallflüge (Nixon & Hubbard 1965; Nixon & Borsky 1966). Ähnliches könnte auch bei neueren Überschallflugzeugen der Fall sein.

5.3 Empfehlungen zur Ableitung von Zumutbarkeitskriterien

Ziel dieses Forschungsprojekts war unter anderem die Erarbeitung von Zumutbarkeitskriterien für die Beurteilung von Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen. Die Festlegung von konkreten einzuhaltenden Werten o.ä. für diese Zumutbarkeitskriterien ist nicht Inhalt des Projekts.

Ähnlich wie bereits für andere Lärmquellen geschehen (siehe WHO 2018), bietet es sich auch für die Beurteilung von Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen an, die verschiedenen Wirkungen einem Ranking zu unterziehen, beispielsweise - angelehnt an die Arbeiten der WHO - ein Ranking in entscheidende, relevante und nicht relevante Wirkungen vorzunehmen. Für mittel- bis langfristige Lärmwirkungen werden für andere Umgebungslärmquellen sogenannte DALYs (*disability adjusted life years*) berechnet. Dies erlaubt die Quantifizierung von - auch im Schweregrad - unterschiedlichen Lärmwirkungen und könnte in Zukunft auch für die Wirkungen von Low Sonic Booms und Mach-Cut-off Flügen sinnvoll sein.

Zum jetzigen Forschungsstand lassen sich noch keine konkreten Vorschläge für ein Ranking der Zumutbarkeitskriterien sowie für etwaige Grenzwerte für die Zumutbarkeitskriterien

aussprechen. Die hier durchgeführte Schlafstudie ist ein erster wichtiger Schritt zur Untersuchung der Lärmwirkung von Low Sonic Booms und Mach Cut-Off Flügen. Als erste Feldstudie zu Low Sonic Booms wird die derzeit für die Jahre 2026 bis 2028 geplante NASA-Studie *NASA's X59 Quesst Community Survey Campaign*² ebenfalls wichtige Erkenntnisse zur Wirkung von Low Sonic Booms liefern können.

²

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230015240/downloads/Rathsam%20et%20al%20Technical%20Seminar%20at%20IDA%20v4.pdf>

6 Quellenverzeichnis

- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1-2), 29-37. <https://doi.org/10.3109/00207459008994241>
- Alves, M., Garner, D., Fontes, A., Sousa, L. V. D., & Valenti, V. (2018). Linear and complex measures of heart rate variability during exposure to traffic noise in healthy women. *Complexity*, 2018(1), 1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/2158391>
- Anton-Guirgis, H., Culver, B. D., Wang, S., & Taylor, T. H. (1986). *Exploratory study of the potential effects of exposure to sonic boom on human health* (AAMRL-TR-86-020, Vol. 2). Air Force Aerospace Medical Research Laboratory.
- Babisch, W. (2006). *Transportation noise and cardiovascular risk: Review and synthesis of epidemiological studies. Dose-effect curve and risk estimation* (WaBoLu-Hefte, Issue 01/06). Umweltbundesamt. <https://umweltbundesamt.de>
- Bartels, S., Quehl, J., Berger, M., & Aeschbach, D. (2021, June 14-17). *Exposure response-relationships between nocturnal aircraft noise and sleep disturbances in primary school children*. Proceedings of the 13th ICEN Congress on Noise as a Public Health Problem, Virtual. <https://elib.dlr.de/147831/>
- Bartels, S., Richard, I., Ohlenforst, B., Jeram, S., Kuhlmann, J., Benz, S., Hauptvogel, D., & Schreckenberger, D. (2022). Coping with aviation noise: Non-acoustic factors influencing annoyance and sleep disturbance from noise. In L. Leylekian, A. Covrig, & A. Maximova (Eds.), *Aviation Noise Impact Management: Technologies, Regulations, and Societal Well-being in Europe* (pp. 197-218). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91194-2_8
- Basner, M. (2021). Effects of noise on sleep. In *Reference module in neuroscience and biobehavioral psychology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822963-7.00201-2>
- Basner, M., Griefahn, B., & van den Berg, M. (2010). Aircraft noise effects on sleep: Mechanisms, mitigation and research needs. *Noise & Health*, 12(47), 95-109. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.63210>
- Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. *Int J Environ Res Public Health*, 15(3), 519. <https://doi.org/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. *Sleep*, 34(1), 11-23. <https://doi.org/10.1093/sleep/34.1.11>
- Basner, M., Samel, A., & Isermann, U. (2006). Aircraft noise effects on sleep: application of the results of a large polysomnographic field study. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5 Pt 1), 2772-2784. <https://doi.org/10.1121/1.2184247>
- Berry, R. B., Quan, S. F., Abreu, A. R., & Iber, C. (2020). *The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: Rules, terminology and technical specifications* (Version 2.6 ed.). American Academy of Sleep Medicine.
- Bonnemeier, H., Richardt, G., Potratz, J., Wiegand, U. K., Brandes, A., Kluge, N., & Katus, H. A. (2003). Circadian profile of cardiac autonomic nervous modulation in healthy subjects: differing effects of aging and gender on heart rate variability. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 14(8), 791-799. <https://doi.org/10.1046/j.1540-8167.2003.03078.x>
- Bonnet, M. H. (1985). Effect of sleep disruption on sleep, performance, and mood. *Sleep*, 8(1), 11-19. <https://doi.org/10.1093/sleep/8.1.11>
- Bonnet, M. H. (1986). Performance and sleepiness as a function of frequency and placement of sleep disruption. *Psychophysiology*, 23(3), 263-271. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1986.tb00630.x>

- Borsky, P. N. (1965). *Community reactions to sonic booms in the Oklahoma city area* (AMRL-TR-65-37). Aerospace Medical Research Laboratories.
- Borsky, P. N. (1972). Sonic boom exposure effects II.4 : Annoyance reactions. *Journal of Sound and Vibration*, 20(4), 527-530. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90676-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90676-1)
- Bremond, J. (1971). *Enquête d'opinion effectuée à l'occasion des vols expérimentaux de Concorde des 11, 13 et 14 mai 1971* (FRA-189). DGAC Centre d'Études et des Recherches Psychologiques Air.
- Brink, M., Schreckenber, D., Thomann, G., & Basner, M. (2010). Aircraft noise indexes for effect oriented noise assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 1012-1025. <https://elib.dlr.de/65701/>
- Broadbent, D. E., & Robinson, D. W. (1964). Subjective measurements of the relative annoyance of simulated sonic bangs and aircraft noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1(2), 162-174. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(64\)90078-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(64)90078-1)
- Brown, D., & Sutherland, L. C. (1992). *Evaluation of outdoor-to-indoor response to minimized sonic booms* (NASA-CR-189643). NASA Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920019313>
- Bundesrepublik Deutschland. (2007a). *Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG) vom 31. Oktober 2007* (BGBl. I S. 2550). Bundesgesetzblatt.
- Bundesrepublik Deutschland. (2007b). *Luftverkehrsgesetz (LuftVG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007* (BGBl. I S. 698), zuletzt geändert durch Artikel 15 des Gesetzes vom 8. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 272). Bundesgesetzblatt.
- Buxton, O. M., Cain, S. W., O'Connor, S. P., Porter, J. H., Duffy, J. F., Wang, W., Czeisler, C. A., & Shea, S. A. (2012). Adverse metabolic consequences in humans of prolonged sleep restriction combined with circadian disruption. *Science Translational Medicine*, 4(129), 129ra143. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3003200>
- Buysse, D. J., Reynolds, C. F., 3rd, Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research*, 28(2), 193-213. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(89\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4)
- Cai, C., Xu, Y., Wang, Y., Wang, Q., & Liu, L. (2022). Experimental Study on the Effect of Urban Road Traffic Noise on Heart Rate Variability of Noise-Sensitive People. *Frontiers in Psychology*, Volume 12 - 2021. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.749224>
- Carr, D., & Davies, P. (2015). An investigation into the effect of playback environment on perception of sonic booms when heard indoors. *AIP Conference Proceedings*, 1685(1), 090013. <https://doi.org/10.1063/1.4934479>
- Carr, D., Davies, P., Loubeau, A., Rathsam, J., & Klos, J. (2020). Influences of low-frequency energy and testing environment on annoyance responses to supersonic aircraft noise when heard indoors. *Journal of the Acoustical Society of America*, 148(1), 414-429. <https://doi.org/10.1121/10.0001571>
- Cawthorn, J. M., Dempsey, T. K., & Deloach, R. (1978). *Human response to aircraft-noise-induced building vibration* (NASA CP-2052). NASA Langley Research Center.
- Chiles, W. D., & West, G. (1972). *Residual performance effects of simulated sonic booms introduced during sleep* (FAA-AM-72-19). FAA Office of Aviation Medicine.
- Clark, R. (1967). Testing sonic booms. *Nature*, 215(5106), 1122-1123. <https://doi.org/10.1038/2151122a0>
- Cliatt, L., Pauer, B., & Haering, E. A. (2013). *Ground reports – Farfield investigation of no-boom thresholds (FaINT)*. Armstrong Flight Research Center NASA.
- Cliatt, L. J., Hill, M. A., & Haering, E. (2016). *Mach cutoff analysis and results from NASA's farfield investigation of no-boom thresholds* 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, <https://doi.org/10.2514/6.2016-3011>

