

Verbundprojekt:

**DEUFRAKO/RAPS – Railway noise (and other modes)
Annoyance, Performance, Sleep**

Wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten

**Teilvorhaben DLR: Metaanalyse und
Feldstudie**

FKZ: 19U6014B

Abschlussbericht

Projektleiter: Dr. rer. nat. Uwe Müller

Email: Uwe.Mueller@dlr.de

Abgabetermin: 15.09.2010



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Methoden	9
2.1	Studiendesign.....	9
2.2	Probandenauswahl	12
3	Akustik	21
3.1	Akustikaufbau und –aufnahmen während der Feldstudie.....	22
3.2	Auswertungsmethodik.....	23
3.3	Auswertung der Feldstudiendaten	27
3.3.1	Rechtliche Grundlagen der Lärmvorsorge bei Schienenwegen in Deutschland.....	28
3.3.2	Deskriptive Auswertung der Verkehrszahlen und der akustischen Messgrößen in der Feldstudie	32
3.3.3	Differenzbildung Außen- und Innenschallpegel	38
4	Schlaf	43
4.1	Einleitung	43
4.2	Methodik	44
4.2.1	Hypothesen	45
4.3	Ergebnisse	46
4.4	Diskussion	53
5	Kognitive Leistung	55
5.1	Einleitung	55

5.2	Hypothesen	56
5.3	Methodik.....	56
5.3.1	Reaktionszeitaufgabe, SRT.....	56
5.3.2	Statistik	57
5.4	Ergebnisse	58
5.5	Diskussion.....	64
6	Metaanalyse Laborstudien.....	65
6.1	Einleitung	65
6.2	Methodik.....	66
6.2.1	Erhebung der Daten.....	66
6.2.2	Auswertung und Statistik	67
6.3	Statistische Analyse.....	68
6.3.1	Deskriptiver Vergleich der Datensätze.....	68
6.3.2	Inferenz-statistischer Vergleich der Datensätze	71
6.3.3	Gepoolte Datensätze.....	76
6.4	Diskussion.....	80
7	Vergleich der Schlafdaten aus den Feldstudien zu Bahn- und Fluglärm	81
7.1	Einleitung	81
7.2	Methodik.....	82
7.3	Ergebnisse	83
7.3.1	Modell ohne Pegelanstieg	84

7.3.2	Modell mit Pegelanstieg	87
7.4	Diskussion	91
8	Psychologische Wirkungen nächtlichen Bahnlärms	93
8.1	Einleitung	93
8.2	Methoden	95
8.3	Ergebnisse	97
8.3.1	Belästigung und subjektive Bahnlärmbelastung	97
8.3.2	Subjektive Störung des Schlafs durch Bahnlärm	104
8.4	Diskussion	105
9	Zusammenfassung	111
10	Danksagungen	115
11	Abkürzungsverzeichnis	117
12	Literaturverzeichnis	119

1 Einleitung

Hartmut Maaß

Ungehinderte Mobilität in unserer Gesellschaft mit wachsenden Verkehrsströmen führt unter anderem auch zu steigender Verkehrslärmbelastung der Umwelt. Technische, operationelle und verkehrspolitische Maßnahmen zur Verkehrslärminderung können nur dann zielgerichtet entwickelt und effizient eingesetzt werden, wenn sie die physiologischen und psychologischen Wirkungen von Verkehrslärm auf die Betroffenen berücksichtigen. Hierzu ist eine umfassende Kenntnis der Zusammenhänge zwischen physikalisch messbaren Größen und der subjektiv empfundenen Belästigung im Sinne einer „overall annoyance“ bzw. der Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit erforderlich. Vor dem Hintergrund der stetig steigenden Verkehrszahlen gilt dies gleichsam für nächtlichen Straßen-, Schienen und Flugverkehrslärm. Es gibt nur wenige aktuelle Primärstudien zu dieser Thematik und diese kommen zu teils widersprüchlichen Aussagen. Sie lassen zudem Defizite in der Methodik, in der Durchführung, in der Auswertung und/oder in den auf den Untersuchungsergebnissen basierenden Schlussfolgerungen erkennen. In einer umfangreichen Laborstudie wurden unter kontrollierten Bedingungen die isolierten und kumulierten Wirkungen von nächtlichem Verkehrslärm (Straße, Schiene, Flugzeug) auf Schlaf, Leistung, Belästigung im DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin untersucht. Dies führte zur Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Vorhersage des Einflusses von nächtlichen Verkehrslärmarten auf die menschliche Physiologie und Psychologie. Eine Validierung im Feld, unter möglichst realen Bedingungen, zuhause bei von Verkehrslärm Betroffenen stand aus. Dieser Bericht stellt nun die Ergebnisse der Feldstudie im Arbeitspaket 3 „Schlafstörungen durch Verkehrslärm“ innerhalb des Projekts „RAPS“ (Railway Noise – and other modes -, Annoyance, Performance, Sleep) vor, welches im Rahmen der Deutsch-Französischen Kooperation ‚deufrako‘ auf dem Gebiet der Verkehrsforschung durchgeführt wurde. Die Studie zielte primär auf die Wir-

kung des nächtlichen Eisenbahnlärms auf den Menschen. In einer realitätsnahen Umgebung ist jedoch eine absolute Trennung der verschiedenen Verkehrsträger nicht möglich.

Dieser Bericht gibt eine detaillierte Beschreibung von Studiendesign, Experimentdurchführung und Ergebnissen der akustischen, physiologischen und psychologischen Daten mit jeweils separater Diskussion. Am Ende des Berichts werden alle Befunde im Kontext zusammengefasst, diskutiert und bewertet.

2 Methoden

H. Maaß, M. Basner, U. Müller, E.-M. Elmenhorst,
J. Quehl, S. Pennig

2.1 Studiendesign

Die Feldstudie wurde zwischen Februar 2008 und Juli 2009 durchgeführt.

Für die Studie wurden Versuchspersonen gewonnen, die entlang der Rheinschiene zwischen Köln und Koblenz wohnten. Diese Wohnlage ist durch starken nächtlichen Eisenbahnverkehr und gleichzeitig geringeren Verkehrslärm durch andere Träger charakterisiert. Da die Anzahl der Zugbewegungen auch vom Wochentag und der Jahreszeit abhängt, wurden in neun aufeinander folgenden, das Wochenende einschließenden Nächten Messungen zu allen Jahreszeiten durchgeführt. Messbeginn war immer ein Montag. Die Schlafzeit konnte von den Probanden individuell gewählt werden. Allerdings sollte eine Mindestbettzeit zwischen Mitternacht und 6:00 Uhr gewährleistet sein. Spätestes Aufstehen war um 08:00 Uhr.

Zur Erfassung der akustischen Gegebenheiten vor Ort wurden gleichzeitig drei Klasse-1-Schallpegelmesser (NC10, Cortex Instruments) aufgebaut. Ein Schallpegelmesser (#1) zeichnete die Außengeräusche mit einem in zwei Meter Entfernung vor dem Fenster angebrachten Mikrofon auf, während zwei weitere Schallpegelmesser (#2 und #3) die Innengeräusche möglichst nah am Ohr des Schläfers aufzeichneten.

Der Schallpegel (L_{AS} und L_{AF}) wurde kontinuierlich über die gesamte Nacht gemessen und aufgezeichnet. Sobald ein bestimmter Hintergrundpegel (L_{90}) überschritten wurde (in der Regel um mehr als 5 dB(A)), zeichnete #1 das tatsächliche Geräusch mit 22 kHz solange auf, bis die Differenz zum Hintergrundpegel wieder weniger als 5 dB(A) betrug, mindestens jedoch

30 s lang. Die einzelnen Geräusche wurden als wav-Dateien abgelegt. Hiermit war eine spätere Identifizierung der Geräuschquelle (Schienenverkehr, Straßenverkehr, Nachbarschaftslärm etc.) gewährleistet. Gleichzeitig wurde mit dem Beginn der Aufzeichnung Schallpegelmesser #2 getriggert, der dasselbe Geräusch dann ebenfalls und zeitgleich mit #1, nun allerdings im Schlafraum, aufzeichnete. Durch die zeitsynchrone Aufnahme des Geräusches innen und außen konnten Aussagen über die Dämpfungseigenschaften der Fenster und des Mauerwerks gewonnen werden.

Das Triggersignal wurde zeitgleich mit den elektrophysiologischen Signalen mit einer Abtastrate von 8 Hz aufgezeichnet, so dass eine ereigniskorrelierte Auswertung von Wirkungen des Schienenverkehrslärms auf physiologische Reaktionen mit einer Auflösung von maximal 125 ms möglich war.

Ein dritter Schallpegelmesser (#3) zeichnete Geräusche im Schlafraum dann auf, sobald ein bestimmter Hintergrundpegel im Raum überschritten wurde (auch hier in der Regel um mehr als 5 dB(A)). Hiermit konnten Geräusche identifiziert werden, die allein im Haus entstanden (z.B. Schnarchen, Husten etc.) und durch Schallpegelmesser #2, da dieser von außen getriggert wurde, nicht hätten bestimmt werden können.

Alle elektrophysiologischen Signale wurden zeitgleich während der Nacht erfasst, über eine analog-digital Schnittstelle gewandelt, verstärkt und intern auf SD-Karte zur späteren Analyse gespeichert. Simultan wurden die akustischen Signale aufgezeichnet.

Die Schlafstadienklassifizierung erfolgte auf klassische Art nach [Rechtschaffen & Kales, 1968] durch polysomnographische Ableitungen in jeder Nacht. EEG-Arousals wurden nach den Vorgaben der American Sleep Disorders Association [ASDA Report, 1992] bestimmt. Das Elektroenzephalogramm (EEG) wurde mit Hilfe von Silber/Silberchlorid-Elektroden in den Positionen A1, A2, F4, C3, C4 und O2 erfasst, das Elektroofokulogramm (EOG) durch Applikation von Elektroden am rechten und linken Auge und das Elektro-

myogramm (EMG) durch Fixierung von Elektroden oberhalb der Kinnmuskulatur.

Um vegetative Veränderungen während des Schlafs zu erfassen, wurden das EKG und die Fingerpulsamplitude ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet. Die Atmung wurde durch ein Brustband (Bauchatmung) und einen Thermistor (Nase- bzw. Mundatmung) erfasst; sie dienten dazu, etwaige atmungsbedingte Schlafstörungen zu diagnostizieren. Am Brustband war zusätzlich ein Lagesensor angebracht, um Veränderungen der Position im Bett feststellen zu können.

Die gleichzeitige Aufzeichnung der unterschiedlichen elektrophysiologischen Signale und der Geräusche erlaubte es, zwischen spontanen Reaktionen und durch Lärm induzierten Reaktionen zu unterscheiden.

Zusätzliche Informationen über Ruhe/Schlafphasen wurden durch Aktometer erzielt, die von den Probanden während der gesamten Studiendauer (also auch tagsüber) am Handgelenk der nicht dominierenden Hand getragen wurden.

Als ein objektives Verfahren zur Erfassung sekundärer Folgen von nächtlicher Lärmeinwirkung wurde die mentale Leistung mit Hilfe eines computergestützten Reaktionszeittests („Single Reaction Time“ – SRT) gemessen.

Um während der Studienphase stabile Ausgangsbedingungen zu erreichen, wurde in einer Vorbereitungszeit von 2 Wochen dieser Test von jedem Probanden in 24 Trainingseinheiten zu je 10 Minuten trainiert. Der Test wurde abends vor dem Zubett-Gehen und morgens nach dem Wecken und Aufstehen ausgeführt, um insbesondere morgens potentielle Effekte einer gestörten Nachtruhe aufzudecken.

Jeden Morgen wurde der Blutdruck des Probanden mittels Manschette am Oberarm und Blutdruckmessgerät [Fa. Spacelabs Health Care, Feucht] gemessen.

Die Untersuchung der psychologischen Wirkungen des nächtlichen Schienenverkehrs beinhaltete die Erfassung von Veränderungen des subjektiv empfundenen Schlaferlebens, der Belästigung, Befindlichkeit, Beanspruchung und Erholung in Abhängigkeit von der nächtlichen Lärmexposition. Dazu wurden morgens nach dem Aufstehen folgende Fragebögen verwendet:

- Lärmbelastungsfragebogen [FN-L, Quehl, 2005]
- Fragebogen zum subjektiven Schlaferleben [IFADo-Morgens; Griefahn, Marks & Robens, 2006]
- Fatigue Checklist [FAT, Samn & Pirelli, 1982]

Am Ende der gesamten Studienphase füllten die Versuchspersonen u.a. einen Fragebogen zur Bestimmung ihrer Lärmempfindlichkeit [LEF, Zimmer & Ellermeier, 1998] sowie einen allgemeinen Fragebogen [FA-2] zur Erhebung soziodemographischer Daten, bisheriger Bahnlärmbelastung, Einstellung gegenüber Bahnverkehr und Bahnlärm sowie Wohnzufriedenheit und Umfeld aus.

2.2 Probandenauswahl

In der Studie wurden 33 Versuchspersonen im Alter von 22 bis 68 Jahren (Mittelwert $36,2 \pm 10,3$ Jahre) untersucht. Die Verteilung der Probanden nach ihrem Alter und Geschlecht zeigt Tabelle 1.

22 Versuchspersonen waren weiblich, 11 männlich. Alle Probanden waren gesund, litten an keinerlei intrinsischen Schlafstörungen und hörten altersgemäß normal. Die Rekrutierung männlicher Teilnehmer mittleren Alters erwies sich aufgrund zeitlicher Anforderungen im Beruf als besonders schwierig. Teilnehmer über 50 Jahre bewarben sich nur sehr selten und mussten oft aufgrund ihrer altersbedingten Medikation von der Teilnahme ausgeschlossen werden.

	weiblich n = 22	männlich n = 11
<= 30 j	7	3
31-40 j	5	6
41-50 j	10	1
51-60 j	0	0
> 60 j	0	1

Tabelle 1: Anzahl der Versuchspersonen verteilt nach Geschlecht und Alter.

Alle Versuchspersonen unterlagen einem mehrstufigen Auswahlprozess, bevor sie an der Studie teilnehmen konnten. Ein Faltblatt mit den wichtigsten Anforderungen an die Probanden wurde entworfen:

- für 9 aufeinander folgende Nächte zur Verfügung stehen, über 18 Jahre alt sein, ihrem Alter entsprechend gesund, normal hörend und ohne Medikation sein, die den Schlaf oder die Leistung beeinflusst, nicht regelmäßig schnarchen oder an Apnoen leiden, dicht an der Eisenbahntrasse wohnen, ohne gleichzeitig nachts durch Straßenverkehrslärm beeinträchtigt zu werden, nicht regelmäßig Nacht/Schichtdienste leisten, nicht nach Mitternacht zu Bett gehen oder vor 06:00 Uhr aufstehen und möglichst keine Säuglinge haben, die den Schlaf eventuell unterbrechen. Die Wohnung sollte zudem groß genug für die Anbringung der Messapparaturen sein.

Zur Anwerbung von Probanden wurden akustisch geeignet erscheinende Siedlungen beidseits des Rheins mit möglichst geringem Straßen- und starkem Eisenbahnverkehr ausgemacht. Mehr als 1500 der Faltblätter wurden in Briefkästen von Anwohnern entlang der nachts besonders stark frequen-

tierten Eisenbahntrassen eingeworfen. Diese Trassen waren linksrheinisch Köln-Hbf. - Köln-Süd – Sechem - Roisdorf – Bonn-Hbf. – Bonn-Bad Godesberg - Oberwinter und rechtsrheinisch Troisdorf – Menden – Bonn-Beuel – Bonn-Oberkassel – Königswinter – Unkel – Erpel. Insgesamt meldeten sich 271 Interessenten. Alle erhielten detaillierte Informationen zur Studie und einen ersten Fragebogen, der sich auf Adresse, Alter, Geschlecht, den allgemeinen Gesundheitszustand, die gewöhnlichen Zubettgehzeiten, Arbeitsbeginn, Schlafstörungen, Schnarchen, Pflasterallergien, Alkohol-, Koffein- und Tabakkonsum sowie Lärmempfindlichkeit bezog. 80 der Interessenten wollten oder konnten nicht an der Studie teilnehmen. 191 der interessierten Probandenbewerber schickten einen ausgefüllten Fragebogen zurück. Davon mussten 119 als ungeeignet abgewiesen werden. Gründe waren folgende:

- Starke Schnarcher wurden ausgeschlossen. Schnarchen als eines der Hauptsymptome für obstruktive Apnoen gilt als Signal für intrinsische Schlafstörungen. Auch stark schnarchende Partner mussten während der Studienphase die Möglichkeit haben gesondert zu schlafen, um die Versuchsperson nicht zu stören.
- Periodic limb movements in sleep (PLMS); Versuchspersonen mit derartigen Symptomen wurden ausgeschlossen, weil die Krankheit den Schlaf stört.
- Versuchspersonen sollten regelmäßig nicht weniger als 6 und mehr als 10 Stunden pro Nacht schlafen, nicht nach Mitternacht zu Bett gehen und zwischen 6 und 8 Uhr morgens aufstehen und keinen Schichtdienst leisten, damit ein korrekter Studienablauf gewährleistet werden konnte und um eine Mindestruhezeit von 6 Stunden sicherzustellen.
- Versuchspersonen sollten ca. 2 Stunden vor dem Zubettgehen und ca. 1 Stunde nach dem Aufstehen Zeit für den Studienablauf haben.

- Versuchspersonen sollten ihrem Alter gemäß gut hören.
- Versuchspersonen mit Herzrhythmusstörungen wurden ausgeschlossen. Die Interpretation einer Wirkung von Verkehrslärm auf kardiale Aktivierung wäre zu schwierig.
- Versuchspersonen sollten keine Antidepressiva oder zentral dämpfende Medikamente nehmen.
- Versuchspersonen sollten keine Pflasterallergie haben, weil sie vermutlich ähnlich auf das Anbringen der nächtlichen Elektroden reagieren.
- Die Probanden sollten ausreichende Deutschkenntnisse zum Verständnis der Fragebögen haben.
- Versuchspersonen mit ansteckenden Krankheiten wurden ausgeschlossen.
- Versuchspersonen sollten nicht drogen-, alkohol- oder nikotinsüchtig sein.
- Versuchspersonen, die sich meldeten, aber nicht an einer nachts stärker frequentierten Eisenbahntrasse wohnten, wurden ausgeschlossen.

Es verblieben 72 potentielle Teilnehmer in 56 Wohnungen. Alle wurden zuhause besucht und absolvierten eine Testnacht. Zum einen sollte dabei die Lokalität in Augenschein genommen werden hinsichtlich Eisenbahnlärmbelastung, Größe, Schalldämmung und örtlicher sowie familiärer Gegebenheiten. Dazu gehörte auch die akustische Aufzeichnung aller Geräusche am Ohr des Schläfers für eine Nacht mittels eines NC-10 Schallpegelmessers, um die akustische Situation dieser Messstelle einschätzen zu können. Die Versuchsperson wurde dabei intensiv und detailliert über die Studie, ihre Ziele und die einzusetzenden Messinstrumente aufgeklärt. Sie füllte einen psychologischen Fragebogen – das "Freiburger Persönlichkeitsinventar" [FPI-R, Fahrenberg, Hampel & Selg, 2001] – aus und trug ein Fingerpulsso-

xymeter übernacht. Am nächsten Tag wurden die Geräte (NC-10 und Pulsoxymeter) sowie die darauf gesammelten Daten wieder abgeholt und im Institut sofort ausgewertet.