- Collins, W. E., & Lampietro, P. F. (1972). *Simulated sonic booms and sleep : effects of repeated booms of 1.0 PSF* (FAA-AM-72-35). FAA Civil Aerospace Medical Institute. <https://searchworks.stanford.edu/view/13835072>
- Croy, I., Smith, M., Gidlöf-Gunnarsson, A., & Persson Wayne, K. (2016). Optimal questions for sleep in epidemiological studies: Comparisons of subjective and objective measures in laboratory and field studies. *Behavioral Sleep Medicine, 15*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/15402002.2016.1163700>
- Darden, C. M. (2002). *Affordable, acceptable supersonic flight: Is it near?* 16th International Session in 40th Aircraft Symposium, Yokohama, Japan. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20030012931>
- DeGolia, J., & Loubeau, A. (2017). A multiple-criteria decision analysis to evaluate sonic boom noise metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America, 141*(5_Supplement), 3624-3624. <https://doi.org/10.1121/1.4987784>
- Di Nisi, J., Muzet, A., Ehrhart, J., & Libert, J. P. (1990). Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans. *Sleep, 13*(2), 108-120. <https://doi.org/10.1093/sleep/13.2.108>
- Dobbs, M. E., Kryter, K. D., & Lukas, J. S. (1971). *Disturbance of human sleep by subsonic jet aircraft noise and simulated sonic booms* (NASA-CR-1780). NASA Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710021194>
- Draghici, A. E., & Taylor, J. A. (2016). The physiological basis and measurement of heart rate variability in humans. *Journal of Physiological Anthropology, 35*(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40101-016-0113-7>
- Eder, D. N., Elam, M., & Wallin, B. G. (2009). Sympathetic nerve and cardiovascular responses to auditory startle and prepulse inhibition. *International Journal of Psychophysiology, 71*(2), 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.09.001>
- Edinger, J. D., Fins, A. I., Glenn, D. M., Sullivan, R. J., Jr., Bastian, L. A., Marsh, G. R., Dailey, D., Hope, T. V., Young, M., Shaw, E., & Vasilas, D. (2000). Insomnia and the eye of the beholder: are there clinical markers of objective sleep disturbances among adults with and without insomnia complaints? *Journal of Consulting and Clinical Psychology, 68*(4), 586-593. <https://doi.org/10.1037/0022-006X.68.4.586>
- Elmenhorst, E.-M., Mueller, U., Quehl, J., Basner, M., McGuire, S., Schmitt, S., Plath, G., Jordan, J., & Aeschbach, D. (2024). Night-flight ban preserves sleep in airport residents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 126*, 104027. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104027>
- Eriksson, C., Pershagen, G., & Nilsson, M. (2018). *Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/346548>
- Eriksson, C., Pershagen, G., & Nilsson, M. (2019). *Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise*. World Health Organization.
- Etter, C., & Coen, P. G. (2016). Reducing sonic boom - A collective effort status report. In I. C. A. O. (ICAO) (Ed.), *ICAO Environmental Report 2016* (pp. 46-49). International Civil Aviation Organization (ICAO). <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx>
- Fabozzi, F., Focardi, S., Rachev, S., & Arshanapalli, B. (2014). *The Basics of Financial Econometrics: Tools, Concepts, and Asset Management Applications*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118856406>
- Fidell, S. (2013). Relationships among near-real time and end-of-day judgments of the annoyance of sonic booms. *Proceedings of Meetings on Acoustics, 19*. <https://doi.org/10.1121/1.4800416>
- Fidell, S., Horonjeff, R., Tabachnick, B., & Clark, S. (2020). *Independent Analyses of Galveston QSF18 Social Survey* (NASA/CR-20205005471). NASA Langley Research Center.

- Fidell, S., Silvati, L., & Pearsons, K. (2002). Relative rates of growth of annoyance of impulsive and non-impulsive noises. *Journal of the Acoustical Society of America*, *111*(1 Pt 2), 576-585. <https://doi.org/10.1121/1.1377630>
- Fields, J. M. (1997). *Reactions of Residents to Long-Term Sonic Boom Noise Environments* (NASA-CR-201704). NASA Langley Research Center.
- Fields, J. M., De Jong, R. G., Gjestland, T., Flindell, I. H., Job, R. F. S., Kurra, S., Lercher, P., Vallet, M., Yano, T., Guski, R., Felscher-Suhr, U., & Schumer, R. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, *242*(4), 641-679. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3384>
- Freiberg, A., Schefter, C., Girbig, M., Murta, V. C., & Seidler, A. (2019). Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environmental Research*, *169*, 446-463. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.032>
- Galloway, W., Johnson, D. L., Kryter, K. D., Schomer, P. D., & Westervelt, P. J. (1981). *Assessment of community response to high-energy impulsive sounds: Report of Working Group 84*. National Research Council.
- Giacomoni, C., & Davies, P. (2013). Effect of room characteristics on perception of low-amplitude sonic booms heard indoors. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, *19*(1), 040050. <https://doi.org/10.1121/1.4798955>
- Glasberg, B., & Moore, B. (2002). A model of loudness applicable to Time-Varying Sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, *50*, 331-342.
- Glick, G., & Braunwald, E. (1965). Relative roles of the sympathetic and parasympathetic nervous systems in the reflex control of heart rate. *Circulation Research*, *16*, 363-375. <https://doi.org/10.1161/01.res.16.4.363>
- Graham, F. K., & Clifton, R. K. (1966). Heart-rate change as a component of the orienting response. *Psychological Bulletin*, *65*(5), 305-320. <https://doi.org/10.1037/h0023258>
- Griefahn, B. (1975). Effects of sonic booms on fingerpulse amplitudes during sleep. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *36*(1), 57-66. <https://doi.org/10.1007/bf01267852>
- Griefahn, B. (1975). Pulsfrequenzänderung durch Überschallknalle während des Schlafes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *34*(1), 279-289. <https://doi.org/10.1007/BF00999941>
- Griefahn, B. (1990). Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, *37*, 7-14.
- Griefahn, B., & Jansen, G. (1975). Disturbance of sleep by sonic booms. *Science of the Total Environment*, *4*(1), 107-112. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(75\)90018-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(75)90018-2)
- Griefahn, B., Marks, A., & Robens, S. (2006). Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *Journal of Sound and Vibration*, *295*(1), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.052>
- Guild, E. (1962). Observations on Sonic Booms and People. *Journal of the Acoustical Society of America*, *34*(5_Supplement), 720-720. <https://doi.org/10.1121/1.1937183>
- Guilleminault, C., Stoohs, R., Clerk, A., Cetel, M., & Maistros, P. (1993). A cause of excessive daytime sleepiness. The upper airway resistance syndrome. *Chest*, *104*(3), 781-787. <https://doi.org/10.1378/chest.104.3.781>
- Guski, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise Health*, *1*(3), 45-56.
- Harrell, F. E. J. (2015). *Regression modeling strategies with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19425-7>
- Higgins, T. H., & Sanlorenzo, E. A. (1975). *Psychological tests of potential design/certification criteria for advanced supersonic aircraft* (FAA-RD-75-10). FAA Department of Transportation.

- Hosmer, D. W., Jr., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Ishikawa, H., Makino, Y., Ueno, A., & Kanamori, M. (2019). Sonic boom assessment in primary boom carpet of low-boom supersonic airplane (NASA C25D). In *AIAA Scitech 2019 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0298>
- Keränen, J., Hakala, J., & Hongisto, V. (2019). The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz. *Building and Environment*, *156*, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.061>
- Klos, J., Sullivan, B. M., & Shepherd, K. P. (2008). *Design of an indoor sonic boom simulator at NASA Langley Research Center* Noise-Con 2008,
- Krohne, H., Egloff, B., Kohlmann, C.-W., & Tausch, A. (1996). Untersuchungen mit einer deutschen Version der "Positive and Negative Affect Schedule" (PANAS). *Diagnostica*, *42*, 139-156. <https://doi.org/10.1037/t49650-000>
- Kryter, K., Johnson, P. J., & Young, J. R. (1968). *Psychological experiments on sonic booms conducted at Edwards Air Force Base* (Final Report, AF49(638)-1758). National Sonic Boom Evaluation Office.
- Kryter, K. D. (1966). Laboratory tests of physiological-psychological reactions to sonic booms. *Journal of the Acoustical Society of America*, *39*(5), Suppl:S65-72. <https://doi.org/10.1121/1.1914046>
- Kryter, K. D., Johnson, P. J., & Young, J. R. (1967). *Sonic boom experiments at Edwards Air Force Base: Interim report. Annex B, Psychological experiments on sonic booms* (AF 49(638)-1758). National Sonic Boom Evaluation Office.
- Kubios. (2025). *PNS and SNS indexes in evaluating autonomic function*. Retrieved 10.06.2025 from <https://www.kubios.com/blog/hrv-ans-function/>
- Leatherwood, J., & Sullivan, B. M. (1993). *Loudness and annoyance response to simulated outdoor and indoor sonic booms*. NASA Langley Research Center.
- Leatherwood, J. D., & Sullivan, B. M. (1992). *Effect of sonic boom asymmetry on subjective loudness* (NASA-TM-107708). NASA Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930007566>
- Leatherwood, J. D., & Sullivan, B. M. (1994). *A laboratory study of subjective annoyance response to sonic booms and aircraft flyovers*. NASA Langley Research Center.
- Leatherwood, J. D., Sullivan, B. M., Shepherd, K. P., McCurdy, D. A., & Brown, S. A. (2002). Summary of recent NASA studies of human response to sonic booms. *Journal of the Acoustical Society of America*, *111*(1 Pt 2), 586-598. <https://doi.org/10.1121/1.1371767>
- Lee, J., Rathsam, J., & Wilson, A. (2020). Bayesian statistical models for community annoyance survey data. *Journal of the Acoustical Society of America*, *147*(4), 2222-2234. <https://doi.org/10.1121/10.0001021>
- Loubeau, A., J., D. W., Coen, P., Cowart, R., Liu, S. R., Naka, Y., Page, J., Down, R. S., Lemaire, S., Wade, L., & Sparrow, V. W. (2019, December 2). *Sonic boom prediction and measurement analysis methods for certification of quiet supersonic aircraft* 178th Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, CA, United States.
- Loubeau, A., Naka, Y., Cook, B., Sparrow, V., & Morgenstern, J. (2015). A new evaluation of noise metrics for sonic booms using existing data. AIP Conference Proceedings,
- Loubeau, A., & Page, J. (2018). Human perception of sonic booms from supersonic aircraft. *Acoustics Today*, *14*(3), 23-30.
- Loubeau, A., Rathsam, J., & Klos, J. (2013). Evaluation of an indoor sonic boom subjective test facility at NASA Langley Research Center. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, *12*(1), 040007. <https://doi.org/10.1121/1.4810766>

- Loubeau, A., Sullivan, B. M., Klos, J., Rathsam, J., & Gavin, J. R. (2013). *Laboratory headphone studies of human response to low-amplitude sonic booms and rattle heard indoors* (NASA/TM-2013–217975). NASA Langley Research Center.
- Ludlow, J., & Morgan, P. (1972). Behavioural awakening and subjective reactions to indoor sonic booms. *Journal of Sound and Vibration* 25(3), 479–495. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(72\)90195-2](https://doi.org/10.1016/0022-460x(72)90195-2).
- Lukas, J. S., & Dobbs, M. E. (1972). *Effects of aircraft noises on the sleep of women* (NASA CR-2041). NASA Langley Research Center. <https://searchworks.stanford.edu/view/8634721>
- Lukas, J. S., & Kryter, K. D. (1968). *A preliminary study of the awakening and startle effects of simulated sonic booms* (NASA CR-1193). NASA Langley Research Center.
- Lukas, J. S., & Kryter, K. D. (1970). Awakening effects of simulated sonic booms and subsonic aircraft noise. In B. L. Welch & A. S. Welch (Eds.), *Physiological Effects of Noise: Based upon papers presented at an international symposium on the Extra-Auditory Physiological Effects of Audible Sound, held in Boston, Massachusetts, December 28–30, 1969, in conjunction with the annual meeting of the American Association for the Advancement of Science* (pp. 283-293). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8807-4_23
- Mabry, J. E., & Oncley, P. B. (1973). *Establishing certification/design criteria for advanced supersonic aircraft utilizing acceptance, interference, and annoyance response to simulated sonic booms by persons in their homes* (Final Report, FAA-RD-75-44). Federal Aviation Administration.
- Mabry, J. E., & Parry, H. J. (1973). *The Effect of Simulated Sonic Boom Rise Time and Overpressure on Electroencephalographic Waveforms and Disturbance Judgments* (Final Report, FAA-RD-73-115). Federal Aviation Administration.
- Maglieri, D. J., Bobbitt, P. J., Plotkin, K. J., Shepherd, K. P., Coen, P. G., & Richwine, D. M. (2014). *Sonic boom: Six decades of research* (NASA/SP-2014-622). NASA Langley Research Center.
- Maglieri, D. J., Huckel, V., & Parrott, T. L. (1961). *Ground measurements of shock-wave pressure for fighter airplanes flying at very low altitudes and comments on associated response phenomena* (NASA-TM-X-611). NASA Langley Research Center.
- Manohare, M., Garg, B., Rajasekar, E., & Parida, M. (2022). Evaluation of change in heart rate variability due to different soundscapes. *Noise Mapping*, 9(1), 234-248. <https://doi.org/10.1515/noise-2022-0158>
- Marmel, F., Cretagne, L., Thuong, L.-T., Coulouvrat, F., & Fritz, C. (2024). Impact of reduced sonic boom exposure on psychophysical and cognitive performance for simulated booms presented in a realistic indoor environment. *Acta Acust.*, 8. <https://doi.org/10.1051/aacus/2023063>
- Marmel, F., Cretagne, L., Thuong, L.-T., Coulouvrat, F., & Fritz, C. (2025). Impact of reduced sonic boom exposure on introspective judgments and annoyance, pleasantness and loudness ratings for simulated booms presented in a realistic indoor environment. *Acta Acust.*, 9. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024083>
- Marshall, A., & Davies, P. (2012). Effect of long-term time-varying loudness and duration on subjects' ratings of startle evoked by shaped sonic booms and impulsive sounds. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2012*(6), 5610-5616. <https://incc.publisher.ingentaconnect.com/content/incc/incccp/2012/00002012/00000006/art00070>
- Maschke, C. (1992). *Der Einfluß von Nachtfluglärm auf den Schlafverlauf und die Katecholaminausscheidung* [Inauguraldissertation, Technische Universität Berlin].
- May, D. N. (1971a). The loudness of sonic booms heard outdoors as simple functions of overpressure and rise time. *Journal of Sound and Vibration*, 18(1), 31-43. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90628-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90628-6)
- May, D. N. (1971). Startle due to sonic booms heard outdoors as functions of overpressure and rise time. *Journal of Sound and Vibration*, 18, 144-145.

- May, D. N. (1971b). Startle in the presence of background noise. *Journal of Sound and Vibration*, 17(1), 77-81. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90136-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90136-2)
- May, D. N. (1972). Sonic boom startle: A field study in Meppen, West Germany. *Journal of Sound and Vibration*, 24(3), 337-347. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90748-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90748-1)
- McCurdy, D. A., Brown, S. A., & Hilliard, R. (1995). *The effects of simulated sonic booms on people in their homes* 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, <https://doi.org/10.2514/6.1995-834>
- McCurdy, D. A., Brown, S. A., & Hilliard, R. D. (2004). Subjective response of people to simulated sonic booms in their homes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3), 1573-1584. <https://doi.org/10.1121/1.1781189>
- Miller, D. M. (2011). *Human response to low-amplitude sonic booms* [Doctoral dissertation, Pennsylvania State University]. University Park, PA.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Med*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Morgan, R. L., Whaley, P., Thayer, K. A., & Schünemann, H. J. (2018). Identifying the PECO: A framework for formulating good questions to explore the association of environmental and other exposures with health outcomes. *Environment International*, 121(Pt 1), 1027-1031. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.015>
- Müller, U. (2021). *ANIMA D3.2 – Development of indicators for night noise protection zones*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5517783>
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2006.09.001>
- Naka, Y. (2013). Subjective evaluation of loudness of sonic booms indoors and outdoors. *Acoustical Science and Technology*, 34, 225-228.
- NASA. (2017). *AIAA sonic boom prediction workshop 2*. Retrieved 21 March 2021 from <https://lbpw.larc.nasa.gov/sbpw2/>
- NASA. (2020). *AIAA sonic boom prediction workshop 3*. Retrieved 21 March 2021 from <https://lbpw.larc.nasa.gov/sbpw3/>
- Niedzwiecki, A., & Ribner, H. S. (1979). Subjective loudness and annoyance of filtered N-wave sonic booms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(3), 705-707. <https://doi.org/10.1121/1.382483>
- Nixon, C. W., & Borsky, P. N. (1966). Effects of sonic boom on people: St. Louis, Missouri, 1961–1962. *Journal of the Acoustical Society of America*, 39(5B), S51-S58. <https://doi.org/10.1121/1.1914044>
- Nixon, C. W., & Hubbard, H. H. (1965). *Results of the USAF-NASA-FAA flight program to study community responses to sonic booms in the greater St. Louis area* (NASA Technical Note No. D-2705). NASA Langley Research Center.
- Nixon, C. W. H., H. K.; Sommer, H. C.; Guild, E. (1968). *Sonic booms resulting from extremely low-altitude supersonic flight: Measurements and observations on houses, livestock and people* (AMRL-TR-68-52). Aerospace Medical Research Laboratories.
- Nunan, D., Sandercock, G. R., & Brodie, D. A. (2010). A quantitative systematic review of normal values for short-term heart rate variability in healthy adults. *Pacing Clin Electrophysiol*, 33(11), 1407-1417. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x>
- Ohayon, M., Wickwire, E. M., Hirshkowitz, M., Albert, S. M., Avidan, A., Daly, F. J., Dauvilliers, Y., Ferri, R., Fung, C., Gozal, D., Hazen, N., Krystal, A., Lichstein, K., Mallampalli, M., Plazzi, G., Rawding, R., Scheer, F. A., Somers, V., & Vitiello, M. V. (2017). National Sleep Foundation's sleep quality recommendations: first report. *Sleep Health*, 3(1), 6-19. <https://doi.org/10.1016/j.sleh.2016.11.006>

- Organization, I. C. A. (2022). *Assembly resolutions in force (as of 7 October 2022)* (Doc 10184, Res A41–20). ICAO.
- Page, J. A., & Loubeau, A. (2019). Aircraft Noise Generation and Assessment Section 5-Overall Vehicle System Noise, Part d-Sonic Boom. *CEAS Aeronaut J*, 10(1), 335-353. <https://doi.org/10.1007/s13272-019-00379-0>
- Page, J. A. H., K. K.; Hunte, R. P.; Davis, D. E.; Gaugler, T. A.; Downs, R.; Cowart, R. A.; Maglieri, D. J.; Hobbs, C.; Baker, G.; Collmar, M.; Bradley, K. A.; Sonak, B.; Crom, D.; Cutler, C. (2020). *Quiet Supersonic Flights 2018 (QSF18) test: Galveston, Texas risk reduction for future community testing with a low-boom flight demonstration vehicle* (NASA/CR–2020-220589, Vol. II, Appendices). NASA Langley Research Center.
- Page, J. A. H., K. K.; Krecker, P.; Cowart, R.; Hobbs, C.; Wilmer, C.; Koenig, C.; Holmes, T.; Gaugler, T.; Shumway, D. L.; Rosenberger, J. L.; Philips, D. (2014). *Waveforms and Sonic Boom Perception and Response (WSPR): Low-boom community response program pilot test design, execution, and analysis* (NASA/CR-2014-218180). NASA Langley Research Center.
- Park, M. A., & Nemec, M. (2017). *Near Field Summary and Statistical Analysis of the Second AIAA Sonic Boom Prediction Workshop* 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference, <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-3256>
- Pawlaczyk-Luszczynska, M., Dudarewicz, A., Waszkowska, M., Szymczak, W., & Sliwińska-Kowalska, M. (2005). The impact of low-frequency noise on human mental performance. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 18(2), 185-198.
- Pearsons, K. S., Barber, D. S., & Tabachnick, B. G. (1989). *Analyses of the predictability of noise-induced sleep disturbance: Final report for period February 1989 – October 1989* (Final Report, HSD-TR-89-029). U.S. Air Force Human Systems Division.
- Pearsons, K. S., & Kryter, K. D. (1965). *Laboratory tests of subjective reactions for sonic boom* (NASA CR-187). NASA Langley Research Center.
- Pearsons, K. S. T., B.; Howe, R.; Ahuja, K. K.; Stevens, J. C. (1993). *A study of the effects of sonic boom waveform modification of annoyance* (NASA-1-19061). NASA Langley Research Center.
- Persson Waye, K., Bengtsson, J., Kjellberg, A., & Benton, S. (2001). Low frequency noise "pollution" interferes with performance. *Noise Health*, 4(13), 33-49.
- Porter, N., Kershaw, A., & Ollerhead, J. (2000, //). *Adverse effects of night-time aircraft noise: Review of 1992 UK findings and introduction to new UK work* INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, <https://ince.publisher.ingentaconnect.com/content/ince/incec/2000/00002000/00000008/art00079>
- Rathsam, J., & Klos, J. (2016). Vibration penalty estimates for indoor annoyance caused by sonic boom. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 2007-2007. <https://doi.org/10.1121/1.4949897>
- Rathsam, J., Klos, J., & Loubeau, A. (2015). *Influence of chair vibrations on indoor sonic boom annoyance* AIP Conference Proceedings, <https://doi.org/10.1063/1.4934480>
- Rathsam, J., Loubeau, A., & Klos, J. (2013, 26.-28.08.2013). *Simulator study of indoor annoyance caused by shaped sonic boom stimuli with and without rattle augmentation* INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Denver, Colorado. <https://ince.publisher.ingentaconnect.com/content/ince/incec/2013/00000246/00000001/art00039>
- Rathsam, J., Loubeau, A., & Klos, J. (2015). Effects of indoor rattle sounds on annoyance caused by sonic booms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(1), EL43-EL48. <https://doi.org/10.1121/1.4922535>
- Rathsam, J., Loubeau, A., Klos, J., & Langley Research, C. (2012). *A study in a new test facility on indoor annoyance caused by sonic booms* (NASA/TM ; 2012-217332). NASA Langley Research Center.