Der FPI-R wurde benutzt, um die Persönlichkeitsstruktur der potentiellen Versuchsteilnehmer hinsichtlich ausgewählter psychologischer Merkmale einzuschätzen und damit einen möglichst reibungslosen Ablauf der Studien zu gewährleisten. Zur Probandenauswahl wurden folgende Skalen des FPI-R herangezogen: soziale Orientierung, Gehemmtheit, Erregbarkeit, Aggressivität, körperliche Beschwerden, Gesundheitsorgen, Offenheit und emotionale Labilität.

Das Pulsoxymeter diente der Überprüfung der nächtlichen Sauerstoffsättigung im Blut, die bei starkem Schnarchen bzw. Apnoen charakteristisch sinkt. Die Lärmbelastung durch nächtlichen Eisenbahnverkehr, die Dämmung und auch ggf. das Schnarchen konnten durch Auswertung der akustischen Aufzeichnung dieser Nacht eingeschätzt werden.

42 Versuchspersonen wurden danach zu einer allgemeinen medizinischen Untersuchung einschließlich eines Hörtests in das DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin eingeladen. 30 Probanden mussten vorher ausgeschlossen werden: 7 durch Umzug oder akuten Zeitmangel, 7 Wohnungen waren ungeeignet aufgrund der Fenstergröße, Raumgröße, störenden Haustieren oder dort lebenden Kleinstkindern, 4 aufgrund zu geringer Verkehrsbelastung, 5 Probanden schnarchten extrem, 7 zeigten Auffälligkeiten im FPI-R (2 x extreme Gehemmtheit, 1x übergroße Aggressivität, 4 x zu geringe Offenheit).

Es verblieben letztlich 38 Versuchspersonen, die in das Studienkollektiv aufgenommen wurden. In Abbildung 1 und Abbildung 2 werden alle tatsächlichen Messstellen entlang der Eisenbahntrassen innerhalb der Städte Köln und Bonn sowie im Umland dargestellt.

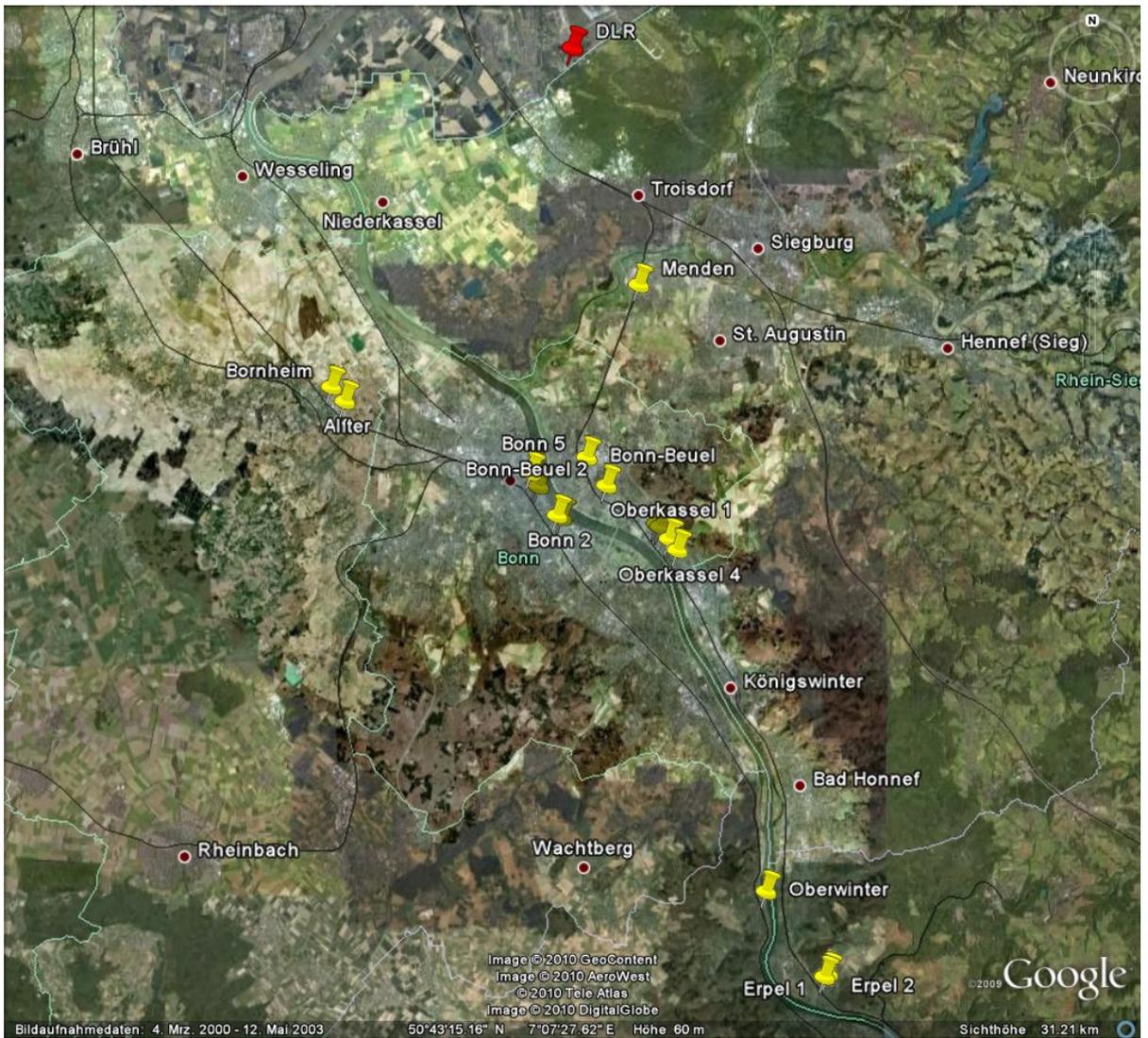


Abbildung 1: Messstellen in der Stadt Bonn und Umgebung mit Eisenbahnlinien und DLR Standort.

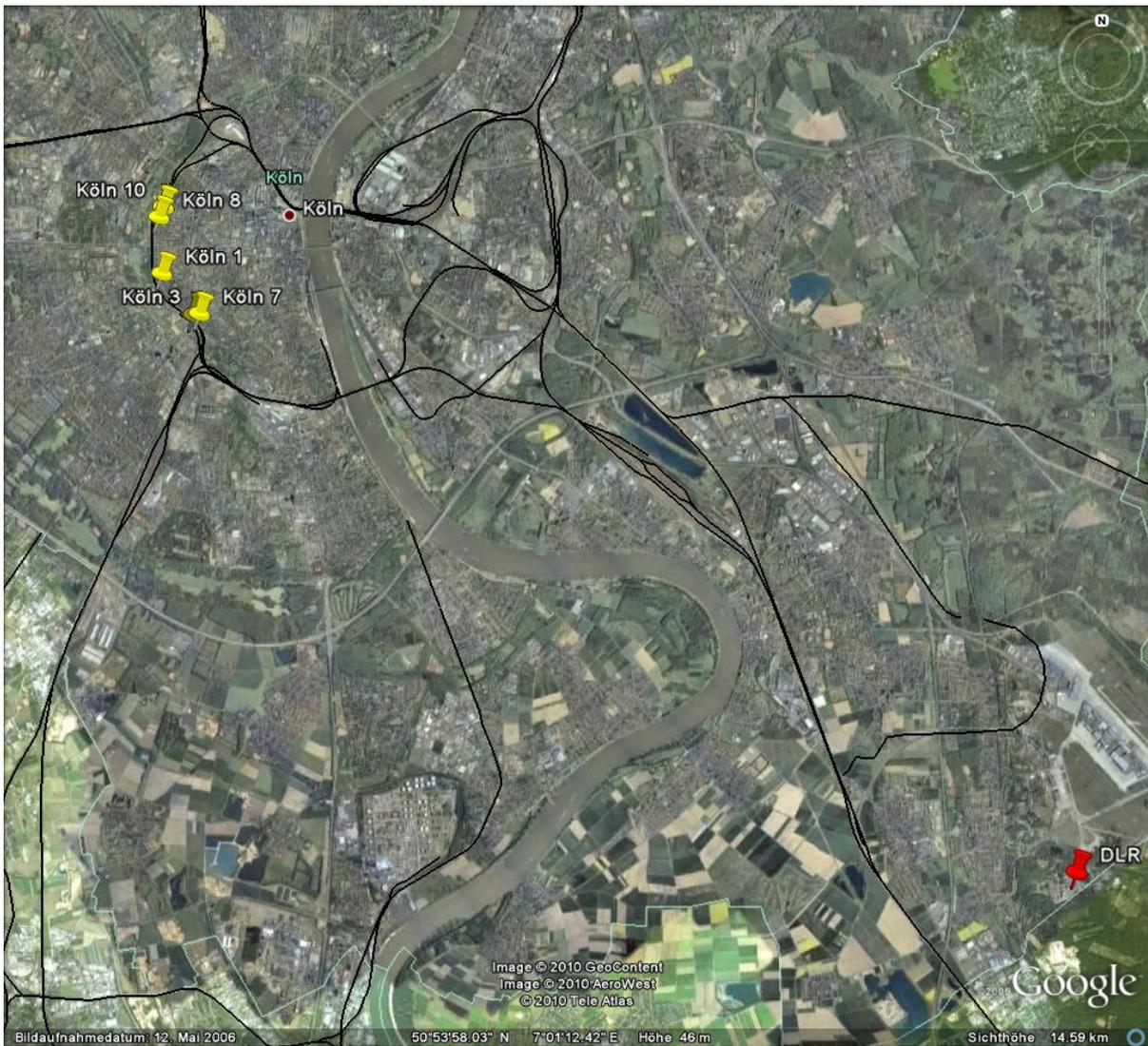


Abbildung 2: Messstellen in der Stadt Köln mit Eisenbahnlinien und DLR Standort.

Jeweils zwei Wochen vor ihren 9-tägigen Studienphasen begannen die Versuchspersonen mit den erforderlichen 24 Trainingssitzungen des Computergestützten Reaktionszeittests, nachdem ihnen der PC ins Haus gebracht worden war. Im Idealfall erreichten die Probanden dabei ein stabiles und verlässliches Leistungsniveau.

Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein genehmigt. Die Versuchspersonen nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden entsprechend den Richtlinien der Deklaration von Helsinki vor Studienbeginn aufgeklärt. Sie konnten ihre Teilnahme jederzeit beenden.

Vier Versuchspersonen brachen die Teilnahme an der Studie ab wegen Erkrankung und akuten Zeitmangels. Eine Versuchsperson musste nachträglich aus der Auswertung genommen werden aufgrund des extremen Schnarchens und häufiger Apnoen. Somit umfasst die vorliegende Studie Datensätze von insgesamt 33 Personen.

Die Probanden erhielten für ihre Teilnahme eine Aufwandsentschädigung von € 50 pro Nacht sowie € 60 einmalig für das Training des Computergestützten Leistungstests zuhause vor Studienbeginn. Zusätzlich bekamen sie € 10 als Fahrkostenzuschuss für die medizinische Voruntersuchung im DLR.

3 Akustik

Uwe Müller

Dieses Kapitel über die während der Feldstudie DEUFRAKO/RAPS erhobenen akustischen Messgrößen widmet sich in den folgenden Abschnitten zunächst dem Aufbau der verwendeten Geräte für die Schalldruckpegelmessungen bzw. Aufzeichnungen der Geräusche und stellt dar, wie die jeweiligen Untersuchungsstände ausgewertet wurden.

Dem schließt sich eine kurze Übersicht über die rechtlichen Grundlagen der Lärmvorsorge in Deutschland an, die hilfreich ist, um die folgende deskriptive Auswertung der Verkehrszahlen und ausgewählter akustischer Messgrößen einordnen zu können. Darüber hinaus wird in einem weiteren Abschnitt näher auf die Differenzbildung des Außen- und Innenschalldruckpegels als ein Maß für die Abschwächung des Pegels vorwiegend durch die Fensterfront eingegangen.

Grundsätzlich wurden während der Feldstudie DEUFRAKO/RAPS die Messstellen der hier präsentierten Auswertungen so ausgewählt, dass sie in stark von Bahnlärm belasteten Wohngebieten lagen (i.d.R. Wohnungen direkt an der Bahnlinie), die ansonsten aber möglichst frei von anderen Geräuschquellen waren (siehe auch Kap. 2.2). Dies vermied mögliche akustische Interferenzen mit anderen Lärmquellen und somit eine erschwerte ereigniskorrelierte Auswertung des Bahnlärms.

3.1 Akustikaufbau und –aufnahmen während der Feldstudie

In der Feldstudie DEUFRAKO/RAPS wurde gleichzeitig mit drei geeichten Klasse-1-Schallpegelmessern (NC10, Cortex Instruments) während der gesamten Nacht die Schalldruckpegel L_{AS} und L_{AF} mit einer Abtastung von 110 ms gemessen (siehe auch Abbildung 3). Das Mikrofon von Schallpegelmesser #1 war mit einer Haltevorrichtung 2 m vor dem Schlafzimmerfenster angebracht [DIN 45645-Teil 1, 1996], die Mikrofone der Schallpegelmesser #2 und #3 standen innen, direkt am Ohr des Schläfers am Kopfende des Bettes. Zusätzlich zum Schalldruckpegel wurden von den Schallpegelmessern #1 und #2 immer dann, wenn der Außen-Hintergrundpegel L_{90} um 3-5 dB(A) überschritten wurde, das Geräusch selbst mit einer Abtastrate von 24 kHz aufgenommen, um damit eine Identifizierung der Geräuschquelle bei der Auswertung zu ermöglichen. Weil in dieser Anordnung keine Geräusche aufgenommen wurden, die ausschließlich innen im Schlafräum entstanden, zeichnete Schallpegelmesser #3 zusätzlich alle Geräusche auf, die 3 dB(A) über dem Innen-Hintergrundpegel L_{90} lagen.

Mit Beginn der Aufzeichnung der Außengeräusche wurde jedes Mal ein Triggersignal auch an den EEG-Verstärker gesendet und zeitgleich mit den elektrophysiologischen Signalen und einer Abtastrate von 8 Hz aufgezeichnet, so dass eine ereigniskorrelierte Auswertung von Wirkungen des Bahnlärms auf physiologische Reaktionen mit einer Auflösung von maximal 125 ms garantiert war.

Für die Aufzeichnung der Testnächte (siehe Kap. 2.2) zur Probandenauswahl im Vorfeld der Studie wurde ausschließlich Schallpegelmesser #3 verwendet.

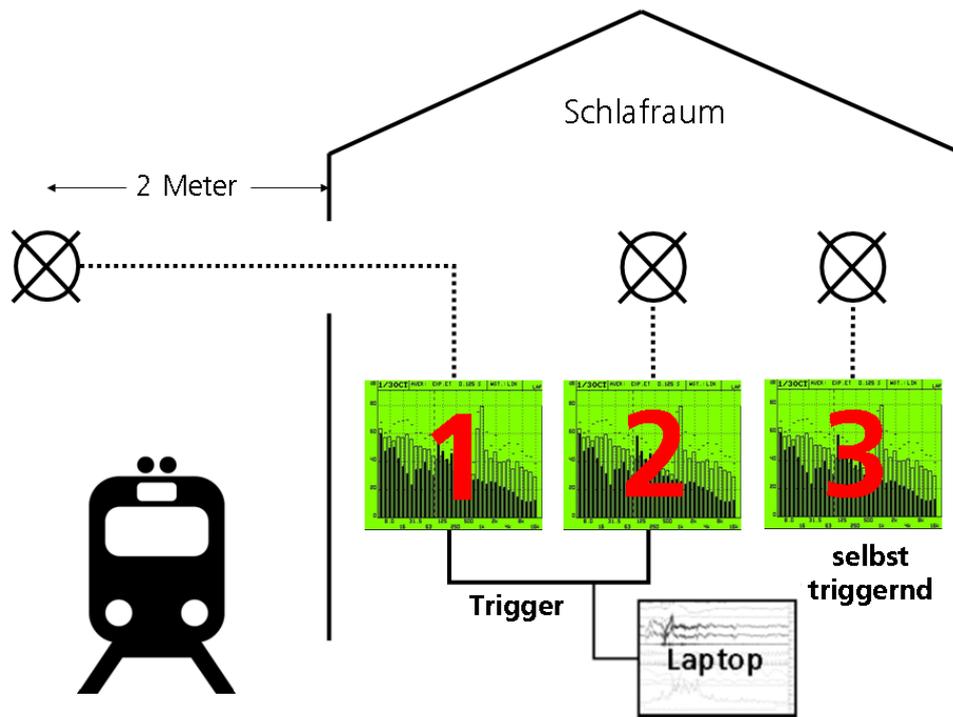


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Akustikaufzeichnungen in der DLR-Feldstudie DEUFRAKO/RAPS

3.2 Auswertungsmethodik

Für eine statistische Modellbildung zur Berechnung von Aufwachwahrscheinlichkeiten aufgrund von Lärmereignissen (siehe Kapitel 4.2) ist es notwendig, dass von den in der Nacht aufgetretenen Geräuschen die jeweils für das Modell potentiell wichtigen akustischen Größen wie der Anfangs- und Endzeitpunkt, der Maximalpegel L_{AS} und L_{AF} , die Anstiegssteilheit und der Schallereignispegel SEL vorliegen. Zudem müssen die Geräusche mittels eines Kommentars eindeutig identifiziert und gegebenenfalls gleichzeitig aufgetretene „Stör-“ Geräusche ebenfalls vermerkt werden. Zur Berechnung der Emergenz (Maximalpegel minus Hintergrundpegel) ist zudem das regelmäßige Markieren des Hintergrundpegels unerlässlich.

Die Auswertung der kognitiven Leistung und der psychologischen Fragestellungen (siehe Kapitel 5 und 8) benötigt zudem neben den nächtlichen Gesamtverkehrszahlen als akustischen Gesamtparameter der Nacht auch die

Berechnung des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{Aeq} für den Schlafzeitraum.

Für die speziellen Anforderungen an die akustische Auswertung dieser Feldstudie und das Zählen des Verkehrsaufkommens wurde eigens eine Software mit dem Programmpaket Matlab (**Matrix Laboratory**, R 2007a) entwickelt.