- Rechtschaffen, A., & Kales, A., (Eds.). (1968). *A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects* (NIH Publication No. 204). U.S. Government Printing Office.
- Rice, C. G. (1972). Sonic boom exposure effects II.2: Sleep effects. *Journal of Sound and Vibration*, 20(4), 511-517. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90674-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90674-8)
- Rylander, R. (1974). The sonic boom — Effects on humans. *Sozial- und Präventivmedizin*, 19(3), 217-220. <https://doi.org/10.1007/BF01999428>
- Rylander, R., & Dancer, A. (1978). Startle reactions to simulated sonic booms: Influence of habituation, boom level and background noise. *Journal of Sound and Vibration*, 61(2), 235-243. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(78\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(78)90005-6)
- Rylander, R., Sörensen, S., & Berglund, K. (1972). Sonic boom effects on sleep—A field experiment on military and civilian populations. *Journal of Sound and Vibration*, 24(1), 41-50. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90121-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90121-6)
- Rylander, R., Sörensen, S., Berglund, K., & Brodin, C. (1972). Experiments on the effect of sonic-boom exposure on humans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51(2), 790-798. <https://doi.org/10.1121/1.1912911>
- Sanok, S., Berger, M., Müller, U., Schmid, M., Weidenfeld, S., Elmenhorst, E. M., & Aeschbach, D. (2022). Road traffic noise impacts sleep continuity in suburban residents: Exposure-response quantification of noise-induced awakenings from vehicle pass-bys at night. *Science of the Total Environment*, 817, 152594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152594>
- Schomer, P. D. (1978). Growth function for human response to large-amplitude impulse noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 64(6), 1627-1632. <https://doi.org/10.1121/1.382128>
- Schomer, P. D., & Averbuch, A. (1989). Indoor human response to blast sounds that generate rattles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 665-673. <https://doi.org/10.1121/1.398244>
- Schomer, P. D., Naidu, K., & Naidu, K. (2024, 8.-12. Mai 2023). *The importance of rattle and a non-linear exchange rate for sonic boom and blast noise assessment* 184th Meeting of the Acoustical Society of America Chicago, Illinois. <https://doi.org/10.1121/2.0001858>
- Schomer, P. D., & Neathammer, R. D. (1987). The role of helicopter noise-induced vibration and rattle in human response. *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(4), 966-976. <https://doi.org/10.1121/1.394523>
- Schomer, P. D., Sias, J. W., & Maglieri, D. (1997). A comparative study of human response, indoors, to blast noise and sonic booms. *Noise Control Engineering Journal*, 45(4), 169-182. <https://doi.org/10.3397/1.2828438>
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Shepherd, K. P., Brown, S. A., Leatherwood, J. D., McCurdy, D. A., & Sullivan, B. M. (1995, July 10–12, 1995). *Human response to sonic booms -Recent NASA research* INTER-NOISE 1995: International Congress on Noise Control Engineering, Newport Beach, CA, United States.
- Shepherd, L. J., & Sutherland, W. W. (1968). *Relative annoyance and loudness judgments of various simulated sonic boom waveforms* (NASA CR-1192). NASA Langley Research Center.
- Shoushtarian, M., Weder, S., Innes-Brown, H., & McKay, C. M. (2019). Assessing hearing by measuring heartbeat: The effect of sound level. *PLoS One*, 14(2), e0212940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212940>
- Smith, D. B. D., & Strawbridge, P. J. (1969). The heart rate response to a brief auditory and visual stimulus. *Psychophysiology*, 6(3), 317-329. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1969.tb02909.x>
- Smith, R. C., & Hutto, G. L. (1972). *Sonic booms and sleep: affect change as a function of age* (FAA-AM-72-24). FAA Office of Aviation Medicine. <https://searchworks.stanford.edu/view/8429604>

- Sparrow, V. W., & Vigeant, M. C. (2019). *Project 042 Acoustical model of mach cut-off flight* (FAA Award Number: 13-C-AJFE-PSU, Amendments 20, 33, and 4). FAA Center of Excellence for Alternative Jet fuels & Environment. <https://ascent.aero/documents/2019/07/ascent-project-042-2018-annual-report.pdf/>
- Stockfelt, L., Xu, Y., Gudmundsson, A., Rissler, J., Isaxon, C., Brunskog, J., Pagels, J., Nilsson, P. T., Berglund, M., Barregard, L., Bohgard, M., Albin, M., Hagerman, I., & Wierzbicka, A. (2022). A controlled chamber study of effects of exposure to diesel exhaust particles and noise on heart rate variability and endothelial function. *Inhalation toxicology*, *34*(5-6), 159-170. <https://doi.org/10.1080/08958378.2022.2065388>
- Sullivan, B. M. (2006, 18-22 July 2005). *Research on subjective response to simulated sonic booms at NASA Langley Research Center* 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA17) including the International Sonic Boom Forum, State College, PA. <https://doi.org/10.1063/1.2210439>
- Sullivan, B. M., Klos, J., Buehrle, R. D., McCurdy, D. A., & Haering, E. A., Jr. (2006). Human response to low-intensity sonic booms heard indoors and outdoors. *Journal of the Acoustical Society of America*, *120*(5_Supplement), 3121-3121. <https://doi.org/10.1121/1.4787647>
- Sullivan, B. M., & Leatherwood, J. D. (1993). *A laboratory study of subjective response to sonic booms measured at white sands missile range* (NASA-TM-107746). NASA Langley Research Center.
- Sullivan, B. M., & Leatherwood, J. D. (1993). *Subjective response to simulated sonic booms with ground reflections* (NASA-TM-107764). NASA Langley Research Center.
- Thackray, R. I., Rylander, R., & Touchstone, R. (1973). *Sonic boom startle effects: Report of a field study* (FAA-AM-73-11). FAA Civil Aeromedical Institute.
- Thackray, R. I., Touchstone, R. M., & Bailey, J. P. (1973). *A comparison of the startle effects resulting from exposure to two levels of simulated sonic booms* (FAA-AM-73-16). FAA Civil Aeromedical Institute.
- Thackray, R. I., Touchstone, R. M., & Jones, K. N. (1971). *The effects of simulated sonic booms on tracking performance and autonomic response* (FAA-AM-71-29). FAA Civil Aeromedical Institute.
- Thayer, J. F., Yamamoto, S. S., & Brosschot, J. F. (2010). The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *International Journal of Cardiology*, *141*(2), 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2009.09.543>
- Töpken, S., & van de Par, S. (2020, 7.-11. Dezember). *Loudness and short-term annoyance of "low sonic boom"-signatures* e-Forum Acusticum, Lyon, France.
- Töpken, S., & van de Par, S. (2021). Loudness and short-term annoyance of sonic boom signatures at low levels. *Journal of the Acoustical Society of America*, *149*(3), 2004. <https://doi.org/10.1121/10.0003779>
- Tracor, I. (1972). *Environmental influence on public response to the sonic boom* (FAA N0-70-17). FAA.
- Veggeberg, K. (2012, 2012-04-23). *Development of a sonic boom measurement system at JAXA Acoustics 2012*, Nantes, France. <https://hal.science/hal-00810587>
- Veternik, M., Tonhajzerova, I., Misek, J., Jakusova, V., Hudeckova, H., & Jakus, J. (2018). The impact of sound exposure on heart rate variability in adolescent students. *Physiological Research*, *67*(5), 695-702. <https://doi.org/10.33549/physiolres.933882>
- Von Elm, E., Schreiber, G., & Haupt, C. C. (2019). Methodische Anleitung für Scoping Reviews (JBI-Methodologie). *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, *143*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.zefq.2019.05.004>
- Von Gierke, H. E. (1966). Effects of sonic boom on people: review and outlook. *Journal of the Acoustical Society of America*, *39*(5), Suppl:S43-50. <https://doi.org/10.1121/1.1914043>
- von Gierke, H. E., & Nixon, C. W. (1972). Human response to sonic boom in the laboratory and the community. *Journal of the Acoustical Society of America*, *51*(2C), 766-782. <https://doi.org/10.1121/1.1912909>

Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(6), 1063-1070.

<https://doi.org/10.1037//0022-3514.54.6.1063>

Weidenfeld, S., Sanok, S., Fimmers, R., Puth, M. T., Aeschbach, D., & Elmenhorst, E. M. (2021). Short-term annoyance due to night-time road, railway, and air traffic noise: role of the noise source, the acoustical metric, and non-acoustical factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9).

<https://doi.org/10.3390/ijerph18094647>

Wick, A. Z., Combertaldi, S. L., & Rasch, B. (2024). The first-night effect of sleep occurs over nonconsecutive nights in unfamiliar and familiar environments. *Sleep*, 47(10). <https://doi.org/10.1093/sleep/zsae179>

Zeppler, E. E., Sullivan, B. M., Rice, C. G., Griffin, M. J., Oldman, M., Dickinson, P. J., Shepherd, K. P., Ludlow, J. E., & Large, J. B. (1973). Human response to transportation noise and vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 28(3), 375-401. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80032-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80032-X)

Zimmer, K., & Ellermeier, W. (1998). Ein Kurzfragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit. *Umweltpsychologie*, 2(2), 54-63.

A Literaturanalyse

A.1 Identifizierte Studien in der Literatursuche

Tabelle 20: Übersicht über die in der Literatursuche identifizierten relevanten Studien nach PEOS

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Anton-Guirgis, Culver, Wang, Taylor 1986 (USA, Nevada)	Anwohner von Nevada	Reale Überschallknalle	Mortalität, Morbidität	Epidemiologische Studie	Keine Hinweise für oder gegen eine Beziehung zwischen der Exposition zu Überschallknallen und negativen Gesundheitswirkungen
Borsky 1965 (USA, Oklahoma)	2852	1253 reale Überschallknalle, tagsüber, 8 am Tag (M = 128,64 dB, 11 Wochen; 129,38 dB, 8 Wochen; 131,66 dB, 7 Wochen); Distanz	Störungen, Startle, Belästigung, Angst, Beschwerdeverhalten, Einstellungen, Akzeptanz	Feld, 6 Monate, 3 Messzeitpunkte (t1, t2, t3)	Beinahe alle Teilnehmenden berichteten von Störungen durch Überschallknallbedingten Rattle und Vibrationen; 40 % der Teilnehmenden, die im Radius von bis zu 12,9 km wohnen, geben Startle-Reaktionen und Angst an und 30 % der Teilnehmenden, die weiter entfernt wohnen; 10 - 15 % der ersten und 5 % der zweiten Gruppe nennen Schlaf-, Ruhe, und Konversationsstörungen durch Überschallknalle; 11 Wochen nach Beginn (M = 128,64 dB SPL) waren 37 % ernsthaft belästigt; dann 44 % bei M= 129,38 dB SPL und 56 % bei 131,66 dB SPL-> unklar ob Anstieg in Belästigung durch die höheren Pegel oder die andauernde Expositionszeit verursacht wird; Wunsch, sich zu beschweren: t1 = 16 %, t2 = 23 %, t3 = 22 %; 5% beschwerten sich → geringer Prozentanteil von Beschwerden könnte auch an Unwissenheit liegen, wo man sich beschweren kann oder am wahrgenommenen Sinn einer Beschwerde: insgesamt wird sich in Oklahoma wenig beschwert; an t3 gaben 27 % an, dass sie Überschallknalle für eine unbestimmte Zeit nicht akzeptieren könnten; Einstellungen hatten einen Effekt auf die Akzeptanz
Broadbent & Robinson 1964 (Großbritannien)	79	Düsenflugzeug (98,7 dB SPL, 111,7 dB PNL), Flugzeuge mit Kolbenmotor (96,9 dB	Belästigung (0-100; Referenz 10 = Düsenflugzeug)	Experiment	Belästigung und Lautheit weisen ähnliche Zusammenhänge mit SPL auf; Bei Überschallknallen ist der Anstieg steiler; Obere Akzeptanzgrenze für Überschallknalle indoors bei 133,15 dB SPL (eventuell +/- 6 dB)

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Carr & Davies 2015 (USA)	30 (NASA Test) & 35 (Purdue Test)	SPL, 102,5 dB PNL), Überschallknalle drinnen (114 dB SPL) Simulierte und aufgezeichnete Low Sonic Booms; Türenschnlagen, Explosionen, Schießlärm; PL, PNL, A, B, C, E SEL, Lang- und Kurzzeit Lautheit, Zwicker Lautheit, Dauer, H (CSEL-ASEL); NASA mit Simulator und Purdue mit Kopfhörern	Belästigung (5-Punkte Skala; NASA: Schieber konnte an jede Stelle geschoben werden; Purdue nach Fields et al. 2001)	Experiment	Sowohl indoor als auch outdoor akustische Metriken eignen sich für Belästigungsmodelle. Modelle mit mehreren Metriken und einer hohen Varianzaufklärung enthielten PL, Dauer, H, Lautheit; Lautheit und Belästigung erfassen unterschiedliche Konzepte; die Rolle von niedrigfrequenten Anteilen unterscheidet sich zwischen Lautheit und Belästigung; die besten Einzel-Metrik Modelle beinhalten die maximale Zwicker Lautheit und PL
Carr, Davies, Loubeau, Rathsam & Klos 2020 (USA)	30 (NASA Test) & 35 (Purdue Test)	Simulierte und aufgezeichnete Low Sonic Booms; Türenschnlagen, Explosionen, Schießlärm; PL, PNL, A, B, C, E SEL, Lang- und Kurzzeit Lautheit, Zwicker Lautheit, Dauer, H (CSEL-ASEL); NASA mit Simulator und Purdue mit Kopfhörern	Belästigung (5-Punkte Skala; NASA: Schieber konnte an jede Stelle geschoben werden; Purdue nach Fields et al. 2001)	Experiment	Am belästigsten sind laute Überschallknalle, meist synthetisch und nicht 50 Hz hochpassgefiltert; geringere Belästigung bei Geräuschen mit weniger tiefen Frequenzen; Das Belästigungsempfinden in der Purdue Gruppe fällt bei Belästigungswerten unter 5 höher aus und die durchschnittliche Belästigung bei NASA Gruppe weist auf einen Sättigungseffekt hin; eine höhere Amplitude geht mit höherer Belästigung einher; niedrige Frequenzen zwischen 25-50 Hz könnten bei ausreichendem Vorhandensein zu höherer Belästigung führen; Ergebnisse von Purdue und NASA korrelieren hoch miteinander, wenn Vibrationen nicht vorhanden oder gering sind; unter 25 Hz kein Unterschied in Belästigung, jedoch Unterschiede in Belästigung unter 50 Hz
Chiles & West 1972 (USA)	24	8 simulierte Überschallknalle stündlich pro Nacht (6. -	Performance Aufgaben (Monitoring, Kopfrechnen, Mustererkennung)	Experiment	Keine Effekte der nächtlichen Überschallknalle auf die Performance Aufgaben

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Clark 1967 (USA, Edwards)	ca. 300	17. Testnacht) mit 127,85 dB SPL outdoor Reale Überschallknalle, 3-8 pro Tag, 4 Jahre	Akzeptanz	Experiment	Draußen gehörte Überschallknalle sind weniger akzeptabler als drinnen gehörte Überschallknalle; die wahrgenommene Unannehmlichkeit von Überschallknallen stieg schneller an als die Intensität bzw. Lautstärke der Überschallknalle; 27 % der Edwards Anwohnenden und 40 % von Anwohnenden anderer Kommunen halten Überschallknalle mit 132,14 dB SPL als beinahe nicht tolerierbar; Teilnehmende reagierten sensibler auf Überschallknalle als auf herkömmlichen Fluglärm; Unterschiede von 1 dB bei Überschallknallen konnten wahrgenommen und von Teilnehmenden unterschieden werden; 71 % gaben an, dass Überschallknalle das unakzeptabelste Geräusch sind, was sie je gehört haben
Collins & Iampietro 1972 (USA)	24	Simulierte Überschallknalle, stündlich, 6.-17. Nacht, 127,58 dB SPL outdoors	Aufwachreaktionen, Schlafrhythmus (BSR ³ , EEG, EKG ⁴ , EMG ⁵ , EOG ⁶)	Experiment, 21 aneinanderfolgende Tage	Bei keiner der Messung gab es einen signifikanten Effekt der Überschallknalle auf den Schlafrhythmus; bei allen Teilnehmenden führten einzelne Überschallknalle zu Veränderungen im EKG, EMG und BSR; innerhalb der Minute nach einem Überschallknall erhöhte sich die Herzrate; bei 40-45 % der Überschallknalle traten EMG Reaktionen auf und bei 19 % der Überschallknalle kam es zu BSR Veränderungen; mit höherem Alter traten diese Reaktionen häufiger aus; gemessene Reaktionen ungefähr vergleichbar mit Reaktionen auf einen vorbeifahrenden Truck mit 40-45 dB(A)
Fidell, Silvati & Pearsons 2002 (USA)	29	Simulierte Überschallknalle indoor und aufgezeichnete reguläre Flugzeuge; 97 Paare: B-727 Start	Belästigung (Paarvergleiche)	Experiment	Geräusche mit niedrigfrequentem Oktavband waren gleich belästigend wie Überschallknalle und beides wurde um 10 dB geringer eingeschätzt als Geräusche mit mehr hochfrequenten Anteilen; kein Unterschied zwischen der unterschiedlichen Dauer der Überschallknalle; Rattle zeigte signifikanten Effekt: 73 dB ohne Rattle und 78 dB mit Rattle; Belästigung hing positiv mit