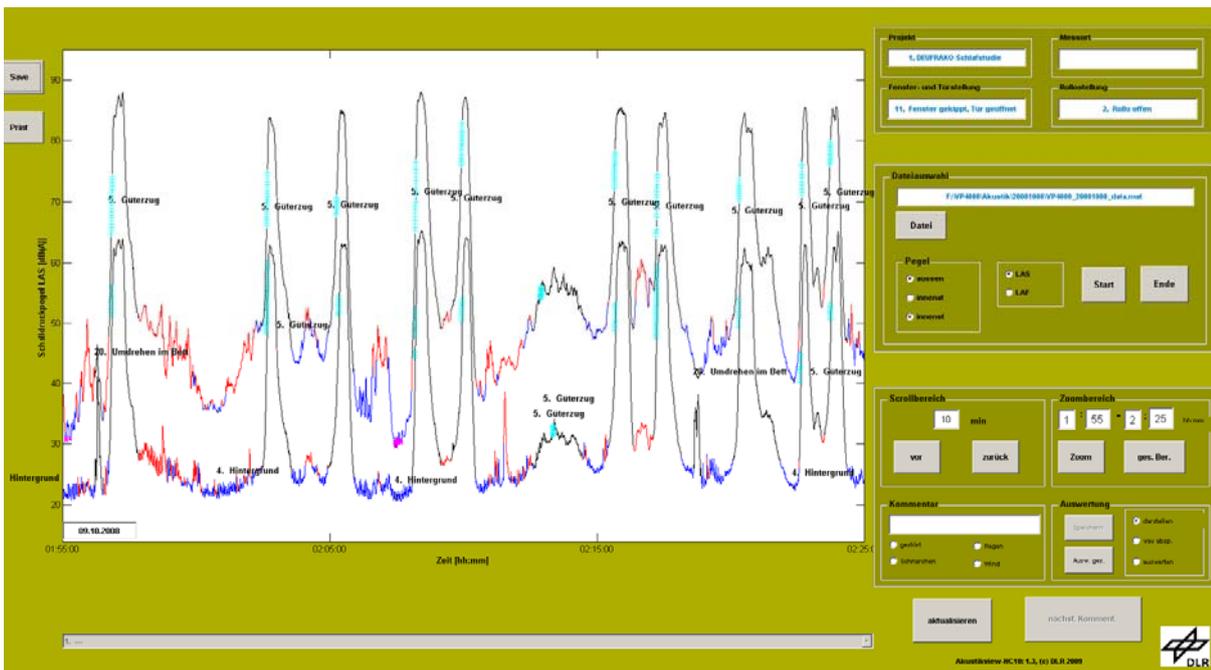


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung des Schalldruckpegelverlaufs L_{AS} (blau) außen (obere Kurve) und innen (untere Kurve) in einem 30-Minuten-Intervall. Die rot gekennzeichneten Bereiche liegen zudem als Geräuschaufzeichnung vor. Die ausgewerteten und kommentierten Geräusche sind schwarz, die zur Berechnung der Anstiegssteilheiten verwendeten Bereiche cyan markiert. Nach der Auswertung werden rot gekennzeichnete Bereiche ggf. durch die schwarzen und cyanen Bereiche überlagert.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Darstellungsfenster der Auswertungssoftware, in dem für ein 30-Minuten-Intervall der Verlauf des Außen- (oben) und Innenschalldruckpegels (unten) L_{AS} dargestellt ist (blauer Linienverlauf). Rot sind diejenigen Bereiche markiert, die gleichzeitig auch als Schalldateien mit einer Abtastrate von 24 kHz vorliegen. Im Programm kann

gewählt werden, ob der Innenpegel #2 oder #3 oder beide dargestellt werden. Einfaches Klicken auf den roten Bereich erlaubt zudem das Anhören der Schalldatei.

Der Auswertung erfolgt interaktiv, indem in 10-Minuten-Intervallfenstern jedes aufgezeichnete Geräusch anzuhören ist, dieses dann am Anfangs- und Endpunkt zu markieren und zu kommentieren ist. Eine Zoomfunktion erlaubt gegebenenfalls eine detailliertere Betrachtung und Analyse. Maßgeblich für die Auswertung sind der Innenpegel und die Innengeräusche am Ohr des Schläfers. Die Außengeräusche können zur besseren Identifizierung zu Hilfe genommen werden.

Die bei der Auswertung markierten Bereiche sind in Abbildung 4 schwarz mit dazugehörigem Kommentar und die Bereiche, in denen automatisch die Anstiegssteilheit berechnet wurde, cyan dargestellt. Es ist jederzeit möglich, die ausgewerteten Daten auszublenden, um die darunter liegenden roten bzw. blauen Kurven sichtbar zu machen.

Die Ergebnisdateien sowohl für die ereigniskorrelierte Auswertung als auch für die Auswertung der akustischen und deskriptiven Gesamtparameter der Nacht werden im ASCII-Tabellenformat abgelegt und können somit problemlos in anderen Programmen wie SPSS oder MS-EXCEL weiterverwendet werden.

Der zeitliche Verlauf eines mit einem Pegelmessgerät aufgezeichneten Schalldruckpegels wird üblicherweise mit einer Zeitkonstanten gefiltert, die die Trägheit des gemessenen Pegelverlaufs beeinflusst [DIN EN 61672-1, 2003]. Bahn- und Straßenverkehrsgeräusche werden aufgrund ihres sich im Allgemeinen schnell ändernden Schalldruckpegels mit der Zeitbewertung F (fast, 125 ms), Fluglärm mit der Zeitbewertung S (slow, 1 s) gefiltert. Um zusätzlich dem frequenzabhängigen Hörverhalten des menschlichen Ohres Rechnung zu tragen, wird das Geräusch weiterhin frequenzabhängig gewichtet. Üblicherweise wird hierzu der A-Filter verwendet.

Während der Feldstudie DEUFRAKO/RAPS wurde von sämtlichen Schallpegelmessern sowohl der L_{AS} – als auch der L_{AF} – Schalldruckpegelverlauf aufgezeichnet. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den L_{AF} – Pegelverlauf für denselben Zeitabschnitt wie in Abbildung 4, wo ein 30-minütiges Intervall des L_{AS} – Pegelverlaufs dargestellt wird. Um bei der ereigniskorrelierten Auswertung die Aufwachwahrscheinlichkeiten für verschiedene Verkehrsträger in Abhängigkeit vom Schalldruckmaximalpegel zu vergleichen, empfiehlt es sich, Pegelverläufe mit gleicher Frequenz- und Zeitbewertung heranzuziehen.

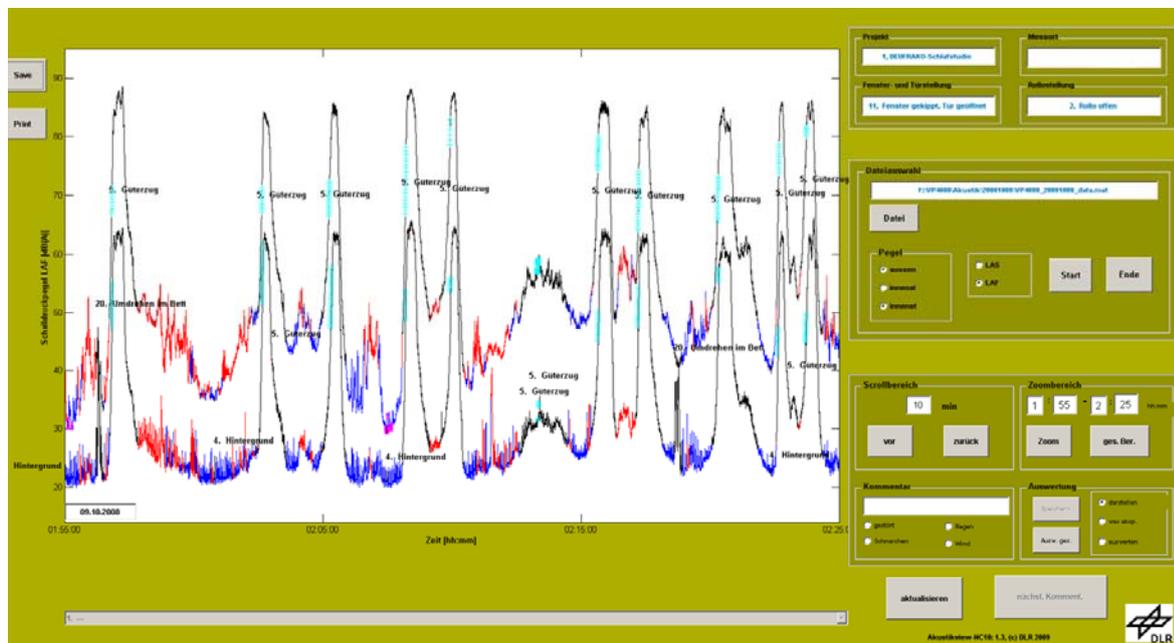


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung des Schalldruckpegelverlaufs L_{AF} (blau) außen (obere Kurve) und innen (untere Kurve) in einem 30-Minuten-Intervall. Die rot gekennzeichneten Bereiche liegen zudem als Geräuschaufzeichnung vor. Die ausgewerteten und kommentierten Geräusche sind schwarz, die zur Berechnung der Anstiegssteilheiten verwendeten Bereiche cyan markiert. Nach der Auswertung werden rot gekennzeichnete Bereiche ggf. durch die schwarzen und cyanen Bereiche überlagert.

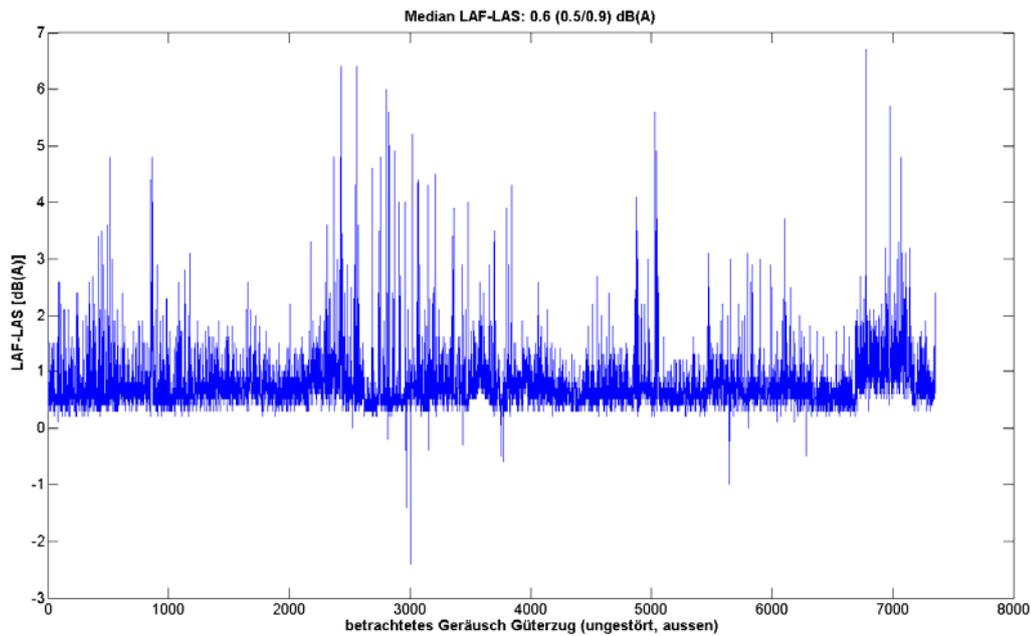


Abbildung 6: Differenz L_{AFmax} und L_{ASmax} bei 7.350 ungestörten Güterzugausengeräuschen. Der Median der Differenz liegt bei 0.6 dB(A) (25. Perzentil: 0.5 dB(A), 75. Perzentil: 0.9 dB(A)).

Abbildung 6 gibt einen Eindruck vom Unterschied der Schalldruckmaximalpegel $L_{AFmax} - L_{ASmax}$ von 7.350 ungestörten Güterzugaußengeräuschen, die nicht durch andere Geräusche überlagert wurden. Der Median der Differenz liegt hier bei 0.6 dB(A) (25. Perzentil: 0.5 dB(A), 75. Perzentil: 0.9 dB(A)).

3.3 Auswertung der Feldstudiendaten

Im Kapitel 2.2 ist beschrieben, in welchen Gebieten und nach welchen Kriterien die Probanden für die Feldstudie in DEUFRAKO/RAPS ausgewählt wurden. In den folgenden Abschnitten werden die mittleren Verkehrszahlen und relevanten akustischen Messgrößen für diese 27 Messstellen während der 9 Untersuchungsächte im Zeitraum Februar 2008 – Juli 2009 dargestellt. Um eine bessere Einordnung dieser Zahlen zu ermöglichen, werden zuerst die in Deutschland zum Zeitpunkt der Berichtsstellung gel-

tenden rechtlichen Grundlagen zur Lärmvorsorge an Schienenwegen kurz zusammengefasst.

3.3.1 Rechtliche Grundlagen der Lärmvorsorge bei Schienenwegen in Deutschland

In Deutschland wird die Lärmvorsorge beim Neubau oder der wesentlichen Änderung von Straßen und Schienenwegen (Eisenbahnen und Straßenbahnen) durch das Bundesimmissionsschutzgesetz vom 15.03.1974 in den Paragraphen §§ 41 – 43 geregelt, die in der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV vom 12.06.1990 und der Änderung vom 19.09.2006) und der Verkehrswege- Schallschutzmaßnahmenverordnung (24. BImSchV vom 04.02.1997 und der Änderung vom 23.09.1997) konkretisiert werden. Die 16. BImSchV enthält Immissionsgrenzwerte (siehe Tabelle 2) und Berechnungsgrundlagen für die verwendeten Beurteilungspegel für den Tag (6-22 Uhr) und die Nacht (22-6 Uhr), die zum Schutz der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Verkehrsgeräusche bei dem Bau oder bei wesentlichen Änderungen der Strecke nicht überschritten werden dürfen.

Die 16. BImSchV macht in der Anlage 2 („Berechnung der Beurteilungspegel bei Schienenwegen“) folgende Aussage zum maßgebenden Immissionsort: „Der maßgebende Immissionsort richtet sich nach den Umständen im Einzelfall; vor Gebäuden liegt er in Höhe der Geschoßdecke (0,2 m über der Fensteroberkante) des zu schützenden Raumes; bei Außenwohnbereichen liegt der Immissionsort 2 m über der Mitte der als Außenwohnbereich genutzten Fläche.“

Ort	Tag (6-22 Uhr)	Nacht (22-6 Uhr)
An Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen	57 dB(A)	47 dB(A)
In reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	59 dB(A)	49 dB(A)
In Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	64 dB(A)	54 dB(A)
In Gewerbegebieten	69 dB(A)	59 dB(A)

Tabelle 2: Immissionsgrenzwerte (Beurteilungspegel) in der *Verkehrslärm-schutzverordnung – 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissions-schutzgesetzes* für den Bau oder wesentliche Veränderungen von öffentlichen Straßen sowie von Schienenwegen der Eisenbahnen und Straßenbahnen (16. BImSchV). Der Schienenverkehr erhält einen Bonus von 5 dB(A) auf den Beurteilungspegel.

Sollte die Lärmprognose für den Neubau oder bei einer wesentlichen Streckenänderung diese Grenzwerte überschreiten, muss entsprechend den genannten Verordnungen Lärmvorsorge betrieben werden, d. h. es kommen aktive oder passive Schallschutzmaßnahmen zur Anwendung.

Vergleichsstudien aus den Jahren 1978 bis 1983 zur Belästigung aufgrund von Straßen- und Schienenverkehrslärm führten dazu, dass in mehreren europäischen Ländern ein Schienenbonus in Gesetzen und Verordnungen verankert wurde, um die in diesen Studien beobachtete geringere Lästigkeit von Schienenverkehrslärm bei gleichen Pegeln zu berücksichtigen. In Deutschland wurde dieser Bonus 1984 auf 5 dB(A) festgesetzt, wobei sich diese Festsetzung vorwiegend an Feldstudienenergebnissen orientierte [u.a. Planungsbüro Obermayer, 1983]. Aufgrund der Tatsache, dass der Schienenverkehr, wie andere Verkehrsträger auch, in den letzten Jahrzehnten erheblichen Veränderungen unterworfen war (u.a. Anzahl der Vorbeifahr-

ten, Länge der Züge, Vorbeifahrtgeschwindigkeiten, Schalldruckmaximalpegel, spektrale Zusammensetzung der Zuggeräusche), zudem auch gesellschaftliche Entwicklungen stattgefunden haben (wie z.B. das veränderte Freizeitverhalten der Bevölkerung), muss die Gültigkeit eines Schienenbonus überprüft werden. Neuere Studien deuten darauf hin, dass der Bonus für die Lästigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit zumindest differenzierter betrachtet werden muss, und in bisherigen Laborstudien wurde gefunden, dass das Aufwachverhalten im Schlaf bei Bahnlärm möglicherweise sogar über dem des Flug- und Straßenverkehrs liegt [zur Übersicht siehe Umweltbundesamt, 2010].

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wird zu den Immissionsgrenzwerten der 16. BImSchV dem Schienenverkehr ein Bonus von 5 dB(A) gewährt.

Für bestehende Straßen und Schienenwege ohne wesentliche Änderungen gibt es keine verbindlichen gesetzlichen Regelungen, die die Einhaltung von Lärmgrenzwerten vorschreiben, die über die beim Bau geltenden gesetzlichen Regelungen hinausgehen. Für Straßen in der Baulast des Bundes bestehen allerdings z.T. freiwillige Verpflichtungen des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ("Richtlinien für den Verkehrslärmschutz an Bundesfernstraßen in der Baulast des Bundes - VLärmSchR 97"). Auch für die Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen stellt der Bund seit 1999 jährlich 51 Mio. Euro für aktiven und passiven Lärmschutz bereit („Richtlinie für die Förderung von Lärmsanierungsmaßnahmen Schiene“ vom 07.03.2005). Diese Mittel werden seit 2007 auf 100 Mio. Euro pro Jahr aufgestockt. Im Rahmen des Konjunkturprogramms der Bundesregierung werden zudem von 2009 bis 2011 zusätzlich weitere 100 Mio. Euro in Lärm- und Erschütterungsschutzmaßnahmen an Schienenwegen investiert.

Ort	Tag (6-22 Uhr)	Nacht (22-6 Uhr)
An Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen	70 dB(A)	60 dB(A)
In reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	70 dB(A)	60 dB(A)
In Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	72 dB(A)	62 dB(A)
In Gewerbegebieten	75 dB(A)	65 dB(A)

Tabelle 3: Lärmsanierungsgrenzwerte Immission (Beurteilungspegel) gemäß Bundeshaushalt vom 25.02.2004 für bestehende Schienenwege der Eisenbahnen des Bundes.

Von 1999 bis Mai 2010 wurden von den vom Bund bereitgestellten 732 Mio. Euro zur Lärmsanierung im Streckennetz nur etwa 482 Mio. Euro eingesetzt. Nicht abgerufene Beträge verfallen am Ende des Haushaltsjahres. Hinzu kamen in diesem Zeitraum weitere 86 Mio. Euro aus Mitteln der Deutschen Bahn AG [KleinAnfr 17/2308, 2010].

Dabei finanziert der Bund Investitionen zur Lärminderung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes, wenn der Lärmpegel die hierfür festgelegten Immissionsgrenzwerte überschreitet (siehe Tabelle 3), die deutlich über den Werten für den Neubau in der 16. BImSchV liegen (Tabelle 2). Beim Einbau passiver Schallschutzmaßnahmen ist die Erstattung zur Berücksichtigung der Wertverbesserung der Immobilie auf maximal 75% der Kosten begrenzt, 25% Eigenanteil sind vom Eigentümer zu tragen.

3.3.2 Deskriptive Auswertung der Verkehrszahlen und der akustischen Messgrößen in der Feldstudie

Im Rahmen der Feldstudie in DEUFRAKO/RAPS wurden 33 Probanden an 27 verschiedenen Messstellen untersucht, d.h. insgesamt wurden die akustischen Daten an $27 \cdot 9 = 243$ Nächten während der Zeit, die die Probanden im Bett verbracht haben, aufgezeichnet. Bei der akustischen Auswertung konnten 2 Nächte nicht berücksichtigt werden, da in diesen Nächten kein Innenschalldruckpegel am Ohr des Schläfers vorliegt.

In den verbliebenen 241 Nächten wurden in der Summe 9.476 Güterzüge gezählt, die von keinen anderen Geräuschen überlagert wurden (diese werden im folgenden als „ungestört“ bezeichnet), und zusätzlich noch einmal 2.360 Güterzüge, die gleichzeitig zu noch anderen Geräuschen auftraten (diese werden im folgenden als „gestörte“ Geräusche bezeichnet). Hinzu kamen 3.294 ungestörte und 899 gestörte Geräusche von Personenzügen bzw. 7.365 ungestörte und 1.822 gestörte Geräusche vom Straßenverkehr.

Die zeitliche Dauer der Bahngeräusche betrug für die Güterzüge im Median 65.2 s (25./75. Perzentil: 49.6 s / 85.1 s) und für die Personenzüge 29.4 s (25./75. Perzentil: 23.6 s / 38.3 s).

Abbildung 7 zeigt die mittlere Anzahl der Güter- und Personenzüge pro Nacht während der 9-tägigen Untersuchungsperioden. Das 95%-Konfidenzintervall für die Anzahl der Güterzüge wird hierin durch den schwarz markierten Bereich dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die mittlere Anzahl der Güterzüge in der Nacht im Verlauf der Woche (Nacht von Montag auf Dienstag bis Freitag auf Samstag) sich nur wenig änderte, wohingegen am Wochenende (Samstag auf Sonntag und Sonntag auf Montag) deutlich weniger Güterverkehr abgewickelt wurde.

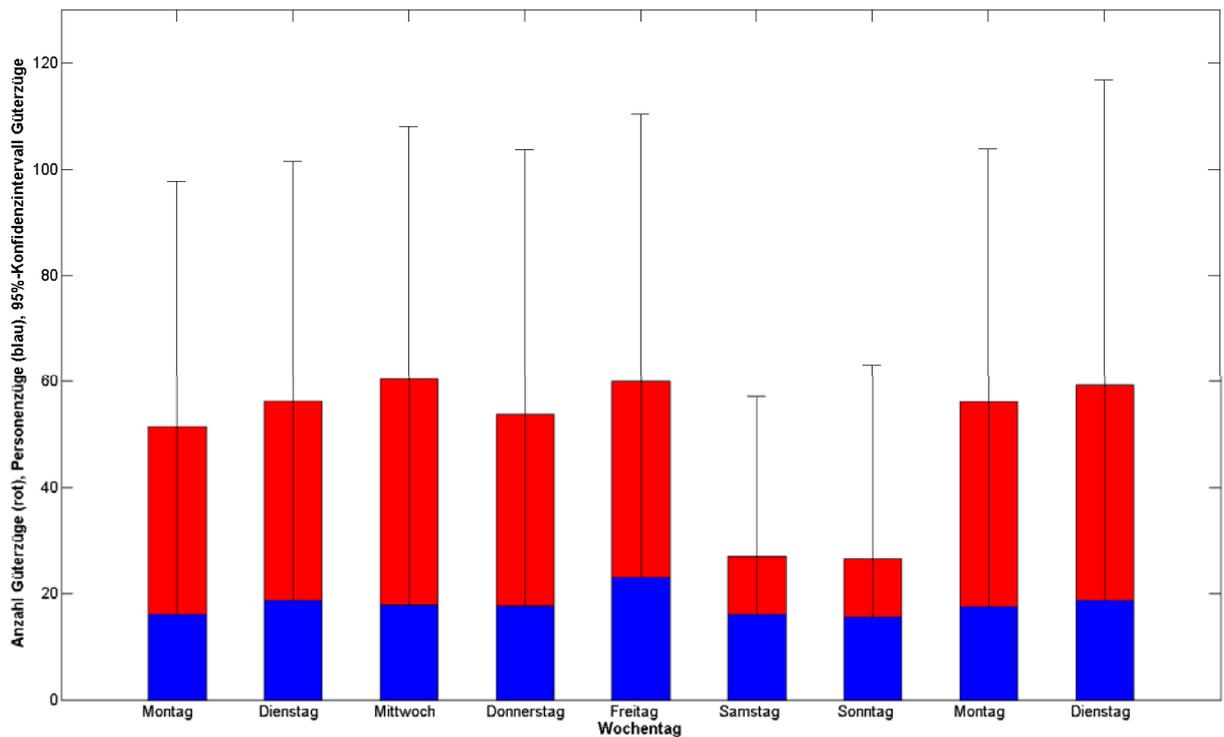


Abbildung 7: Mittlere Anzahl der Güter- (rot) und Personenzüge (blau) pro Nacht während der 9-tägigen Untersuchungsperioden. Das 95%-Konfidenzintervall für die Anzahl der Güterzüge wird durch den schwarz markierten Bereich dargestellt.

Die z.T. große Varianz der gezählten Güterzüge an den verschiedenen Messstellen, die sich im großen Konfidenzintervall zeigt, ist neben saisonalen Effekten (siehe Abbildung 10) vorwiegend auch darauf zurückzuführen, dass die Bahnstrecken, an denen gemessen wurde, zweigleisig bis hin zu zehngleisig im nahen Umfeld des Kölner Hauptbahnhofes ausgebaut waren und somit deutlich unterschiedliche Verkehrszahlen aufwiesen.

Betrachtet man die Verteilung der Anzahl der Güterzüge im Verlaufe der Nacht (Abbildung 8 und Abbildung 9), so erkennt man, dass die Anzahl pro Stunde zwischen 23 und 7 Uhr sowohl in der Woche als auch am Wochenende annähernd konstant bleibt, wohingegen zwischen 1 und 5 Uhr deutlich weniger Personenzüge fahren.

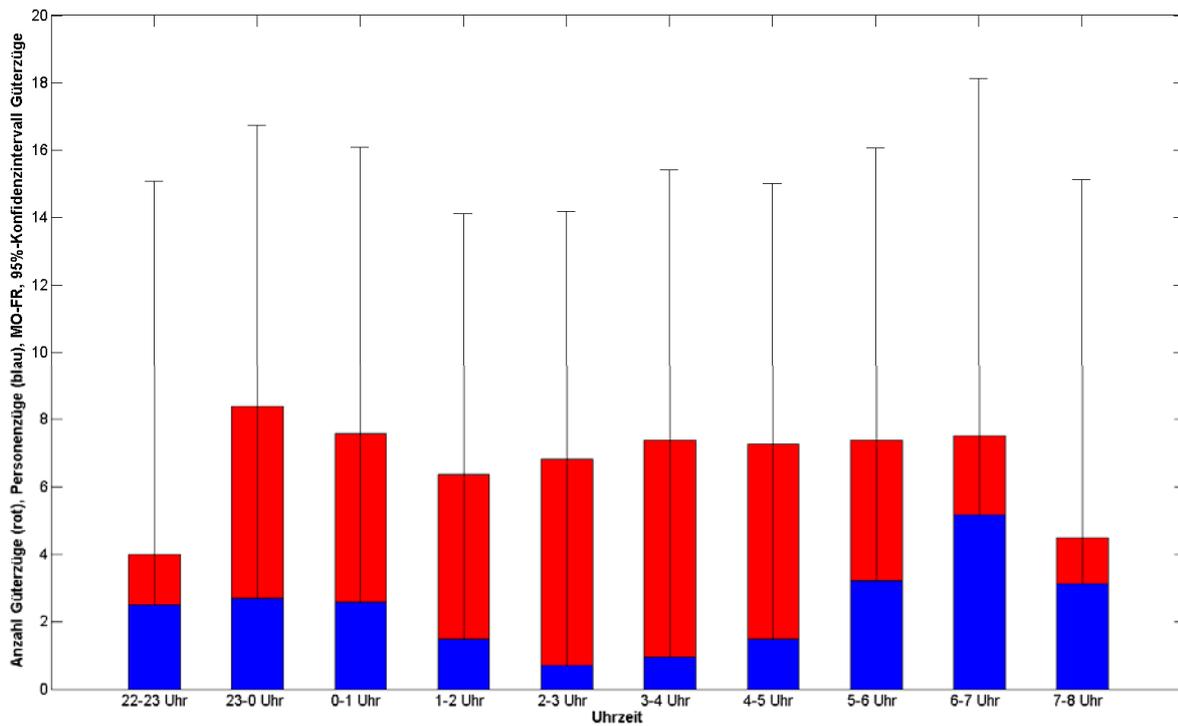


Abbildung 8: Mittlere Anzahl der Güter- (rot) und Personenzüge (blau) pro Nacht im Verlauf der Untersuchungs Nächte (Montag bis Freitag). Das 95%-Konfidenzintervall für die Anzahl der Güterzüge wird durch den schwarz-markierten Bereich dargestellt.

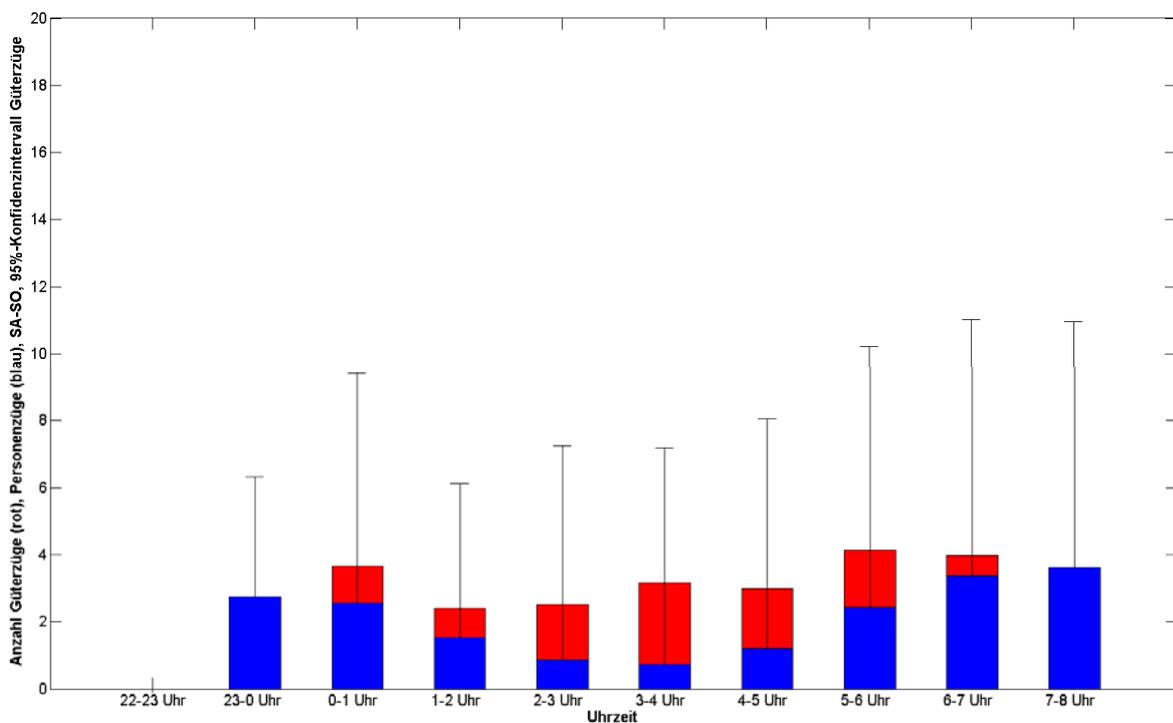


Abbildung 9: Mittlere Anzahl der Güter- (rot) und Personenzüge (blau) pro Nacht im Verlauf der Untersuchungs Nächte (Samstag und Sonntag). Das 95%-Konfidenzintervall für die Anzahl der Güterzüge wird durch den schwarz-markierten Bereich dargestellt.

Des Weiteren zeigt die Verteilung der Anzahl der gefahrenen Güterzüge/Nacht im Verlaufe des Untersuchungszeitraums von Frühjahr 2008 bis Sommer 2009 (siehe Abbildung 10), den deutlichen konjunkturellen Einbruch im Jahr 2009, welcher sich im Rückgang der Güterzugfahrten in der Nacht widerspiegelt.

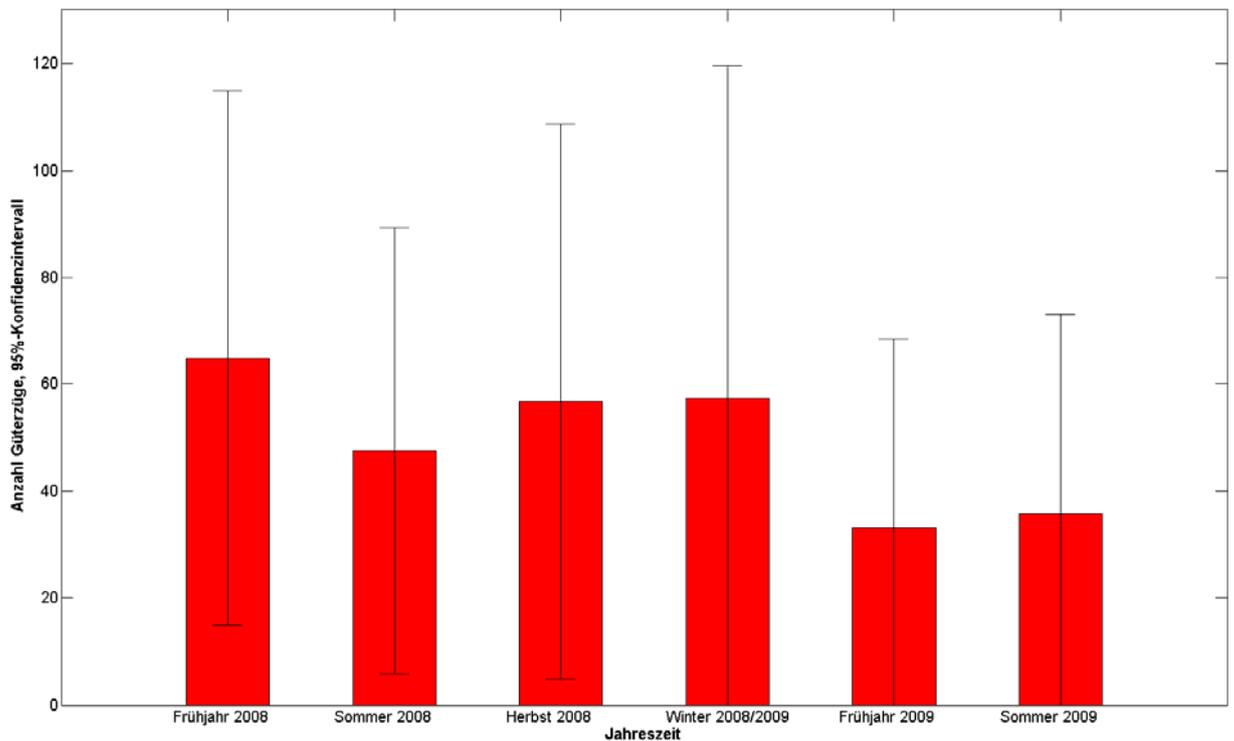


Abbildung 10: Mittlere Anzahl der Güterzüge (rot) pro Nacht im jahreszeitlichen Verlauf. Das 95%-Konfidenzintervall für die Anzahl der Güterzüge wird durch den schwarz-markierten Bereich dargestellt.

Das Statistische Bundesamt DESTATIS ermittelte für den Eisenbahngüterverkehr in 2009 einen deutlichen Rückgang des Verkehrsaufkommens im Vergleich zu 2008: „Der Güterverkehr bei der Eisenbahn brach wesentlich stärker als auf der Straße ein: Das Verkehrsaufkommen lag mit 310,0 Millionen Tonnen um 16,5%, die tonnenkilometrische Leistung mit 95,6 Milliarden Tonnenkilometern sogar um 17,3% unter dem Vorjahreswert. Das war der stärkste Rückgang der Beförderungsleistung aller Verkehrszweige.“ [Destatis, 2010].

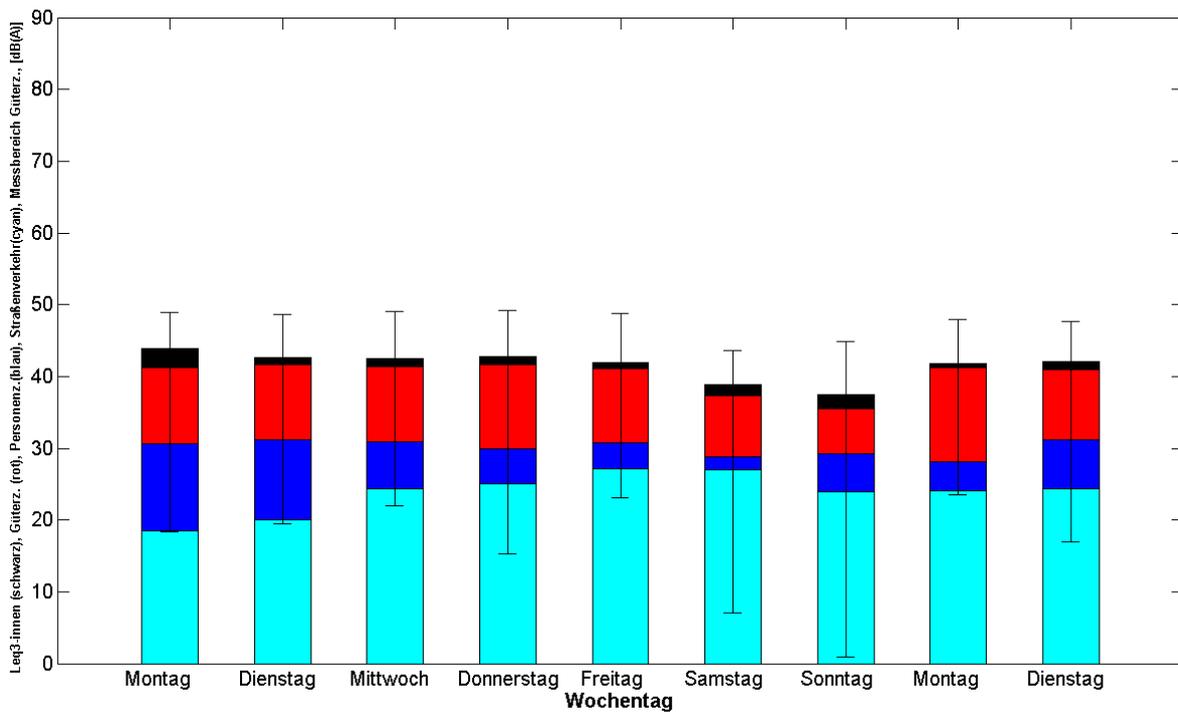


Abbildung 11: Mittlerer energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{Aeq} gesamt innen (schwarz), der Güter- (rot) und Personenzüge (blau) und des Straßenverkehrs (cyan) im Verlauf der Untersuchungs Nächte. Der gesamte Messbereich für die Güterzüge wird durch den schwarz markierten Bereich dargestellt. Die Mittelung wurde über alle Messnächte in der Schlafzeit der Probanden ohne Berücksichtigung der jeweiligen Fensterstellung vorgenommen.

In Abbildung 11 ist der gemittelte energieäquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} , gemessen innen am Ohr des Schläfers, über alle Messtage und Messorte unabhängig von der jeweiligen Fensterstellung dargestellt. Die Mittelwerte für die in der Nacht an den untersuchten Messstellen dominierenden Güterzüge sind in rot, der gesamte Messbereich durch den schwarz markierten Bereich dargestellt.