³ BSR = Basal Skin Resistance, Elektrischer Hautwiderstand

⁴ EKG = Elektrokardiogramm

⁵ EMG = Elektromyogramm

⁶ EOG = Elektrookulogramm

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
		(ASEL); kurze und lange Überschallknalle mit und ohne Rattle (CSEL); 63-Hz und 1-kHz Oktavbänder			Überschallknallpegeln zusammen; der Anstieg der Belästigung durch Überschallknalle ohne Rattle war im Verhältnis 2:1 im Vergleich zu regulären Fluggeräuschen und mehr hochfrequenten Geräuschen (CSEL); Bei gleicher Belästigung waren die durchschnittlichen dB-Werte von nicht-impulshaften Variablen um 5 dB höher bei Überschallknallen mit Rattle im Vergleich zu Überschallknallen ohne Rattle
Galloway, Johnson, Kryter, Schomer & Westervelt 1981 (USA)			Belästigung	Reanalyse	die Belästigung steigt mit höherem Pegel schneller bei energiereichen impulsivhaften Geräuschen als bei herkömmlichen (vgl. auch Kryter 1968 und Borsky 1965)
Griefahn & Jansen 1975 (Deutschland)	2	2 - 16 Überschallknalle in Expositions Nächten (127,6 - 137,2 dB SPL (80 – 89 dB(A); M = 83,5 dB(A)), typische N-Wave, Dauer von 300 ms	Schlaf (Fingerpulsamplitude, EEG)	Experiment, 57 Nächte	Über alle Geräuschkategorien zeigten sich Schlafstörungen; kein Gewöhnungseffekt; eine Kompensationstendenz zeigte sich in den Nächten mit 4 Überschallknallen; Überschallknalle verkürzten signifikant die Tiefschlafphase
Griefahn 1975a (Deutschland)	4 (2 pro Experiment)	2 - 16 Überschallknalle in Expositions Nächten (127,6 - 137,2 dB SPL (80 – 89 dB(A); M = 83,5 dB(A)), typische N-Wave, Dauer von 300 ms	Schlaf (Fingerpulsamplitude, EEG)	Experiment	Signifikante Abnahme in Fingerpulsamplitude, 3 Sekunden nach Exposition und gefolgt von Zunahme bis Vorher-Wert; Kein Zusammenhang zwischen Überschallknalllautstärke und Fingerpulsamplitude
Griefahn 1975b (Deutschland)	4 (2 pro Experiment)	2 - 16 Überschallknalle in Expositions Nächten (127,6 - 137,2 dB SPL (80 – 89 dB(A); M = 83,5	Schlaf (Fingerpulsamplitude, EEG)	Experiment	Signifikante Abnahme in Fingerpulsamplitude, 3 Sekunden nach Exposition und gefolgt von Zunahme bis Vorher-Wert; Kein Zusammenhang zwischen Überschallknalllautstärke und Fingerpulsamplitude

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Higgins & Sanlorenzo 1975 (USA)	42	dB(A)), typische N-Wave, Dauer von 300 ms 15 simulierte Überschallknalle, 83-107 dB PL, 80-100 ms	Belästigung, Akzeptanz	Experiment	Beim Gleichen Pegel dB PL werden Überschallknalle, die drinnen gehört werden, signifikant weniger akzeptiert als wenn sie draußen gehört werden würden; wenn ein Überschallknall von 90 dB PL drinnen gehört und draußen gemessen wurde, finden ihn 98 % akzeptabel; wenn der Überschallknall sowohl drinnen wahrgenommen und gemessen wird, ergibt sich ein Äquivalent zu 98 % Akzeptanz bei 69 dB PL; 80 % Akzeptanz ergeben sich bei 90 dB PL wenn der Überschallknall draußen gehört und gemessen wird
Kryter, Johnson & Young 1967 (USA, Edwards)	Ca. 300	Reale Überschallknalle, Flugzeug (gemessen indoors)	Akzeptanz (13-Punkte Skala: sehr akzeptabel bis unakzeptabel)	Experiment	Teilnehmende, die Überschallknalle bereits seit einigen Jahren ausgesetzt waren, zeigten eine höhere Akzeptanz im Vergleich zu Teilnehmenden ohne vorherige Expositionserfahrung; Teilnehmende mit vorheriger Exposition bewerteten einen Überschallknall mit 132,19 dB SPL als weniger akzeptabel als herkömmlichen Fluglärm mit 109 dB PNL; Frequenzen zwischen 20 – 500 Hz scheinen hauptsächlich die Reaktionen zu Überschallknallen hervorzurufen
Kryter, Johnson & Young 1968 (USA, Edwards)	Ca. 300	Reale Überschallknalle, Flugzeug (gemessen indoors)	Akzeptanz (13-Punkte Skala: sehr akzeptabel bis unakzeptabel)	Experiment	Teilnehmende, die Überschallknalle bereits seit einigen Jahren ausgesetzt waren, zeigten eine höhere Akzeptanz im Vergleich zu Teilnehmenden ohne vorherige Expositionserfahrung; Teilnehmende mit vorheriger Exposition bewerteten einen Überschallknall mit 132,19 dB SPL als weniger akzeptabel als herkömmlichen Fluglärm mit 109 dB PNL; Frequenzen zwischen 20 – 500 Hz scheinen hauptsächlich die Reaktionen zu Überschallknallen hervorzurufen
Leatherwood & Sullivan 1992 (USA)	40	Simulierte asymmetrische und symmetrische N-Wave; Überschallknall-Signaturen mit varierten Anstiegszeiten und Überdruckleveln, Dauer	Lautheit	Experiment	Bei gleichem PL waren asymmetrische Signaturen im Vergleich zu symmetrischen Signaturen weniger laut; in Abhängigkeit der Asymmetrierichtung verringerte sich die Lautheit mit höherer Überschallknall-Asymmetrie unterschiedlich stark

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
		von 300 ms; ASEL, PL; 225 Teststimuli			
Leatherwood & Sullivan 1993 (USA)	72	Simulierte outdoor und indoor Überschallknalle; zwei Bedingungen: geöffnetes und geschlossenes Fenster; 135 simulierte N-Wave und FSM (front shock minimized) Signaturen	Lautheit, Belästigung	Experiment	Als Messkriterium für outdoor Überschallknalle eignen sich Lautheit und Belästigung gleichermaßen, allerdings nicht für indoor Überschallknalle; Belästigung indoor fiel signifikant höher aus als Lautheit indoor; PL geeignet um Lärmwirkungen von Überschallknallen vorherzusagen
Leatherwood & Sullivan 1994 (USA)	96 (32/Experiment)	simulierte Überschallknalle (symmetrische N-Wave mit 1 ms und 3 ms Anstiegszeit; aufgezeichnete reguläre Fluggeräusche (indoors); PL, PNL, CSEL, ASEL	Belästigung: Experiment 1 und 3: 11-Punkte Skala; Experiment 2: Paarvergleiche	Experiment	Beinahe alle Überschallknallpegel waren höher bei gleicher Belästigung als reguläre Überflugergeräusche, mit Ausnahme von ASEL
Lee, Rathsam & Wilson 2020 (USA, Galveston)	371	52 leise Überschallknalle; 56-90 dB PL	Belästigung (Sonic Boom gehört; 5-Punkte Skala)	Feld	1 %HA; Vergleich von Multilevel logistischem und ordinalem Regressionsmodell: Expositions-Wirkungskurven ähneln sich sehr, aber unterscheiden sich, wenn für einen bestimmten %HA die Exposition berechnet wird (Unterschied von 2,5 dB liegt innerhalb der KI); Vergleich zu WSPR: ähnliche Belästigungswerte, wobei WSPR Teilnehmende zuvor bereits Überschallknallen ausgesetzt waren
Ludlow & Morgan 1972 (Vereinigtes Königreich)	16	Simulierte Überschallknalle: 71,2; 74,2 und 77,6 dB(A) im 1. Experiment und 69;	Aufwachen mittels Knopfdrücken, Subjective Stress Scale, Subjective Fatigue Skala, Clyde	Experiment	1. Experiment: keinen Einfluss auf die Aufwachhäufigkeit (Knopfdrücken); Exposition zu Überschallknallen hatten signifikanten Einfluss auf die Werte der Subjective Fatigue Scale 2. Experiment: signifikant häufigeres Aufwachen in Expositions Nächten und je lauter die Überschallknalle desto häufiger wachten Teilnehmende auf; Alle

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Lukas & Dobbs 1972 (USA)	8	79 und 84,5 dB(A) im 2. Experiment Simulierte Jet Überflüge (101, 113, 119 dB PNL), Überschallknalle (124,1, 135,54, 141,56 dB SPL), gemessen outdoors	Mood Scale, Persönlichkeitstest, Schlaffragebogen Aufwachreaktionen (EEG)	Experiment, 14 aufeinanderfolgende Tage	schlaf-bezogenen Tests zeigten signifikant schlechtere Werte je lauter die Überschallknalle waren 42 % der Jet Überflugeräusche und 15 % der Überschallknalle führten zu Aufwachreaktionen; Im Vergleich zu Männern (Daten aus anderer Studie) wachten Frauen häufiger durch Jet Überflüge auf und weniger zu Überschallknalle
Lukas & Kryter 1968 (USA)	8	Simulierte Überschallknalle (outdoors), Jet Überflüge; 127,58 dB SPL outdoor; Dauer 100 ms; 10 ms Anstiegszeit	Startle (EMG), Aufwachreaktionen (EEG, REM ⁷ mittels Elektroden); motorische Performanceaufgabe	Experiment	In Stage 2 Schlaf führen Überschallknalle mit 127,58 dB SPL und 133,6 dB SPL outdoor zu signifikant mehr Aufwachreaktionen als leisere Überschallknalle (n=2); Adaption zu geringeren Pegeln; Startle-Reaktionen kommen vor; bei motorische Performanceaufgabe führten Überschallknalle zu einer langsameren Geschwindigkeit der Teilnehmenden, hatten jedoch keinen Einfluss auf die Genauigkeit
Mabry & Oncley 1973 (USA)	12 Familien	Simulierte Überschallknalle, tagsüber (3 Pegel und 2 Häufigkeitsverteilungen)	Akzeptanz, Störungen, Belästigung	Feld (in-home Community noise simulation system)	Es wird ein Pegel von 87 dB (Stevens' Mark VI) als Überschallknall Design-/Zertifizierungsschwellenwert für die Akzeptanz von Überschallknallen bezogen auf das Wohnen in Innenräumen mit nicht mehr als 15 Sonic Booms pro Tag vorgeschlagen sowie keine nächtliche Exposition zu Überschallknallen
Mabry & Parry 1973 (USA)	50	Simulierte Überschallknalle zwischen 127-136,68 dB SPL und Anstiegszeiten von 7ms und 15 ms	Schlaf, Ruhen, Dösen, Störungen	Experiment	Kein Unterschied in EEG-Messungen erkennbar; Großteil der Teilnehmenden (92 %) fühlten sich nicht gestört durch Überschallknalle, jedoch sind Überschallknalle mit kürzerer Anstiegszeit störender; 94 % fühlten sich durch Überschallknalle mit 100 dB PNL nicht gestört; um annähernd 100 %e Akzeptanz in der Bevölkerung zu erreichen, dürften die Überschallknalle wahrscheinlich nicht lauter als 90 dB PNL sein