Die entsprechenden gemittelten energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq} für die Außenpegel sind in Abbildung 12 dargestellt. Gemessen wurde hierbei der Pegel 2 m vor den jeweiligen Schlafzimmerfenstern, wobei die Außenschalldruckpegel in der Darstellung noch nicht freifeldkorrigiert wurden, d.h. zur Berücksichtigung von Reflexionen an Fassade und Fenster wurden noch nicht 3 dB(A) abgezogen [DIN 45645-Teil 1, 1996].

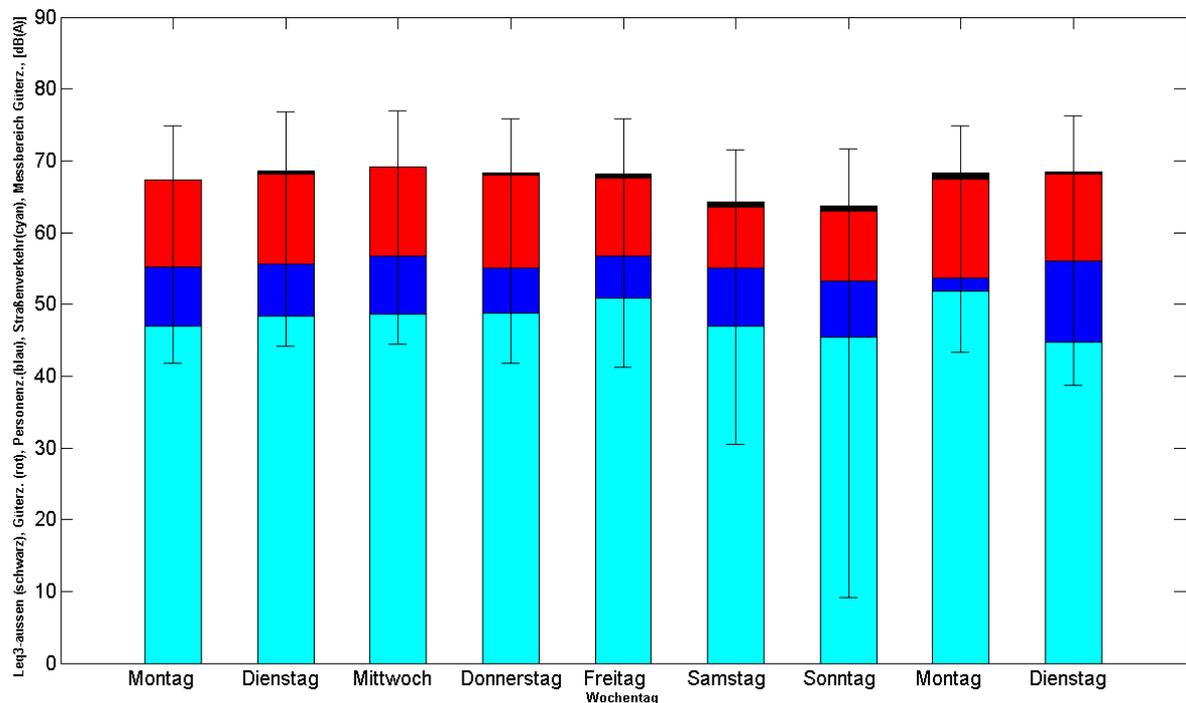


Abbildung 12: Mittlerer energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{Aeq} gesamt aussen (schwarz), der Güter- (rot) und Personenzüge (blau) und des Straßenverkehrs (cyan) im Verlauf der Untersuchungs Nächte. Der gesamte Messbereich für die Güterzüge wird durch den schwarz-markierten Bereich dargestellt. Die Mittelung wurde über alle Messnächte in der Schlafzeit der Probanden vorgenommen. Die Schalldruckpegel wurden 2 m vor dem Schlafzimmerfenster gemessen. Die Außenschalldruckpegel wurden noch nicht freifeldkorrigiert, d.h. zur Berücksichtigung von Reflexionen an Fassade und Fenster wurden noch nicht 3 dB(A) abgezogen [DIN 45645-Teil 1, 1996].

Obwohl die Außenschalldruckpegelmessungen nicht für einen in der 16. BImSchV definierten Immissionsort von 0,2 m über der Fensteroberkante bei geöffnetem Fenster erfolgen konnten, kommen die Außenpegelmessungen den Werten für diesen definierten Immissionsort nahe.

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Immissionswerte während der Studie an den meisten Messorten die Grenzwerte der 16. BImSchV für den Neubau von Strecken als auch die Lärmsanierungsgrenzwerte für bestehende Schienenwege der Eisenbahnen des Bundes z.T. deutlich überschritten, was ihre Aufnahme in das freiwillige Lärmsanierungsprogramm erklärt. Zu

beachten ist bei der Darstellung in Abbildung 12 auch, dass in die Mittelung der Konjunkturreinbruch Ende 2008 / Anfang 2009 mit hineinspielt (siehe Abbildung 10) und das 95%-Konfidenzintervall ausschließlich für den L_{Aeq} der Güterzüge dargestellt ist. Bei gleichen Verkehrszahlen in 2008 und 2009 würden die Werte höher ausfallen. Der nächtliche Zeitraum, der in die Berechnungen einfließt, ist nicht die Zeit von 22-6 Uhr, sondern die jeweilige Schlafzeit des Probanden. Die Bettzeit konnte von jedem Probanden in jeder Nacht frei gewählt werden mit der Beschränkung, dass der Zeitraum 0-6 Uhr im Bett verbracht werden musste und der Proband nicht später als 8 Uhr aufstehen durfte.

Im Projekt DEUFRAKO/RAPS wurden in insgesamt 27 Wohnungen an den links- und rechtsrheinischen Bestandsstrecken zwischen Köln und südlich von Bonn (Erpel) 33 Probanden untersucht. Laut „Liste der Sanierungsabschnitte in Planung, im Bau und realisiert mit Stand vom 15.12.2004“ [Maßnahmen Lärmsanierung, 2004] können 14 von diesen 27 Wohnungen am Sanierungsprogramm teilnehmen. Von diesen 14 Wohnungen hatten letztlich 7 Wohnungen während der Studiendurchführung nach Angaben der Probanden Schallschutzfenster in den Schlafräumen.

3.3.3 Differenzbildung Außen- und Innenschallpegel

Abweichend von der Definition des Immissionsortes in der 16. BImSchV ist für die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeiten im Schlaf der am Ohr des Schläfers gemessene Schalldruckpegel von physiologischer Relevanz. Um den Unterschied des in den Verordnungen verwendeten Immissionspegels (angenähert durch den in der Studie gemessenen Außenpegel) und des für die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeiten im Schlaf verwendeten Innenpegels (gemessen am Ohr des Schläfers) in Abhängigkeit von der jeweiligen Fensterstellung zu verdeutlichen, wird im folgenden Kapitel die Schalldämmung differenziert erörtert.

3.3.3.1 Grundlagen Schalldämmung

Das Schalldämm-Maß einer der Schallquelle zugewandten Fassade wird hauptsächlich durch das Bauteil mit dem geringsten Schalldämm-Maß bestimmt, was i.d.R. das Fenster ist. Um das Schalldämm-Maß des Fensters optimal auf das der Außenfassade anpassen zu können, werden Fenster in sechs Schallschutzklassen von 25 dB bis ≥ 50 dB in 5 dB-Schritten eingeteilt [DIN 2719, 1987]. Damit Schallschutzfenster diese Werte auch einhalten können, sind ein optimaler Anpressdruck von Rahmen und Flügel und ein optimaler Anschluss an den Baukörper unerlässlich. Schon kleine Fugenundichtigkeiten beim Anschluss an den Baukörper vermindern den Schallschutz deutlich.

Wird das Fenster gekippt, verringert sich die Schalldämmung mit größer werdender Spaltöffnung erheblich. Bei vollständig gekipptem Fensterflügel verhalten sich Fenster unterschiedlicher Schallschutzklassen nahezu identisch, und die schalldämmende Wirkung der Verglasung ist in dem Fall somit praktisch unbedeutend [Kötz, 2004].

Das Schalldämm-Maß ist frequenzabhängig, wobei tiefe Frequenzen bei geschlossenen Fenstern deutlich schlechter gedämmt werden (üblicherweise bis 30 dB und mehr) als hohe [Fasold, 1998]. Bei gekippten Fenstern ist die frequenzabhängige Schalldämm-Maß-Kurve hingegen annähernd flach.

Bei der Differenzbestimmung von Außen- und Innenpegel sind neben der schon erwähnten Schallschutzklasse des Fensters sowie der Größe dessen Öffnungsspalt vorwiegend folgende weitere Größen von Einfluss:

- das Frequenzspektrum und der Pegel des betrachteten Außengeräusches
- der Schalleinfallswinkel
- Größe der Außenfassade und Fensterfläche

- Volumen und Nachhallzeit des Innenraumes

3.3.3.2 *Auswertung der Feldstudientdaten*

Primäres Ziel der Feldstudien DEUFRAKO/RAPS ist nicht die systematische Untersuchung der Dämmung bzw. hier der Differenzen von Außen- und Innenschalldruckpegeln, sondern vielmehr die Untersuchung der Auswirkungen realen Bahnlärms auf den menschlichen Schlaf. Dies erfordert eine komplexe Aufzeichnung und ereigniskorrelierte Auswertung der Schlafdaten und somit natürlich auch die Messung des vom Schläfer perzipierten Schalldruckpegels an dessen Ohr [Basner, 2004].

Aufgrund dieser Fragestellung wurden in DEUFRAKO/RAPS neben den mit den Klasse 1 – Schallpegelmessern aufgenommenen Schalldruckpegeln außen und innen am Ohr des Schläfers, der für jede Nacht protokollierten Fensterstellung und der Angabe durch die Probanden, ob die Schlafräume Schallschutzmaßnahmen erhalten hatten oder nicht, keine weiteren Messgrößen aufgenommen, die z.B. die akustischen Eigenschaften des Schlafraums oder den Einfallswinkel zur Schallquelle charakterisieren.

Somit kann mit den in der Studie erhobenen akustischen Messdaten ausschließlich eine Aussage über die Pegeldifferenz des Außenpegels und den tatsächlich von den Probanden der Studie in der Nacht perzipierten Abwerteten Schalldruckpegeln gemessen am Kopfe des Bettes möglichst nah am Ohr des Schläfers, getroffen werden. Eine systematische Untersuchung von Dämmeigenschaften spezieller Fenstergruppen unter Berücksichtigung aller akustischen Einflussgrößen unter konstanten Messbedingungen wurde nicht vorgenommen.

Die Probanden konnten während der Feldstudie entsprechend den örtlichen Bedingungen und unbeeinflusst in jeder Messnacht die Fensterstellung nach eigener Vorstellung selbst wählen.

In Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 sind für das gekippte, das geschlossene und das geöffnete Fenster für die drei Verkehrsträger Güterzug, Personenzug und Straßenverkehr die Pegeldifferenzen dargestellt. Für die Berechnungen wurden ausschließlich ungestörte Geräusche herangezogen.

	Zweifachverglasung, ohne Schallschutz	Zweifachverglasung, mit Schallschutz	Dreifachverglasung, mit Schallschutz
Güterzüge	17.9 (13.7 19.7) dB(A) 2244 Geräusche 7 Messt./65 Nächte	20.3 (19.7 21.4) dB(A) 1194 Geräusche 3 Messt./26 Nächte	keine Messdaten in der Studie
Personenzüge	14.8 (11.7 18.1) dB(A) 795 Geräusche 7 Messt./65 Nächte	25.3 (20.0 26.2) dB(A) 285 Geräusche 3 Messt./26 Nächte	keine Messdaten in der Studie
Straßenverkehr	14.5 (13.5 16.7) dB(A) 1349 Geräusche 7 Messt./65 Nächte	23.4 (19.4 25.4) dB(A) 232 Geräusche 3 Messt./26 Nächte	keine Messdaten in der Studie

Tabelle 4: Median der Differenz aus dem um 3 dB korrigierten Außen- und Innenpegel (am Ohr des Schläfers) für das gekippte Fenster.

Um Verzerrungen bei der Mittelwertbildung aus den Pegeldifferenzen durch Ausreißer zu vermeiden, wurde der Median als ein gegenüber Ausreißern stabiles Lagemaß gewählt. Verantwortlich für die nicht unerhebliche Streuung der einzelnen Differenzwerte sind hauptsächlich die unterschiedlichen Schalleinfallswinkel an den verschiedenen Messstellen. Dokumentiert wird diese Streuung durch die Angabe des 1. und 3. Quartils in Klammern.

In [Basner et al., 2006] konnte bereits gezeigt werden, dass zur Beschreibung des Problems die Differenzbildung der Maximalpegel ausreichend ist.

	Zweifachverglasung, ohne Schallschutz	Zweifachverglasung, mit Schallschutz	Dreifachverglasung, mit Schallschutz
Güterzüge	28.9 (27.0 34.0) dB(A) 2462 Geräusche 9 Messt./75 Nächte	28.9 (28.1 29.5) dB(A) 191 Geräusche 2 Messt./17 Nächte	36.8 (24.1 38.7) dB(A) 471 Geräusche 2 Messt./18 Nächte
Personenzüge	28.8 (25.7 32.3) dB(A) 979 Geräusche 9 Messt./75 Nächte	26.9 (25.9 28.1) dB(A) 185 Geräusche 2 Messt./17 Nächte	36.3 (24.5 38.1) dB(A) 220 Geräusche 2 Messt./18 Nächte
Straßenverkehr	28.2 (25.8 33.8) dB(A) 237 Geräusche 9 Messt./75 Nächte	32.1 (31.3 32.9) dB(A) 191 Geräusche 2 Messt./17 Nächte	36.4 (23.3 38.0) dB(A) 273 Geräusche 2 Messt./18 Nächte

Tabelle 5 :Median der Differenz aus dem um 3 dB korrigierten Außen- und Innenpegel (am Ohr des Schläfers) für das geschlossene Fenster.

	Zweifachverglasung, ohne Schallschutz	Zweifachverglasung, mit Schallschutz	Dreifachverglasung, mit Schallschutz
Güterzüge	11.3 (9.7 13.2) dB(A) 755 Geräusche 4 Messt./29 Nächte	keine Messdaten in der Studie	keine Messdaten in der Studie
Personenzüge	11.9 (10.3 15.6) dB(A) 202 Geräusche 4 Messt./29 Nächte	keine Messdaten in der Studie	keine Messdaten in der Studie
Straßenverkehr	11.6 (10.1 13.9) dB(A) 317 Geräusche 4 Messt./29 Nächte	keine Messdaten in der Studie	keine Messdaten in der Studie

Tabelle 6: Median der Differenz aus dem um 3 dB korrigierten Außen- und Innenpegel (am Ohr des Schläfers) für das geöffnete Fenster.

4 Schlaf

Eva-Maria Elmenhorst, Vinzent Rolny, Mathias Basner

4.1 Einleitung

Obwohl der Mensch seine Umgebung während des Schlafs nicht bewusst wahrnimmt, reagieren die physiologischen Körperregulationen weiterhin auf die Umwelt und verarbeiten auch akustische Signale und Geräusche im Schlaf. Verkehrsgeräusche können zu Aufwachreaktionen unterschiedlichen Ausmaßes führen; diese können sich in Schlafstadienwechseln äußern, in kurzzeitigem, nicht erinnerbarem Erwachen oder bewusstem Erwachen münden. Die physiologische Schlafstruktur wird dabei unterbrochen. Welche negativen Langzeiteffekte daraus resultieren, ist schwer abzuschätzen, da auf vermehrt von außen verursachte Aufwachreaktionen durch eine Verminderung der physiologischen Aufwachreaktionen während der Nacht reagiert wird. In jedem Fall führen Verkehrsgeräusche zu vermehrter Schlaf-fragmentierung und damit einhergehenden Herzfrequenzbeschleunigungen, so dass ein Zusammenhang mit Herz-Kreislauferkrankungen nahe liegt [Greiser et al., 2007, Jarup et al., 2008]. Außerdem sind sie Ursache von gesteigerter Müdigkeit und Belästigung.

Verkehrslärm im Allgemeinen verändert die Schlafstruktur in typischer, jedoch unspezifischer Weise. Die Einschlaf latenz und die Latenz bis zum Auftreten von Tiefschlaf sind verlängert, der Anteil der leichten Schlafstadien ist erhöht, wohingegen der Tiefschlafanteil vermindert ist. Die Anzahl der Aufwachreaktionen „Arousals“, der Schlafstadienwechsel und der Sleep Disturbance Index (SDI) [Griefahn et al., 2008] als Maß der Schlaf-fragmentierung sind erhöht. Diese Veränderungen sind in ihrer Ausprägung eher moderat und bewegen sich im Bereich von wenigen Minuten über den Gesamtzeitraum der Nacht [Basner & Samel, 2005; Griefahn et al., 2008]. Auch die Schlaf-fragmentierung durch Verkehrslärm ist im Vergleich zu

krankhaften Schlafveränderungen wie beispielsweise dem obstruktiven Schlaf-Apnoe-Syndrom geringer ausgeprägt.

In einer Laborstudie, die auf einen systematischen Vergleich der drei Verkehrslärmarten Straßenlärm, Schienenverkehrslärm und Fluglärm und ihrer Wirkungen auf den Schlaf, die Leistung und die Belästigung unter kontrollierten Bedingungen ausgerichtet war, wurde Straßenlärm als die Verkehrslärmart mit der stärksten Wirkung auf den Schlaf identifiziert. Die Wirkungen des Schienenverkehrslärms zeigten sich dem untergeordnet, und Fluglärm offenbarte die geringsten Effekte auf den Schlaf [Basner et al., 2010 in press].

Dosis-Wirkungsbeziehungen von Fluglärm und Schlaf auf Basis einer Feldstudie mit 64 Versuchspersonen existieren bereits [Basner et al., 2006]. Die vorliegende Untersuchung dient zur Ergänzung und zum Vergleich dieser Kurven mit Dosis-Wirkungsbeziehung, die die Wirkung von Schienenverkehrslärm auf den Schlaf abbilden sollen.

4.2 Methodik

In der Auswertung wurden zum einen die Gesamtschlafparameter der Nacht betrachtet:

Dies sind die Einschlaf latenz (SOL), die Tiefschlaf latenz (SWS-Latenz) und die REM-Latenz. Da die Probanden ihre Schlafzeiten in gewissen Grenzen frei wählen konnten und diese somit in dieser Feldstudie unterschiedlich ausfielen, ist die Berechnung der Anteile der Schlafstadien an der Sleep period time (SPT) sowie S3 + S4 als Tiefschlafanteil (SWS) nicht sinnvoll möglich. Dies gilt auch für die Indikatoren der Schlaf fragmentierung.

In vorliegendem Bericht steht die Analyse der Geräusch-Einzelereignisse und ihre direkte Wirkung auf den Schlaf im Mittelpunkt, d.h. eine ereigniskorrelierte Auswertung. Auf diese Weise wird es möglich, einen Zusammenhang herzustellen zwischen akustischen Variablen (wie dem Maximalpegel eines Verkehrsgeräusches bzw. seiner Differenz zum Hintergrundpegel oder der

Anstiegssteilheit des Geräusches), anderen situativen und individuellen Einflussfaktoren und der Wahrscheinlichkeit, in das Stadium Wach oder S1 zu wechseln.

Die erste Studiennacht diente zur Adaptation an die Messinstrumente und die Untersuchungssituation und wurde nicht in die Auswertung einbezogen. Sie ist jedoch zur Information in den Abbildungen enthalten. Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Schlaflatenzzeiten wurden mittels gemischter Modelle mit Zufallseffekten in SAS (Version 9.2) berechnet. Effekte wurden als zufällig angesehen, da die untersuchte Stichprobe aus einer größeren Anzahl von möglichen Probanden gezogen wurde. Da ein Proband wiederholt im Studienverlauf betrachtet wurde, sind die Daten nicht unabhängig.

Die ereigniskorrelierte Auswertung wurde mittels logistischer Regression mit Zufallseffekten durchgeführt (PROC NLMIXED, SAS 9.2). Das Signifikanzniveau wurde mit $\alpha < 0.05$ angenommen.

4.2.1 Hypothesen

- 1) Die akustischen Parameter L_{Aeq} , Anzahl von nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschen und Dauer des Vorbeifahrens verändern die untersuchten Latenzzeiten für das Einschlafen bis zum ersten Auftreten von Tiefschlaf und Stadium REM.
- 2) Die einzelnen Lärmereignisse führen zu einer Veränderung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Schlafstadienwechseln und Aufwachreaktionen.

4.3 Ergebnisse

Abbildung 13 zeigt die Lärmsituation der untersuchten Studienpopulation in den einzelnen Studiennächten gemittelt über alle Messstellen. Es wird deutlich, dass ein breites Spektrum an unterschiedlichen Lärmintensitäten abgedeckt werden konnte. So umfassen die akustischen Aufzeichnungen ein Spektrum von 26,6 bis 50,9 dB(A) L_{Aeq} am Ohr des Schläfers, die Anzahl der Güterzüge reicht von 1 bis zu 150 Lärmereignissen pro Nacht und die Anzahl der Personenzüge umfasst 0 bis 48 Lärmereignisse pro Nacht.

Die Lärmexposition durch Güterzüge verändert sich drastisch im Wochenverlauf, da es zu einem deutlichen Rückgang der Lärmereignisse am Wochenende kommt. Dahingegen bleibt die Anzahl der Personenzüge weitgehend gleich. Nacht 5 (von Freitag auf Samstag) ist die erste Studiennacht mit deutlich erhöhter SPT, da sich hier die Gelegenheit bietet, nach der Arbeitswoche am Wochenende länger zu schlafen (Abbildung 14). Ähnliche Werte sind bei der TST zu beobachten. Die Schlaffeffizienz bleibt, nach einer deutlichen Zunahme nach der Adaptationsnacht, auf gleichbleibend hohem Niveau von etwa 89%. Abbildung 13 zeigt, dass durch die verlängerte Schlafzeit in die späteren Morgenstunden des Samstags hinein gerade in Nacht 5 auch die Anzahl der Lärmereignisse in der Schlafperiode eher steigt, dies betrifft insbesondere auch die Anzahl der Personenzüge.

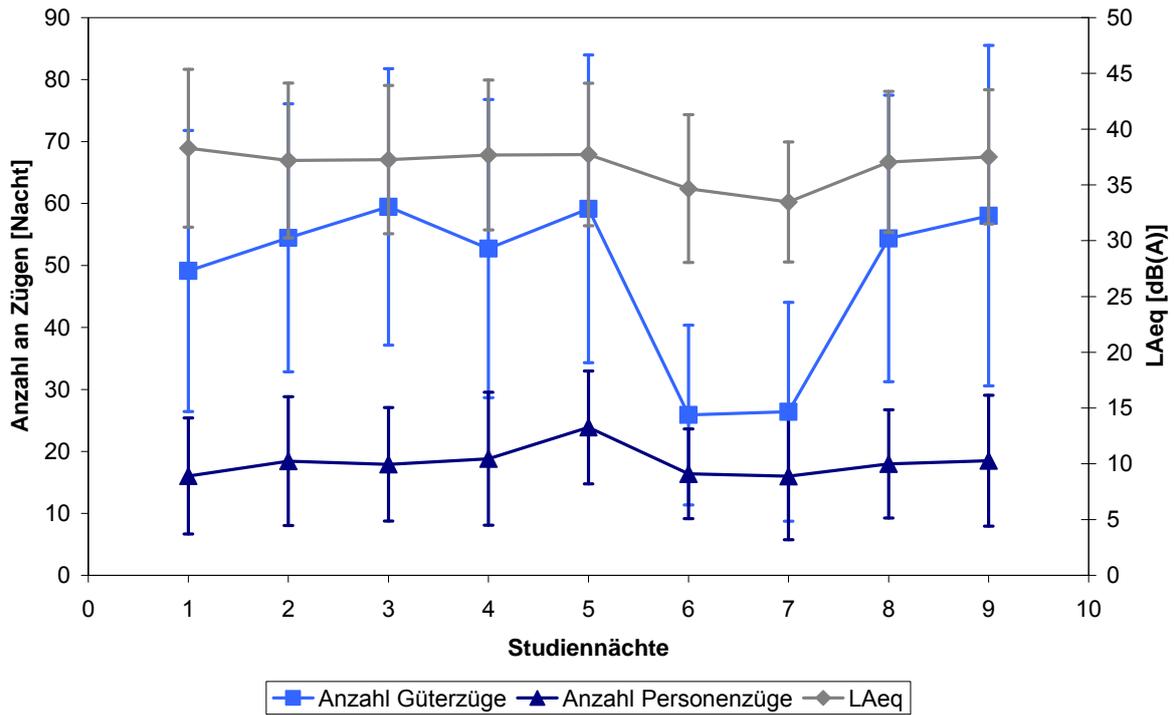


Abbildung 13: Mittlere Anzahl an Güter- und Personenzügen mit Standardabweichung sowie mittlerer L_{Aeq} über alle Messstellen.

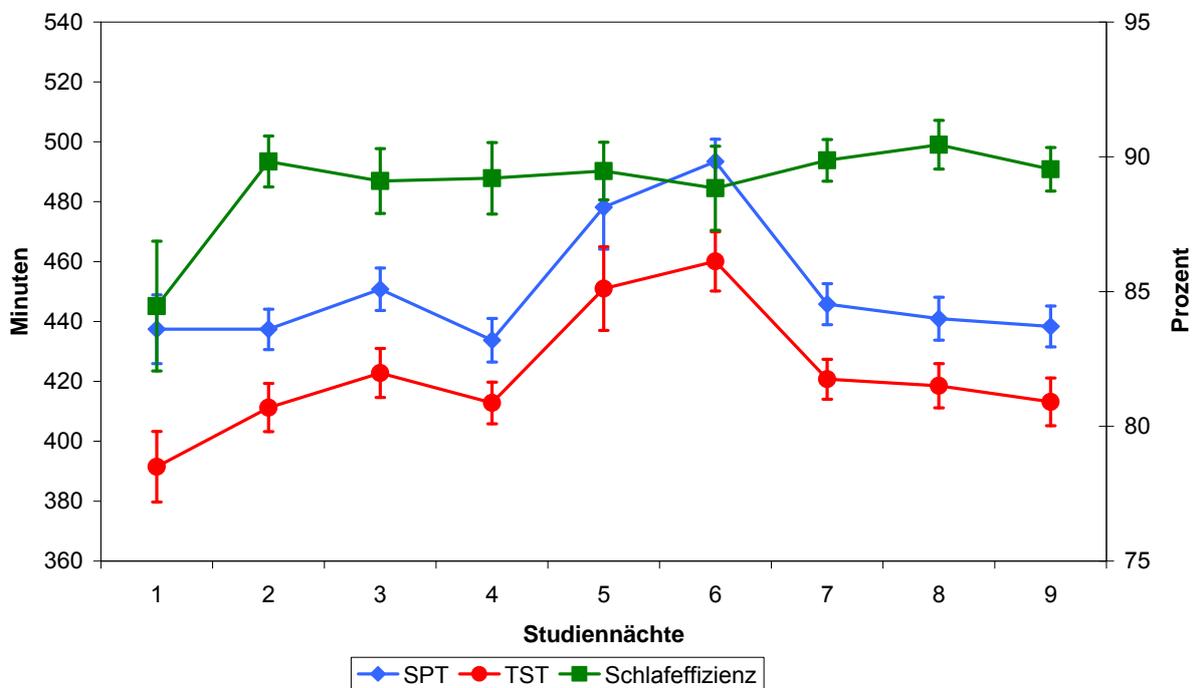


Abbildung 14: Mittelwerte und Standardfehler der Sleep Period Time (SPT) und totalen Schlafzeit (TST) im Studienverlauf in Minuten sowie die Schlafeffizienz in den einzelnen Nächten in Prozent.

Die Schlaflatenzzeiten zeigen keine signifikanten Veränderungen durch die akustischen Parameter (Tabelle 7). Die SOL ist gerade in der 5. Nacht besonders gering. Während der Studie liegt die mittlere SOL zwischen 13,7 min ($\pm 1,6$ SF) und 17,4 min ($\pm 2,1$ SF), die SWS Latenz zwischen 34,9 min ($\pm 4,3$ SF) und 44,3 min ($\pm 13,6$ SF) und die REM Latenz zwischen 69,6 min ($\pm 3,2$ SF) und 83,2 min ($\pm 5,3$ SF), wie in Abbildung 15 dargestellt.

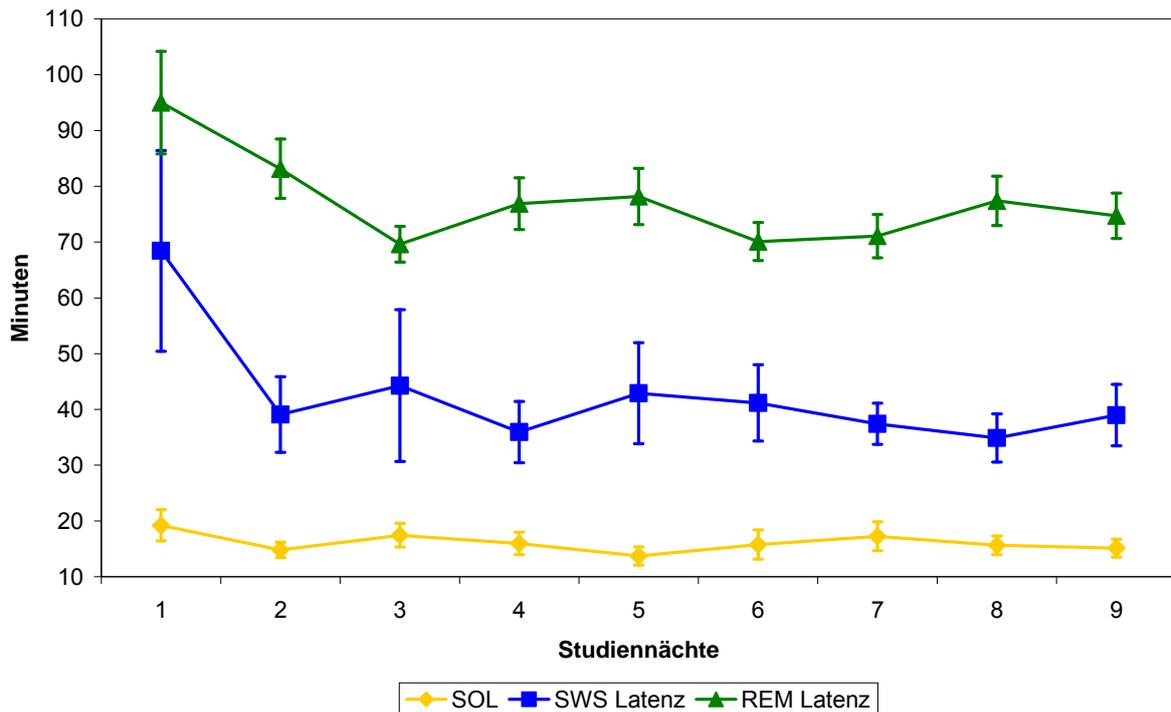


Abbildung 15: Mittlere Einschlaf latenz (SOL), Tiefschlaf latenz (SWS Latenz) und REM Latenz mit Standardfehler im Studienverlauf.

Die ereigniskorrelierte Auswertung der Schlafstadienwechsel zu den Stadien S1 und Wach, die in unmittelbarem zeitlichem Zusammenhang mit Lärmergebnissen auftraten, erfolgte, wie in [Basner et al., 2004] beschrieben.

SOL	t-Wert	p-Wert
L_{Aeq}	-0.07	0.9418
Anzahl Züge	-1.18	0.2373
Dauer Züge	-1.53	0.1274
Freitag	-1.48	0.1394
SWS Latenz		
L_{Aeq}	0.09	0.9298
Anzahl Züge	-1.45	0.1490
Dauer Züge	-0.97	0.3328
Freitag	0.55	0.5821
REM Latenz		
L_{Aeq}	1.19	0.2359
Anzahl Züge	0.16	0.8697
Dauer Züge	0.99	0.3256
Freitag	0.86	0.3913

Tabelle 7: Übersicht über die Ergebnisse der Regressionsanalysen der Schlaflatenzzeiten. Die abhängigen Variablen wurden einzeln auf Signifikanz geprüft. Anzahl Züge = Anzahl der Züge in der Schlafperiode; Dauer Züge = Gesamtdauer der Zugvorbeifahrten in der Schlafperiode in Minuten; Freitag (Ausprägung 1 oder 0) = untersucht den Effekt der verlängerten Schlafzeit von Freitag auf Samstag Nacht.

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse eines multivariaten logistischen Regressionsmodells mit Zufallseffekt. Es zeigte sich, dass die Emergenz (Differenz des Schalldruckpegels des Lärmereignisses zum Hintergrundpegel) besser geeignet ist zur Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit als der L_{AFmax} (AIC - Akaike Information Criterion, Tabelle 9). Grundsätzlich unterscheiden sich die Modelle aber nur unwesentlich.

Variable	Regressionskoeffizient	p-Wert
Intercept	-3.1317 (0.2942)	<0.0001
verstrichene Schlafzeit	0.0007 (0.0002)	<0.0001
Geräushdauer	-0.0043 (0.0015)	0.0038
Pegelanstieg	0.0516 (0.0103)	<0.0001
Emergenz	0.0131 (0.0049)	0.0078
Alter	0.0181 (0.0066)	0.0062
Geschlecht	0.0323 (0.1421)	0.820
DauerVor	-0.0345 (0.0048)	<0.0001
DauerVor ²	0.0003 (0.00005)	<0.0001
Stadium 3	-1.0406 (0.3172)	0.0010
Stadium 4	-0.4231 (0.4062)	0.297
REM-Schlaf	0.1341 (0.0897)	0.135

Tabelle 8: Regressionkoeffizienten und p-Werte eines multivariablen logistischen Regressionsmodells mit Zufallseffekt. Geschlecht: männlich=1; DauerVor = Schlafzeit im jeweiligen Schlafstadium bei Einsetzen des Lärmereignisses.

Variable	Regressionskoeffizient	p-Wert
Intercept	-4,0161 (0,3550)	<0.0001
verstrichene Schlafzeit	0,0006 (0,0002)	0,0001
Geräushdauer	-0,0047 (0,0015)	0,0013
Pegelanstieg	0,0410 (0,0105)	0,0001
L _{AFmax}	0,0291 (0,0060)	<0.0001
Alter	0,0132 (0,0069)	0,0539
Geschlecht	0,0311 (0,1440)	0,8290
DauerVor	-0,0334 (0,0047)	<0.0001
DauerVor ²	0,0003 (0,0001)	<0.0001
Stadium 3	-1,0578 (0,3169)	0,0008
Stadium 4	-0,3927 (0,4036)	0,3310
REM-Schlaf	0,1638 (0,0888)	0,0651

Tabelle 9: Regressionkoeffizienten und p-Werte eines multivariablen logistischen Regressionsmodells mit Zufallseffekt. Geschlecht: männlich=1; DauerVor = Schlafzeit im jeweiligen Schlafstadium bei Einsetzen des Lärmereignisses.

Regressionskoeffizienten > 0 bedeuten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Wechsels nach S1 oder Wach mit Zunahme des Wertes der Variablen steigt, Regressionskoeffizienten < 0 bedeuten entsprechend, dass die Wahrscheinlichkeit eines Wechsels nach S1 oder Wach mit Zunahme des Wertes der Variablen fällt. Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen Männern und Frauen in der Reaktion auf Schienenverkehrslärm. Die Aufwachwahrscheinlichkeit steigt jedoch signifikant mit dem Alter. Die Aufwachwahrscheinlichkeiten aus den Schlafstadien wurden im Vergleich zu Stadium 2 berechnet. Sie ist niedriger aus den Stadien S3 und S4, jedoch leicht erhöht im REM-Schlaf.

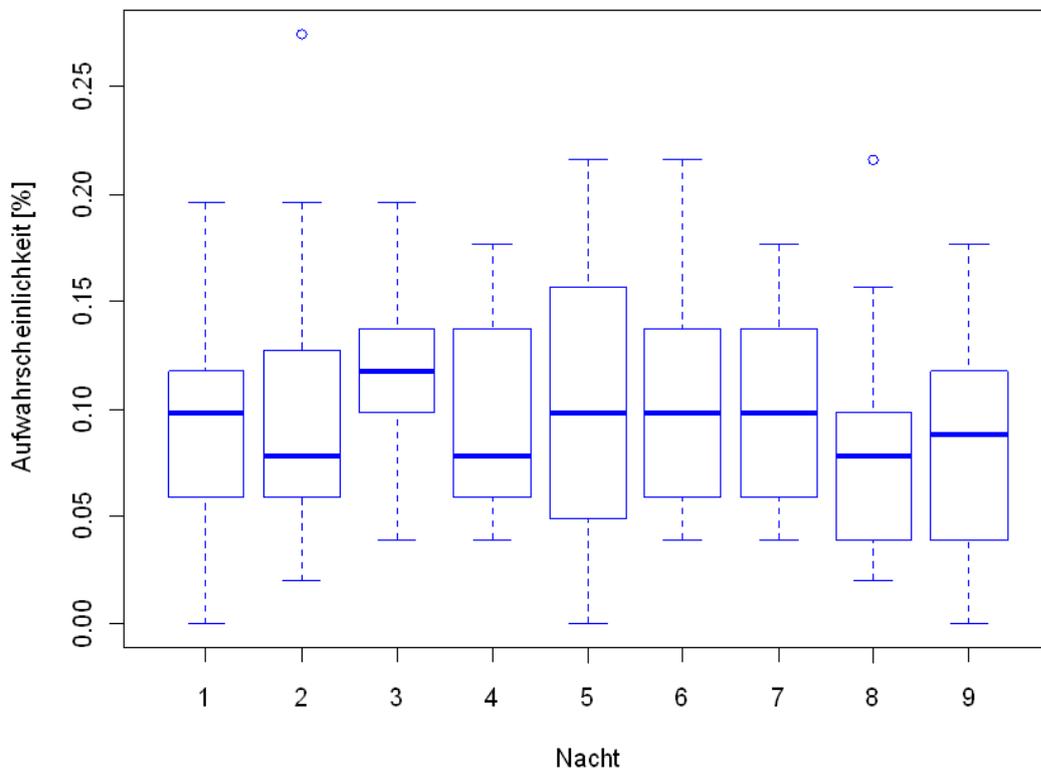


Abbildung 16: Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Aufwachreaktion (AWR) bzw. eines Schlafstadienwechsels in das Stadium S1 in Bezug zu den Studiennächten.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Aufwachreaktion bzw. für den Wechsel eines Schlafstadiums in S1 im Studienverlauf ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Aufwachreak-

tion ist insgesamt sehr gering, am höchsten jedoch in der 3. Studiennacht, in der bei im Vergleich zur Nacht 5 eher kurzer Schlafzeit ein hohes Aufkommen an Güterzügen herrschte.