⁷ REM = Rapid Eye Movement Schlaf

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien- design	Ergebnisse
May 1972 (Deutschland)	39	Überflüge erzeugten 53 Überschallknalle (nur draußen zu hörende Überschallknalle wurden berücksichtigt → N-Wave); 131 dB SPL; 2 ms - 39 ms Anstiegszeit	Startle (Referenz: Türenschiagen), Aufenthaltsort	Feld, 10 aufeinander folgende Tage	Kürzere Anstiegszeiten sind bei demselben dB Level mit höheren Startle-Werten verbunden
McCurdy, Brown & Hilliard 2004 (USA)	33	4-63 simulierte Überschallknalle pro Tag; 56 Tage; herkömmliche N-Waves indoors und outdoors sowie shaped N-Waves outdoors; 66, 70, 74 dB ASEL; 4, 10, 13, 25, 33, 44, 63 Mal innerhalb von 14h Testperiode SEL, ASEL, CSEL), Zwicker Lautheit, PNL, PL	Belästigung (11-Punkte Skala), Aktivitäten, Aufenthaltsort, Startle (Ja/Nein)	Feld (in-home noise generation)	Belästigung steigt mit höherer Anzahl an Überschallknalle; PL war signifikant besser im Vorhersagen von Belästigung als andere Metriken; kein signifikanter Unterschied zwischen den Wellenformen; höhere Belästigung, wenn Person auch Startle-Reaktion zeigt; höhere Belästigung, gleichwertig zu 1,5 dB je Stunde Schlafen, Nickerchen machen & Ausruhen; geringere Belästigung (0,75 dB) je Stunde Kommunikation und Fernsehschauen/ Radio hören oder ähnliches (0,5 dB); höhere Belästigung, gleichwertig zu Anstieg um 0,25 dB pro Anstieg im Alter um ein Jahr
Niedzwiecki & Ribner 1979 (Kanada)	25	Simulierte Überschallknalle, N-Wave, Anstiegszeit 1 ms und Dauer 150 ms; Frequenzen unter 25 Hz und 50 Hz wurden abgeschnitten	Lautheit, Belästigung (Paarvergleiche)	Experiment	Weniger tiefe Frequenzen führten zu etwas weniger Lautheit und zu etwas mehr Belästigung

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Nixon & Borsky 1966 (USA, St. Louis)	1043	66 Überschallflüge; Überdruckmessung der Sonic Booms	Beschwerdeverhalten	Feld (Vorher-/Nachher - Befragung)	Innerhalb eines Gebäudes gehörte Überschallknalle waren weniger akzeptabel als außerhalb, eventuell aufgrund der längeren Dauer, des Rattles oder Erschütterung von Gegenständen und Vibrationen; keine Überdruckgrenze unterhalb dessen keine Reaktionen auf Überschallknalle auftreten oder alle Überschallknalle akzeptabel sind; Reaktionen auf Überschallknalle waren sehr variabel und komplex; obwohl beinahe alle Anwohnenden Störungen durch Überschallknalle berichteten, fiel die Belästigung relativ gering aus; die Anzahl von Beschwerden insgesamt stand im Zusammenhang mit der Anzahl an Überflügen; militärisch verursachte Überschallknalle sind akzeptabler als Überschallknalle von kommerziellem Flugverkehr; kommerzieller Überschall-Flugverkehr wurde von nur wenigen Teilnehmenden als wichtig angesehen; nachts viel die Akzeptanz geringer aus als tagsüber; ein einzelner Überdruckwert als Prädiktor für Akzeptanz scheint wenig sinnvoll
Nixon & Hubbard 1965 (USA, St. Louis)	1043	66 Überschallflüge; Überdruckmessung der Überschallknalle	Störungen, Belästigung, Beschwerdeverhalten	Feld (Vorher-/Nachher - Befragung)	Erschütterung des Gebäudes und Startle-Reaktionen wurden als häufigste Störungen genannt; 90 % berichteten von ein paar Störungen, 35 % sind belästigt und weniger als 10 % wollen sich beschweren und weniger als 1 % haben sich beschwert; innerhalb der 3 Monate nach Abschluss der Hauptstudie (66 Überflüge) fanden noch 74 weitere Flüge statt, was zu einer deutlichen Erhöhung der Beschwerden führte
Nixon et al. 1968 (USA)	Personal & Anwohner	4 reale Überschallknalle täglich, erzeugt durch F-4C, 165-170 dB SPL unter Flugschneise & 161-169 dB SPL an unterschiedlichen Entfernungen	Beobachtung von Effekten bei Personal, Unterbrechungen von Aufgaben, Startle; gemeldete physiologische Symptome von Anwohnenden	Feld	Auch sehr laute Überschallknalle führen zu keinen direkten Verletzungen bei Menschen; Anwohner berichteten von keinen physiologischen Symptomen; Personal: Durchführung der Aufgabe wurde nicht unterbrochen, Startle-Reaktion war zu beobachten ebenso wie ducken oder zusammenzucken
o.V.* 1970 (USA)	6	Simulierte Überschallknalle, Jet-Überflug	Schlaf (EEG, Knopfdruck)	Experiment	Altersgruppenunterschied (alt, mittel, jung): 67 % der Zeit wachte die ältere Gruppe durch Überschallknalle und Jetgeräusche auf, die mittlere Altersgruppe 5 % der Zeit und die Kinder 2 %; ältere Gruppe zeigt etwas Adaption in der 2. Schlafphase

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Rathsam, Klos & Loubeau 2015 (USA)	30	simulierte und aufgezeichnete Low Sonic Booms, Vibration (isolierter und nicht-isolierter Stuhl), Schießlärm, Autotürenschnlagen, Explosionen (47-87 dB PL)	Belästigung (5-Punkte Skala)	Experiment	Durchschnittliche Belästigung hängt von der vorherigen Belästigungsbeurteilung ab (vorher isolierter bzw. nicht-isolierter Stuhl) → Reanalyse mit nur einer Isolierungsgruppe (n=15) zeigt einen kleinen Effekt von Vibration auf die Belästigung
Rathsam, Loubeau & Klos 2015 (USA)	33	Simulierte Low Sonic Booms und aufgezeichneter Rattle; 124 Signale: Kombination aus Sonic Booms (65, 73, 81 dB PL) mit und ohne Rattle und mit verschiedenen Amplituden; PL CSEL, ASEL	Belästigung (Cursor auf kontinuierlicher Skala wurde in Wert zwischen 0 (überhaupt nicht) und 4 (äußerst) übersetzt)	Experiment	Indoor PL eignet sich gut für Vorhersage von indoor Belästigung durch Low Sonic Booms mit und ohne Rattle; es bieten sich fiktive Belästigungsmodelle an, die indoor Rattle umfassen, wobei psychologische Faktoren allerdings nicht berücksichtigt werden; Belästigungsmodelle mit Rattle-Effekten können in Bezug auf die outdoor Geräusche ausgedrückt werden
Rylander & Dancer 1978 (Frankreich)	39	Simulierte Überschallknalle (133,97, 137,5, 140 dB SPL), Anstiegszeiten von 1 ms, 5 ms, 8 ms; Dauer 300 ms; mit und ohne Verkehrslärm (Gruppe 1: 60 dB(A); Gruppe 2: 75 dB(A))	Startle (via Handstabilitätsmessung)	Experiment	Startle-Reaktionen nahmen für niedrige und mittlere Überschallknallpegel ab; bei hohen Pegeln nahmen Startle-Reaktionen langsamer ab und erreichten kein Plateau; Gewöhnungseffekt zeigte sich, Anzahl der Teilnehmende, die eine Startle-Reaktion zeigten blieb gleich; größere Startle-Reaktion bei kürzeren Anstiegszeiten der Überschallknalle
Rylander, Sørensen &	189 Soldaten für	7 reale Überschallknalle mit 109,5-130,1 dB SPL (immer um 04:25h)	Schlaf (Knopf drücken & Bettbewegungsmesser)	Feld	Reaktionen standen im Zusammenhang mit dem outdoor Überdruck der Überschallknalle; die Soldaten verzeichneten bei 129,5 dB SPL eine Erhöhung um 10 % bei der Aufwachwahrscheinlichkeit; kein Zusammenhang zwischen

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Berglund 1972 (Schweden)	Schlafstudie (179 nahmen auch an Befragung teil), 212 Zivilist*innen (Befragung)		unterm Bett; Kontrollnächte ohne Booms); Belästigung, Aufwachhäufigkeit, Bewertung und Vergleich von Überschallknallen mit Verkehrslärm, Schießlärm, herkömmlicher Fluglärm sowie Gewitter; Persönlichkeitstest; Befragung: Anzahl wahrgenommener Booms, Einschlafschwierigkeiten nach Aufwachen		Anstiegszeit, Überdruck und Bettbewegungen oder Drücken des Knopfes; Soldaten, die aufgrund der Überschallknalle aufwachten, wiesen einen höheren neurotischen Wert auf; 2 % berichteten von Schwierigkeiten wieder einzuschlafen, 21 % empfanden die Überschallknalle als belästigend und 3 % als sehr belästigend; bei 109,5 dB SPL wurden keine Effekte gefunden; 56 % der Zivilist*innen berichteten bei 129,5 dB SPL von Schwierigkeiten wieder einzuschlafen; unabhängig von der Anzahl der tatsächlich gehörten Überschallknalle bewerteten die meisten Zivilist*innen die Überschallknalle als belästigend; 50 % derjenigen, die 3 oder mehr Überschallknalle gehört hatten, waren stark belästigt; mit höherem Alter werden mehr Schlafstörungen berichtet
Rylander, Sörensen, Berglund & Brodin 1972 (Schweden)	33 Frauen (Testung, Befragung), 165 Soldaten (Befragung)	42 reale Überschallknalle; bis zu 142,2 dB SPL	Visuelle Performance Aufgabe, Tracking Aufgabe, Belästigung, Aktivitäten	Experiment, Feld	Überschallknalle führten bei der visuellen Performance Aufgabe zu weniger richtigen Antworten und bei der Tracking Aufgabe nahm die Präzision sowohl bei niedrigeren als auch höheren Überschallknallpegeln signifikant ab → Überschallknallpegel hat keinen Einfluss, sondern die Exposition an sich; bei Befragung zeigte sich, dass Anteil belästigter Soldaten mit steigenden Überschallknallpegeln bis zu 133,9 dB SPL deutlich zunahm; mit steigendem Überschallknallpegel steigt %HA linear an; bei 133 dB SPL gaben 50 % an belästigt zu sein und bei 132 dB SPL waren 8 % sehr belästigt; mehr Soldaten als Testpersonen gaben an, belästigt zu sein: Testpersonen hatten positivere Einstellung zu Überschallknallen und innerhalb eines Gebäudes hören sich Überschallknalle runder an als außerhalb
Schomer 1978 (USA)			Belästigung	Reanalyse	Wachstumsfunktion als Ergebnis: Anstieg von 10 dB geht mit Verdopplung der Belästigung einher