Abbildung 17 bildet die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Aufwachreaktion oder den Wechsel des Schlafstadiums in das Stadium S1 für Schienenverkehrslärm in Abhängigkeit vom L_{AFmax} des Lärmereignisses ab. Die Abbildung wurde für die Referenzkategorien Stadium S2, Männer und die mittlere verstrichene Schlafzeit, die mittlere Geräuschkdauer, den mittleren Pegelanstieg und das mittlere geräuschfreie Intervall der untersuchten Stichprobe berechnet. Sie beruht auf 8.133 ungestörten Geräuschen.

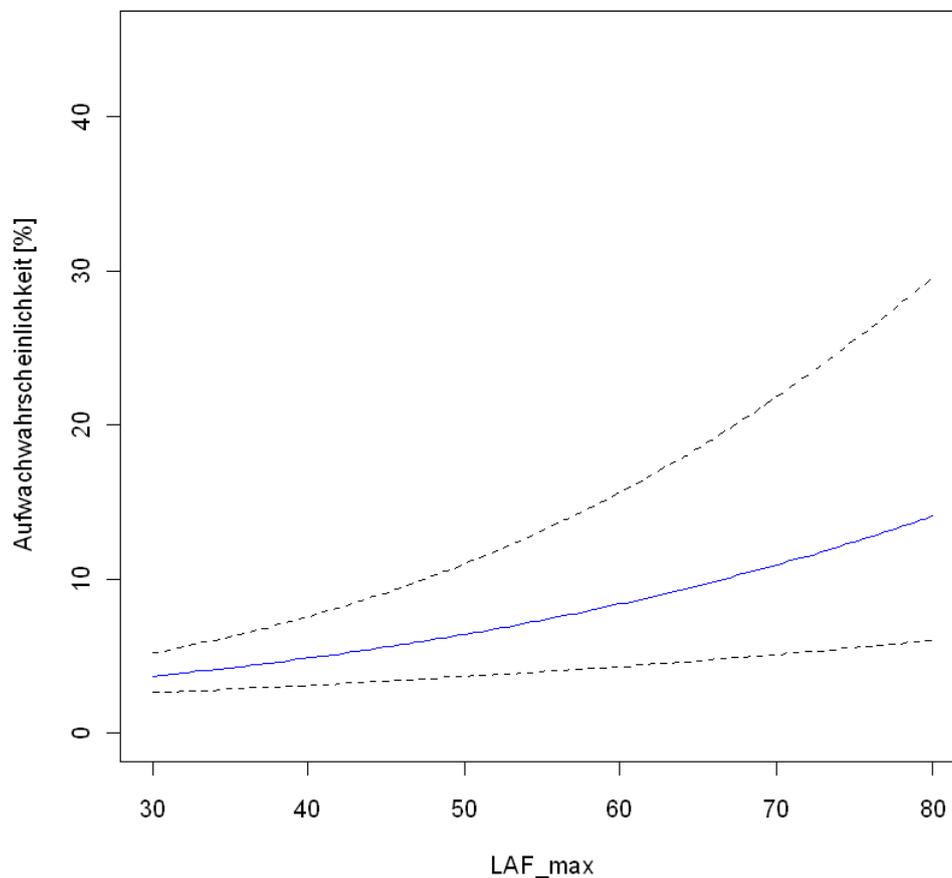


Abbildung 17: Dosis-Wirkungskurve mit 95% Konfidenzintervall für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Aufwachreaktion bzw. eines Schlafstadienwechsels in das Stadium S1 durch Bahnlärm in Abhängigkeit vom L_{AFmax} des Lärmereignisses basierend auf einem multivariablen logistischen Model mit Zufallseffekt, welches 8.133 ungestörte Geräusche berücksichtigt.

4.4 Diskussion

Grundsätzlich haben der Wochenverlauf in vorliegender Feldstudie und insbesondere die verlängerte Schlafzeit am Wochenende einen ganz entscheidenden Einfluss auf das Schlafverhalten der Probanden. In der Nacht von Freitag auf Samstag, in der die höchste Anzahl an Lärmereignissen in die Schlafzeit fällt, sind somit keine Auswirkung auf die Schlafzeit, aber auch nicht auf die Schlaflatenzzeiten nachweisbar. Ebenso sind Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen den akustischen Parametern und deren Auswirkung auf die Schlaflatenzen nicht signifikant. Hypothese 1 wird dementsprechend abgelehnt.

Die ereigniskorrelierte Auswertung, basierend auf einem multivariablen logistischen Regressionsmodell, zeigt, dass Schienenverkehrslärm die Aufwachwahrscheinlichkeit signifikant erhöht. Einen signifikanten Einfluss hat dabei die Schnelle des Pegelanstiegs des Geräuschs und der L_{AFmax} bzw. die Emergenz des Geräuschs. Wenn das Geräusch zu Beginn keine Aufwachreaktion hervorgerufen hat, so sinkt mit weiterer Geräuschdauer die Wahrscheinlichkeit für ein Erwachen. Im Vergleich zum leichten Schlafstadium S2 ist die Aufwachwahrscheinlichkeit aus dem Tiefschlaf erwartungsgemäß erniedrigt, aus dem REM-Schlaf jedoch erhöht. Dies entspricht der Reihenfolge der Aufwachwahrscheinlichkeit, wie sie auch in der Feldstudie zu Fluglärm gefunden wurde [Basner et al., 2004]. Hypothese 2 kann angenommen werden.

Die Wahrscheinlichkeit für Aufwachreaktionen durch Schienenverkehrslärm ist zwar insgesamt nur gering, jedoch signifikant erhöht. Aufgrund der hohen inter-individuellen Variabilität in der Empfindlichkeit für verkehrslärmbedingte Schlafstörungen und aufgrund der eingeschränkten Repräsentativität der Stichprobe ist jedoch nicht auszuschließen, dass in nicht untersuchten Teilpopulationen der Bevölkerung stärkere Wirkungen beobachtet werden können.

5 Kognitive Leistung

Eva-Maria Elmenhorst

5.1 Einleitung

Bisherige Untersuchungen zu nächtlichem Verkehrslärm zeigen meist nur geringe oder sogar keine Wirkungen auf die Leistung am folgenden Tag. Da die Leistung stark von dem Schlaf und insbesondere von der Schlafdauer abhängt, gestaltet sich die Bewertung der Leistung in Feldstudien meist schwierig, da sich hier die uneinheitlichen Schlafzeiten unter den Probanden und auch innerhalb eines Probanden im Wochenverlauf stark ausprägen.

Marks & Griefahn [2007] berichten kleine, aber signifikante Effekte in der Reaktionszeit als Antwort auf nächtlichen Verkehrslärm. Ebenso wiesen Elmenhorst et al. [2010] signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen für nächtlichen Fluglärm und Reaktionszeiten nach. Einige Untersuchungen zeigen im Gegensatz dazu keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Verkehrslärm und Leistung [Griefahn et al., 2000; Marks & Griefahn, 2005; Schapkin et al., 2006]. In diesem Kontext stellen Breimhorst et al. [2009] die Hypothese auf, dass es durch nächtlichen Verkehrslärm zu kleinen, z.T. sogar nicht nachweisbaren Verschlechterungen in der Leistung kommt. Versuchspersonen könnten aber in der Lage sein, die Leistungseinbußen durch vermehrte Anstrengung zu kompensieren.

In vorliegendem Experiment wurden die Auswirkungen nächtlichen Schienenverkehrslärms auf die Leistung in einem Reaktionszeittest in einer Feldstudie untersucht.

5.2 Hypothesen

- 1) Schienenverkehrslärm führt zu Veränderungen in der Reaktionszeit im SRT.
- 2) Schienenverkehrslärm führt zu Änderungen in der Auftretenswahrscheinlichkeit von Fehlreaktionen (Lapses).

5.3 Methodik

5.3.1 Reaktionszeitaufgabe, SRT

Die Tests zur Messung der Reaktionszeit wurden 2x täglich - morgens und abends - computergestützt durchgeführt. Die einzelnen Testabschnitte waren implementiert auf der Testsoftware ERTS (experimental run time system) der Firma Berisoft.

Alle Versuchspersonen wurden persönlich durch einen Betreuer mit dem Test vertraut gemacht, zum einen durch mündliche Erläuterung, zum anderen durch Vorführen der Aufgabe. Die Probanden wurden angehalten, alle Aufgaben immer möglichst gut und mit gleicher Anstrengung zu bearbeiten, um den Einfluss der Motivation auf die Testleistung gering zu halten.

Auf einem dunklen Bildschirmhintergrund wird der Versuchsperson eine in weißen Zahlen von 0 ms hoch zählende Stoppuhr als Stimulus präsentiert (Abbildung 18). Sobald diese von dem Probanden wahrgenommen wird, soll mittels Tastendruck reagiert werden. Die gemessene Reaktionszeit wird noch 3 Sekunden angezeigt, bis der Monitor wieder dunkel wird. Das Zeitintervall zwischen den Signalen ist unregelmäßig (1,5 bis 10 s). Die Dauer des Tests beträgt 10 Minuten. Es ist davon auszugehen, dass anfänglich motivierende Faktoren, die z.B. die Auswirkungen von Schläfrigkeit verdecken könnten, durch die Monotonie und Dauer der Aufgabe enttarnt werden. Geprüft werden insbesondere Aufmerksamkeit und Vigilanz. Antwort-

zeiten, die mehr als 500 ms benötigen, werden als Spätreaktion angesehen – so genannte Lapses [Dinges & Powell, 1985].

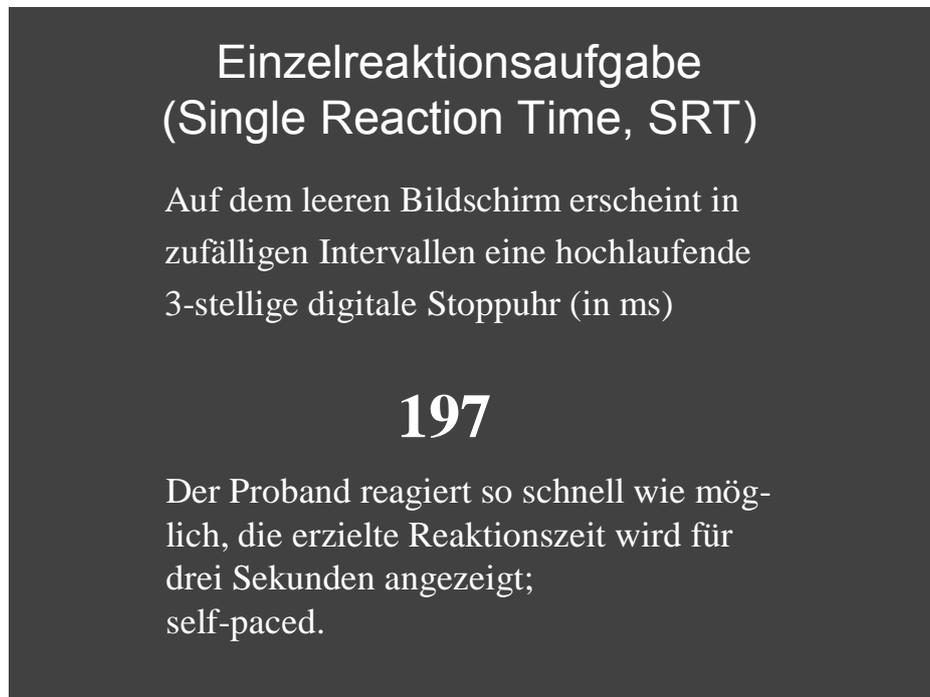


Abbildung 18: Bildschirm mit hochlaufenden Ziffern (Einzelreaktionsaufgabe - SRT).

Berechnet wurden je Sitzung:

- Mittelwert der Reaktionszeiten (SRT MW)
- Anzahl der Lapses (≥ 500 ms) (SRT LAP)

Reaktionszeiten, die 130 ms oder weniger betragen, sind am ehesten auf Fehlreaktionen ohne Stimulus zurückzuführen und wurden bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

5.3.2 Statistik

Die erste Studiennacht diente zur Adaptation an die Messinstrumente und die Untersuchungssituation und wurde nicht in die Auswertung einbezogen. Sie ist jedoch zur Information in den Abbildungen enthalten.

Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Reaktionszeiten wurden mittels gemischter Modelle mit Zufallseffekten in SAS (Version 9.2) berechnet.

Effekte wurden als zufällig angesehen, da die untersuchte Stichprobe aus einer größeren Anzahl von möglichen Probanden gezogen wurde. Da ein Proband wiederholt im Studienverlauf betrachtet wurde, sind die Daten nicht unabhängig.

Lapses im SRT traten jedoch so selten auf, dass für deren Analyse eine logistische Regression mit Zufallseffekten durchgeführt wurde. Das Fehlen von Lapses wurde mit 0 bewertet, das Auftreten von mindestens einem Laps mit 1.

Das Signifikanzniveau wurde mit $\alpha < 0.05$ angenommen.

5.4 Ergebnisse

Die Bewertung der Leistung in einer Feldstudie ist schwierig, da die Leistung durch eine Vielzahl von Faktoren variiert wird. Zum einen war, über eine Kern-Bettzeit von 6 Stunden hinaus, die Schlafzeit nicht standardisiert, was besonders in den Nächten von Freitag auf Samstag und von Samstag auf Sonntag zu wesentlich längeren Schlafzeiten führte. In diesen Nächten wird eine Verbesserung der Reaktionszeiten sichtbar (Abbildung 19). Die Verbesserung in Abhängigkeit der SPT über die gesamte Studie betrachtet beträgt 0,03 ms ($\pm 0,02$ SF)/pro Minute SPT in der mittleren Reaktionszeit am Morgen ($p=0.0352$). Der deutlich erhöhte Verkehrsfluss in der Nacht von Freitag auf Samstag (Nacht 5) durch steigende Zahl an Personenzügen und hohen Zahlen an Güterzügen kann diesem Effekt nicht entgegenwirken. Zum anderen zeigt sich eine Verschlechterung der Reaktionszeiten im Studienverlauf, der ebenfalls nicht durch den Verkehrslärm erklärbar ist und am ehesten für einen Motivationsverlust der Probanden spricht (Abbildung 19).

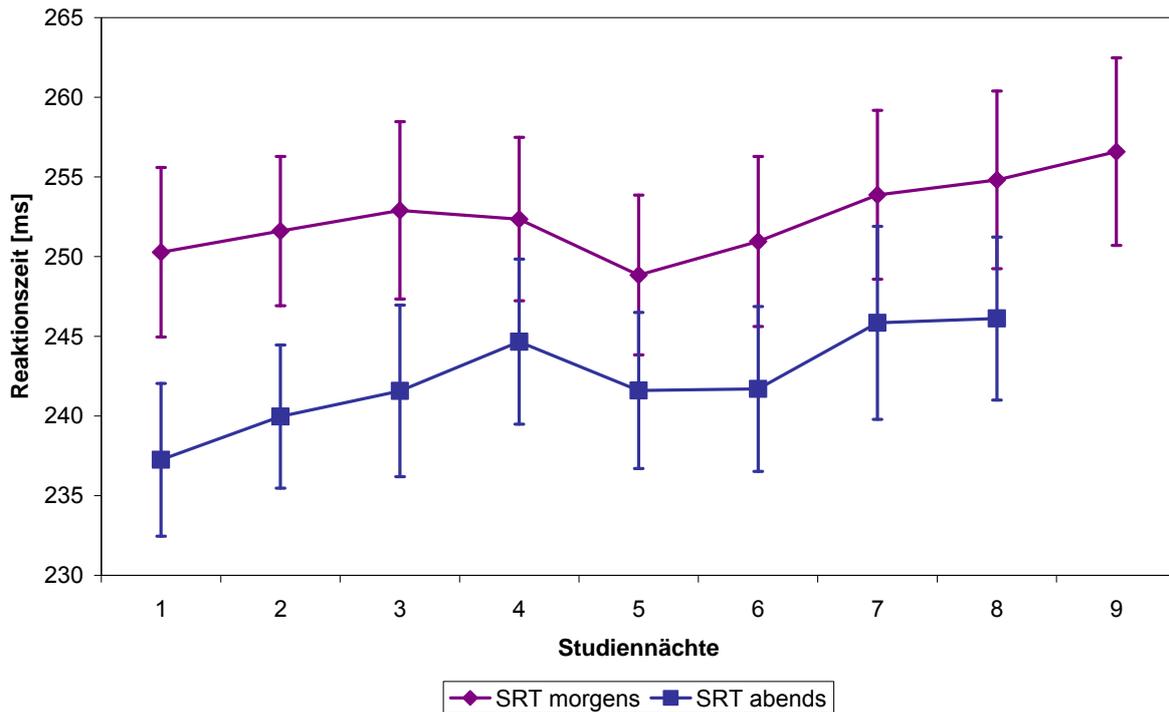


Abbildung 19: Mittlere Reaktionszeit im SRT am Morgen und am Abend im Studienverlauf. Die dargestellten Leistungen entsprechen den Messwerten nach den jeweiligen Nächten.

Tabelle 10 und Tabelle 11 geben einen Überblick über die Ergebnisse der Regressionsanalysen der mittleren Reaktionszeiten im SRT am Morgen und am Abend im Zusammenhang mit den akustischen Parametern, dem Alter und Geschlecht der Probanden und Parametern des Studienverlaufs. Es ist kein signifikanter Einfluss der untersuchten akustischen Parameter auf die mittlere Reaktionszeit nachweisbar. Die Probanden verschlechtern sich jedoch signifikant von Tag zu Tag im Studienverlauf. Ebenfalls signifikant wirkt sich das erste lange Ausschlafen nach der Arbeitswoche auf die Reaktionszeit jedoch nur am Morgen aus. Die Probanden erreichen hier um 5,6 ms ($\pm 1,9$ ms) bessere Reaktionszeiten.

SRT morgens	Schätzer	Standard- fehler	DF	t-Wert	p-Wert
Intercept	256.42	10.5412	32	24.33	<.0001
L_{Aeq}	-0.1034	0.2525	219	-0.41	0.6826
Intercept	254.13	5.4503	32	46.63	<.0001
Anzahl Züge	-0.02619	0.03159	227	-0.83	0.4079
Intercept	253.69	5.3108	32	47.77	<.0001
Dauer Züge	-0.00033	0.000434	227	-0.75	0.4511
Intercept	248.54	5.2697	32	47.16	<.0001
Nacht	0.6969	0.2702	227	2.58	0.0105
Intercept	253.06	5.0622	32	49.99	<.0001
Freitag	-5.5596	1.8864	227	-2.95	0.0035
Intercept	254.01	6.2658	31	40.54	<.0001
Geschlecht	-4.8669	10.8515	228	-0.45	0.6542
Intercept	208.02	17.5633	31	11.84	<.0001
Alter	1.2201	0.4658	228	2.62	0.0094

Tabelle 10: Ergebnisse der Mixed Model Regression mit random Intercept für die mittleren Reaktionszeiten im SRT am Morgen. Die Variable Nacht repräsentiert die Leistung im Studienverlauf. Die Variable Freitag ist eine Indikatorvariable für die Nacht von Freitag auf Samstag. Geschlecht: männlich=1, weiblich=0.