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Schomer, Sias & Maglieri 1997 (USA)	232	20 reale Überschallknalle (120 - 135 dB), 30 Explosionen (125 - 130 dB); Vergleich mit weißem Rauschen; ASEL, CSEL; Testungen in schwerem Backsteinhaus, Gebäude mit Holzrahmenbau, mobiler Büroanhänger; jeweils ein 2,5-stündiger Test pro Tag	Belästigung (Paarvergleiche)	Experiment	Bei gleichem CSEL fällt die Belästigung durch Überschallknalle höher aus als die für Explosionen (5 dB Unterschied); Zudem hängen outdoor CSEL besser mit der indoor erfassten Belästigung zusammen als indoor CSEL
Shepherd & Sutherland 1967 (USA)	20-40	Simulierte Überschallknalle; unterschiedliche Anstiegszeiten und Dauer; 0,5 N-Wave (Standard und N-Sawtooth)	Belästigung, Lautheit	Experiment	Längere Anstiegszeiten stehen mit geringerer Belästigung und Lautheit in Zusammenhang; die Dauer hat keinen Effekt; die Spike-Bow Modifikation führte zu einer höheren Lautheit
Smith & Hutto 1972 (USA)	24	Simulierte Überschallknalle; Exposition stündlich in 6. - 17. Nacht; outdoors: 127,58 dB SPL; in Schlafräumen gemessen: 107,58 dB SPL	Stimmungsänderungen (Composite Mood Adjective Checklist)	Experiment, 21 aufeinanderfolgende Nächte	Überschallknalle hatten keinen Einfluss auf die Stimmung (als Proxy für Schlaf); bei Überschallknallen mit solch niedrigen Pegeln ist es laut Autoren unwahrscheinlich, dass sie eine negative Wirkung auf die Stimmung haben
Sullivan & Leatherwood	48	Simulierte und aufgezeichnete Überschallknalle	Lautheit	Experiment	Bezogen auf PL gibt es keine Unterschiede in der Lautheitsbeurteilung zu den verschiedenen Formkategorien (shape categories) → PL ist für Wellenformunterschiede verantwortlich; optimierte Überschallknalle mit

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
1993a (USA, White Sands)		(optimierte N-Wave, optimierte Booms mit mittleren Schocks); Die aufgezeichneten Überschallknalle enthielten folgende Formkategorien: N-Wave, spitz, abgerundet, U-förmig; PL, Zwicker Lautheit Level			mittleren Schocks (intermediate shocks) wurden als leiser eingeschätzt als aufgezeichnete Überschallknalle (um 2,7 dB PL weniger laut)
Sullivan & Leatherwood subjective 1993b (USA)	48	Überschallknalle aus N-Wave und minimierten Signaturen mit front-shock-Zeit von 3, 6 und 9 ms und einer Dauer von 300 ms; reflektierte Sonic Booms mit Verzögerung von 0 - 12 ms	Lautheit	Experiment	Reflektierte Überschallknalle mit Verzögerung ($\neq 0$ ms) wurden als weniger laut wahrgenommen als Überschallknalle ohne Reflektionsverzögerung (0 ms); insbesondere bei gleicher Dauer von Verzögerung und front-shock-Anstiegszeit war die Lautheit am geringsten und ging teilweise mit einer Reduzierung von bis zu 6 - 7 dB einher; PL eignet sich gut, um Lautheit zu erfassen
Thackray, Rylander & Touchstone 1973 (Schweden)	60	reale Über- und Unterschallflüge (129,5-146,44 dB SPL); Testung von Gewöhnungseffekt; Startpistole als Referenz (107 dB)	Startle (Handstabilität, Video-aufgezeichnet)	Experiment (6 Tage)	Durchschnittlicher Ausschlag der Reaktionen unterschied sich signifikant zwischen geringer und hoher Exposition; ältere Teilnehmende zeigten weniger Startle-Reaktionen; kein Gewöhnungseffekt; 10 % der Teilnehmenden zeigten bei outdoor Pegeln von 130,8 - 135,5 dB SPL eine Startle-Reaktion und 75 % bei 143,5 dB SPL; bei outdoor Pegeln von 137,5 - 139 dB SPL zeigt sich abrupter Anstieg in Startle-Reaktionen; fraglich ob jemals ganze Bevölkerung einen Gewöhnungseffekt zeigen würde; die Schwelle für Startle-Reaktionen liegt wohl bei 127,95 dB SPL oder weniger
Thackray, Touchstone &	20	Simulierte Überschallknalle (outdoor SPL 127,95-	Arm-Hand Startle, Hautleitfähigkeit, Herzrate, Blinzelreflex	Experiment	Signifikanter Unterschied in Startle-Häufigkeit zwischen geringeren und höheren Überschallknallpegeln; kein Unterschied zwischen geringeren und höheren Pegel bezüglich Grad der Startle-Reaktion; geringer %-Anteil zeigte leichte

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien-design	Ergebnisse
Bailey 1973 (USA)		137,5 dB); Anstiegszeit von 5,5 ms; indoor Messungen (dB und dB(A)); Vergleich mit Pistolenschuss			Startle-Reaktion (Arm/Hand) bei 127,95 dB SPL; geringere Pegel führen anscheinend eher zu Orientierungsreaktion und höhere Pegel zu Startle-Reaktionen; kein Unterschied zwischen Expositionsgruppen zum Pistolenschuss
Thackray, Touchstone & Jones 1971 (USA)	40	4 simulierte Überschallknalle outdoors) über 30-minütigen Zeitraum; 127,58 dB SPL, 133,6 dB SPL, 139,6 dB SPL; 295 ms	Tracking Aufgabe, Hautleitfähigkeit, Herzrate	Experiment	Für keinen der Überdrucklevel wurde ein Effekt auf die Performance gefunden; nach einem Überschallknall verbesserte sich die Performance signifikant und die Hautleitfähigkeit und Herzrate erhöhten sich ebenfalls → gegebenenfalls eher Alarm- bzw. Orientierungsreaktion statt Startle; Anstiegszeiten sollten jedoch berücksichtigt werden
Töpken & van de Par 2020 (Deutschland)	16	24 simulierte und aufgezeichnete Überschallknalle (Low Sonic Booms, herkömmliche N-Wave outdoor); unterschiedliche Signaturformen; maximalen Druck von 55,5 - 69,8 dB(A); Spitzenüberdrücke von 106,5 dB SPL - 123,1 dB SPL	Lautheit (11-Punkte Skala 0 = überhaupt nicht laut, 10 = extrem laut), Kurzzeitlästigkeit (11-Punkte Skala 0 = überhaupt nicht lästig, 10 = extrem lästig); Lärmempfindlichkeit, Einstellungen zu Verkehr und Verkehrslärm; Wohnzufriedenheit	Experiment	Höherer ASEL ist mit höheren Lästigkeits- und Lautheitswerten assoziiert; Lästigkeit und Lautheit steigen bei dB Anstieg von 6 dB um 2 - 3 Skalenpunkte (bei allen Signaturen)
Töpken & van de Par 2021 (Deutschland)	16	24 simulierte und aufgezeichnete Überschallknalle (Low Sonic Booms, herkömmliche N-Wave outdoor);	Lautheit (11-Punkte Skala 0 = überhaupt nicht laut, 10 = extrem laut), Kurzzeitlästigkeit (11-Punkte Skala 0 = überhaupt nicht lästig,	Experiment	höherer ASEL ist mit höherer Lästigkeit assoziiert; mittlere und hohe Frequenzen (> 1kHz) spielen für die Lästigkeits- und Lautheitsbewertungen eine größere Rolle als Frequenzen unter 1 kHz; Informationsgabe über Studie hat keinen Effekt; Lautheit- und Lästigkeitsbewertungen hängen zusammen; Geschlechtereffekt

Autor*innen, Jahr	Population	Exposition	Outcomes	Studien- design	Ergebnisse
		unterschiedliche Signaturformen; maximalen Druck von 55,5 - 69,8 dB(A); Spitzenüberdrücke von 106,5 dB SPL bis 123,1 dB SPL	10 = extrem lästig); Lärmempfindlichkeit, Einstellungen zu Verkehr und Verkehrslärm; Wohnzufriedenheit		
Tracor, Inc. 1972 (USA)			Belästigung, Störungen	Reanalyse	Zusammenführen und Reanalyse von 2 Datensets aus NASA Projekten, um einen etwaigen Effekt der Umwelt der Teilnehmenden auf die Wirkung von Überschallknallen zu identifizieren: beispielsweise zeigten Teilnehmende, die bereits herkömmlichem Fluglärm ausgesetzt waren, stärkere Reaktionen auf Fluglärm als auf Überschallknalle und Teilnehmende, die vorher keine regelmäßige Fluglärmexposition erfahren haben, zeigten stärkere Reaktionen auf Überschallknalle; die Einstellungen zur Quelle hängen mit dem Wohnumfeld zusammen

Anmerkung: *o.V. = ohne Verfasser