SRT abends	Schätzer	Standard- fehler	DF	t-Wert	p-Wert
Intercept	255.16	10.6456	32	23.97	<.0001
L_{Aeq}	-0.3381	0.2598	186	-1.30	0.1947
Intercept	244.81	5.3618	32	45.66	<.0001
Anzahl Züge	-0.03205	0.03350	194	-0.96	0.3398
Intercept	244.72	5.1907	32	47.15	<.0001
Dauer Züge	-0.00052	0.000451	194	-1.14	0.2553
Intercept	238.11	5.1907	32	45.87	<.0001
Nacht	0.9193	0.3302	194	2.78	0.0059
Intercept	243.09	4.9273	32	49.33	<.0001
Freitag	-2.6097	1.9400	194	-1.35	0.1801
Intercept	246.67	5.9957	31	41.14	<.0001
Geschlecht	-11.8443	10.3831	195	-1.14	0.2554
Intercept	196.06	16.7797	31	11.68	<.0001
Alter	1.2834	0.4450	195	2.88	0.0044

Tabelle 11: Ergebnisse der Mixed Model Regression mit random Intercept für die mittleren Reaktionszeiten im SRT am Abend. Die Variable Nacht repräsentiert die Leistung im Studienverlauf. Die Variable Freitag ist eine Indikatorvariable für die Nacht von Freitag auf Samstag. Geschlecht: männlich=1, weiblich=0.

Tabelle 12 und Tabelle 13 geben einen entsprechenden Überblick über die Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen für die Lapses im SRT am Morgen und am Abend. Es sind auch hier keine statistisch signifikanten Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen den untersuchten akustischen Parametern und der Leistung nachweisbar. Im Studienverlauf gesehen verbessern sich die Lapses in der Testsitzung am Morgen knapp signifikant, wohingegen die abendliche Leistungsmessung keine signifikante Veränderung erkennen lässt.

Lapses morgens	Schätzer	Standardfehler	DF	t-Wert	p-Wert
Intercept	-0.9322	1.6518	32	-0.56	0.5765
L_{Aeq}	0.000761	0.04439	32	0.02	0.9864
Intercept	-0.4609	0.5780	32	-0.80	0.4312
Anzahl Züge	-0.00743	0.007227	32	-1.03	0.3115
Intercept	-0.6808	0.5061	32	-1.35	0.1880
Dauer Züge	-0.00007	0.000097	32	-0.71	0.4822
Intercept	-0.1695	0.5090	32	-0.33	0.7413
Nacht	-0.1457	0.07152	32	-2.04	0.0499
Intercept	-0.9255	0.3439	32	-2.69	0.0112
Freitag	-0.2260	0.4942	32	-0.46	0.6505
Intercept	-0.9115	0.4166	32	-2.19	0.0361
Geschlecht	-0.1164	0.7051	32	-0.17	0.8699
Intercept	-4.1637	1.2730	32	-3.27	0.0026
Alter	0.08857	0.03347	32	2.65	0.0125

Tabelle 12: Ergebnisse der Mixed Model logistischen Regression mit random Intercept für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von mindestens einem Lapse im SRT am Morgen. Die Variable Nacht repräsentiert die Leistung im Studienverlauf. Die Variable Freitag ist eine Indikatorvariable für die Nacht von Freitag auf Samstag. Geschlecht: männlich=1, weiblich=0.

Lapses abends	Schätzer	Standardfehler	DF	t-Wert	p-Wert
Intercept	-3.5051	1.9574	32	-1.79	0.0828
L_{Aeq}	0.03315	0.05147	32	0.64	0.5241
Intercept	-1.5603	0.7216	32	-2.16	0.0382
Anzahl Züge	-0.01092	0.009163	32	-1.19	0.2423
Intercept	-1.9954	0.6502	32	-3.07	0.0044
Dauer Züge	-0.00007	0.000121	32	-0.58	0.5659
Intercept	-2.8803	0.7319	32	-3.94	0.0004
Nacht	0.1144	0.1041	32	1.10	0.2797
Intercept	-2.2963	0.4643	32	-4.95	<.0001
Freitag	0.1116	0.5798	32	0.19	0.8486
Intercept	-2.0867	0.5046	32	-4.14	0.0002
Geschlecht	-0.6288	0.8435	32	-0.75	0.4614
Intercept	-5.2869	1.2513	32	-4.23	0.0002
Alter	0.08637	0.03060	32	2.82	0.0081

Tabelle 13: Ergebnisse der Mixed Model logistischen Regression mit random Intercept für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von mindestens einem Lapse im SRT am Morgen. Die Variable Nacht repräsentiert die Leistung im Studienverlauf. Die Variable Freitag ist eine Indikatorvariable für die Nacht von Freitag auf Samstag. Geschlecht: männlich=1, weiblich=0.

In der untersuchten Probandenpopulation hat das Geschlecht keinen Einfluss auf die Reaktionszeiten und die Lapses. Mit dem Alter zeigt sich jedoch eine signifikante Verschlechterung in beiden Parametern, die auch weitgehend unabhängig von dem Tageszeitpunkt der Messung zu sein scheint.

5.5 Diskussion

In der vorliegenden Feldstudie zur Wirkung nächtlichen Schienenverkehrslärms auf die Leistung des folgenden Tages konnten keine signifikanten Auswirkungen des Lärms nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die mittleren Reaktionszeiten als auch für die Lapses im SRT am Morgen und am Abend. Hypothese 1 und 2 können nicht angenommen werden.

Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu Feldstudien zu nächtlichem Fluglärm, die mit demselben Reaktionszeittest durchgeführt wurden und bei der signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem nächtlichen LAeq und der mittleren Reaktionszeit am folgenden Morgen nachweisbar waren [Elmenhorst et al., 2010]. Sie könnten jedoch die Ergebnisse unserer Laborstudie bestätigen, in der der Einfluss von Flug-, Straßen-, und Schienenverkehrslärm im Vergleich u.a. auf die Leistung untersucht wurde [Basner et al. 2010, in press]. Hier wurde eine signifikante Verschlechterung der Reaktionszeiten nur unter Fluglärm beobachtet, während nach Straßen- und Schienenverkehrslärm keine Effekte nachweisbar waren. Erfahrungsgemäß sind in einer Feldstudie geringere Effekte zu erwarten als in einer Laborumgebung, was mit einer gewissen Gewöhnung an den eigenen Lärm in der häuslichen Umgebung erklärt wird [Horne et al., 1994; Fidell et al., 1995; Pearsons et al., 1995].

6 Metaanalyse Laborstudien

Vinzent Rolny, Mathias Basner

6.1 Einleitung

Ziel der Metaanalyse ist der Vergleich, die Zusammenführung und gemeinsame Analyse von Daten aus drei großen Laborstudien, welche sich mit der Wirkung von Verkehrslärm auf den Schlaf beschäftigten. Dabei handelte es sich um zwei Studien der Abteilung Flugphysiologie im Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., die im Rahmen des DLR/HGF Projekts „Leiser Flugverkehr (Arbeitspaket 1: Wirkung nächtlichen Fluglärms auf den Menschen (STRAIN))“ [Basner et al., 2004] und „Leiser Flugverkehr II (Arbeitspaket 1: Wirkung nächtlichen Verkehrslärms auf den Menschen (AIRORA))“ durchgeführt wurden [Basner et al., 2008], und um eine Studie des Leibniz-Instituts für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo) im Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ [Griefahn et al., 2007]. Bei den Studien wurden Geräusche aller drei Hauptverkehrsträger Bahn, Straße und Flugzeug in die Untersuchung mit einbezogen, wobei in der STRAIN-Studie nur Flugzeuggeräusche untersucht wurden.

Die Metaanalyse ermöglicht es, die Effekte von Verkehrslärm auf den Schlaf auf Grundlage einer breiten Datenbasis abzuschätzen und die Verkehrsträger hinsichtlich ihres Ausmaßes in der störenden Wirkung auf den Schlaf zu vergleichen.

Durch die Vereinigung der Daten lässt sich sowohl die Anzahl der untersuchten Probanden erhöhen, als auch die Anzahl der Lärmereignisse, deren Wirkung untersucht wird. Angesichts der großen Variabilität zwischen den Geräuschen und der unterschiedlichen Lärmempfindlichkeit der Probanden im Schlaf, kann somit die ökologische Validität deutlich erhöht werden. Eine Unterscheidung von Personen- und Güterzügen im Schienenverkehr ist anhand der vorliegenden Datensätze nicht möglich.

6.2 Methodik

6.2.1 Erhebung der Daten

Bei den Studien, die in die Metaanalyse eingeschlossen wurden, handelt sich jeweils um Laborstudien. Alle Messungen wurden somit in einer kontrollierten Umgebung in speziell ausgestatteten Schlaflaboren vorgenommen. In der STRAIN-Studie wurden 112 Probanden, in der AIRORA-Studie 72 und in der IfADo-Studie 52 Probanden untersucht. Insgesamt liegen der Metaanalyse also Datensätze von 237 Versuchspersonen zugrunde. Die in den Untersuchungen verwendeten Geräusche der Verkehrsträger wurden im Vorfeld mit Klasse I - Schallpegelmessern aufgezeichnet und in der Versuchsumgebung als Stimulus abgespielt. In der STRAIN-Studie wurden 16 Geräusche, in der AIRORA-Studie 120 Geräusche und in der IfADo-Studie 628 Geräusche aufgezeichnet. Um die Wirkung jedes einzelnen Geräusches und spezieller Geräuschemuster auf die Studienpopulation zu testen und anhand einer ausreichenden Datenbasis bewerten zu können, wurden die Geräusche wiederholt dargeboten und die Anzahl der Geräusch war begrenzt (siehe Tabelle 14).

Der Schlaf wurde polysomnographisch aufgezeichnet und nach [Rechtschaffen & Kales, 1968] ausgewertet. Es wurde untersucht, ob das Abspielen eines Geräusches zu einer Aufwachreaktion innerhalb von 90 Sekunden nach dem Start des Geräusches führt. Die Intervalllänge von 90 Sekunden wurde gewählt, weil hier die Differenz von lärminduzierten Aufwachreaktionen zu spontanen Aufwachreaktionen maximal ist. Als Aufwachreaktion wurde ein Wechsel in das Schlafstadium S1 oder Wach definiert. Da der unmittelbare Effekt eines Lärmereignisses betrachtet wird, spricht man hierbei von einer ereigniskorrelierten Auswertung. Hierdurch lassen sich wesentlich präzisere Dosis-Wirkungsbeziehungen ableiten als es mit einer Betrachtung des Schlafes über die ganze Nacht möglich wäre.

6.2.2 Auswertung und Statistik

Bevor die Daten zusammengefasst werden können, muss untersucht werden, ob diese überhaupt einheitliche und zu den anderen Studien konsistente Ergebnisse liefern. Auch wenn aufgrund unterschiedlicher Probanden, Laborumgebungen und Geräusche sicher keine exakte Übereinstimmung der Effekte zu erwartet ist, muss zumindest sichergestellt werden, dass keine übermäßigen Abweichungen vorherrschen, bzw. die Ursachen für solche bestimmbar sein.

	STRAIN	AIRORA	IfADo	Gesamt
Straße	-	9.908	25.739	35.647
Schiene	-	10.014	17.666	27.680
Flug	25.479	9.741	11.289	46.509
Gesamt	25.479	29.663	54.694	109.836

Tabelle 14: Anzahl der eingespielten Lärmereignisse getrennt nach Verkehrsträger und Studie.

Um dies zu gewährleisten, werden die Daten aus den Studien zuerst getrennt von einander deskriptiv (Abschnitt 6.3.1) und inferenz-statistisch (Abschnitt 6.3.2) ausgewertet. Erst im Abschnitt 6.3.3 folgt dann die Analyse der Daten.

In Tabelle 14 ist die Anzahl der auswertbaren Lärmereignisse getrennt nach Studie und Verkehrsträger dargestellt. Geräusche wurden dann ausgewertet, wenn diese ungestört waren (z.B. frei von Schnarchen). Zu beachten ist, dass es sich hierbei nicht immer um jeweils originäre Geräusche handelt. Insgesamt wurden 764 Geräusche aufgezeichnet, die wiederholt dargeboten wurden, um eine ausreichende Datenbasis für die Auswertung zu gewährleisten. Die Anzahl der auswertbaren Lärmereignisse der Studien STRAIN und AIRORA sind ungefähr gleich, während von der IfADo-Studie beinahe doppelt so viele Lärmereignisse zur Auswertung zur Verfügung

stehen. Die Studie IfADo besitzt somit mehr Gewicht bei einer gemeinsamen Analyse. Auf der anderen Seite stehen jedoch für jedes Untersuchungszentrum beinahe gleich viele Lärmereignisse zur Verfügung, so dass hier die Gewichtung ausgeglichen ist.

Als Regressionsmodell wird ein generalisiertes gemischtes Modell mit einem Random Intercept verwendet [Diggle et al., 2002]. Aufgrund der beobachteten, abhängigen Variable Aufwachreaktion ja/nein wird eine Binomialverteilung angenommen. Die gewählte Linkfunktion ist dementsprechend die Logitfunktion. Der Random Intercept ist aufgrund der Messwiederholungen nötig und ermöglicht es, für jeden Probanden eine eigene Basisaufwachswahrscheinlichkeit zu modellieren. Alle Berechnungen wurden mit dem Statistikprogrammpaket R (Version 2.9.2) durchgeführt. Die gemischten Modelle wurden mit dem Paket glmmML (Version 0.81) berechnet.

6.3 Statistische Analyse

6.3.1 Deskriptiver Vergleich der Datensätze

In Abbildung 20 bis Abbildung 22 sind die Aufwachwahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Geräusche in Abhängigkeit des Maximalpegels deskriptiv für die Studien AIRORA und IfADo dargestellt. Hierfür wurden alle auswertbaren Wiederholungen jedes originären Geräusches zusammengefasst und die relative Häufigkeit einer Aufwachreaktion ermittelt. Diese wird hier in Abhängigkeit vom Maximalpegel des Geräusches dargestellt. Wie man in den Abbildungen erkennen kann, ist der Zusammenhang der relativen Aufwachhäufigkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel in den zwei Studien AIRORA und IfADo sehr ähnlich.

Hingegen liegen bei den Daten der STRAIN-Studie bei gleichem Maximalpegel weit höhere Aufwachwahrscheinlichkeiten vor (siehe Abbildung 22).

Wie später auch in den Regressionsanalysen gezeigt werden kann, liegt das zum großen Teil an der Tatsache, dass in der STRAIN-Studie pro Untersuchungsnacht weniger Geräusche eingespielt wurden als in den anderen Studien. Dadurch steigt die Aufwachwahrscheinlichkeit pro Geräusch wesentlich an. Für weitere Erläuterungen sei auf die Interpretation der Regressionsmodelle verwiesen (Abschnitt 6.3.2).

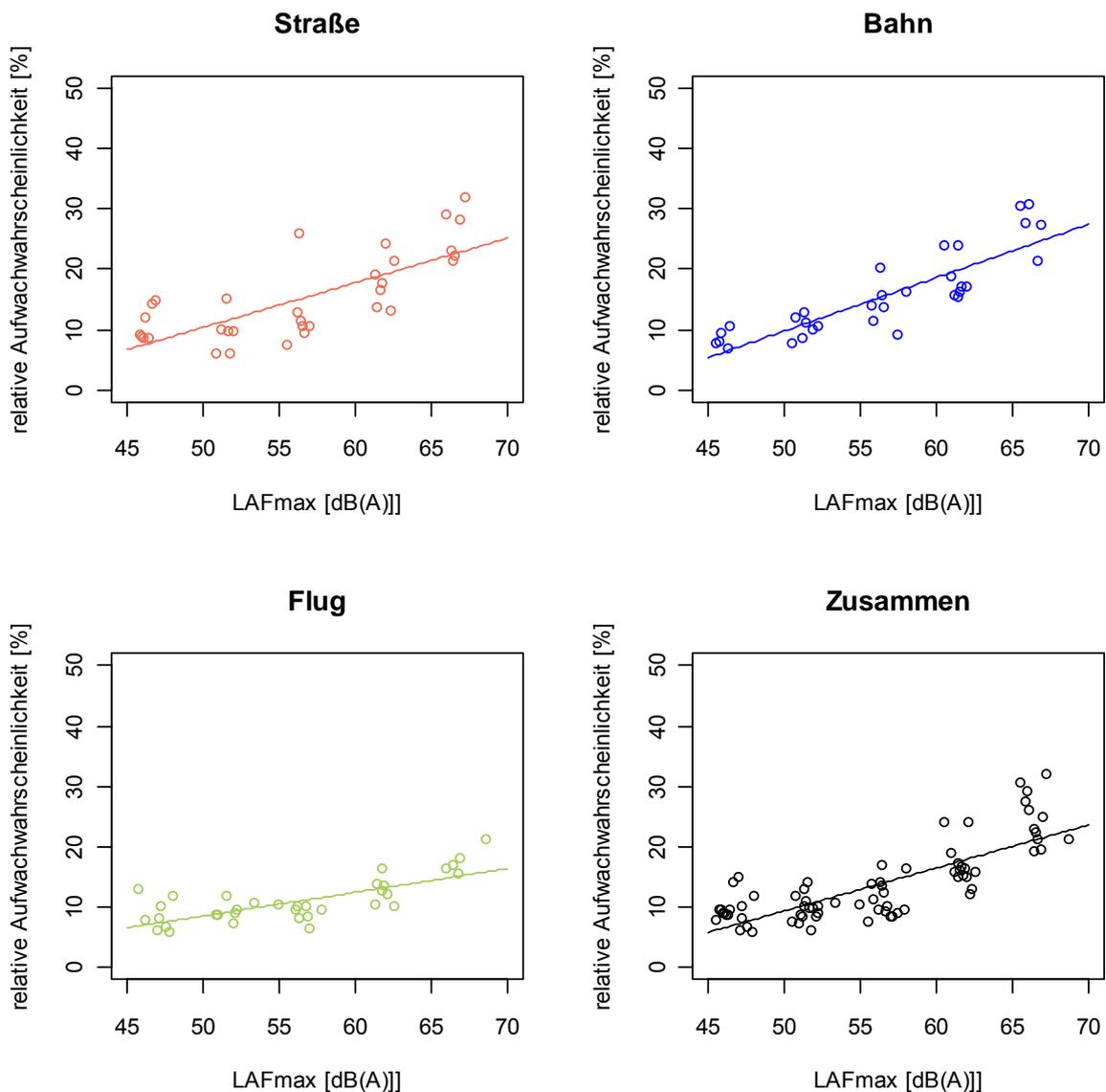


Abbildung 20: Relative Aufwachwahrscheinlichkeit und lineare Regressionsgerade auf Grundlage der Daten aus der AIRORA-Studie. Jeder Punkt entspricht einem originärem Geräusch; auf der Y-Achse ist die über die Wiederholungen und Probanden gemittelte Aufwachwahrscheinlichkeit angetragen.

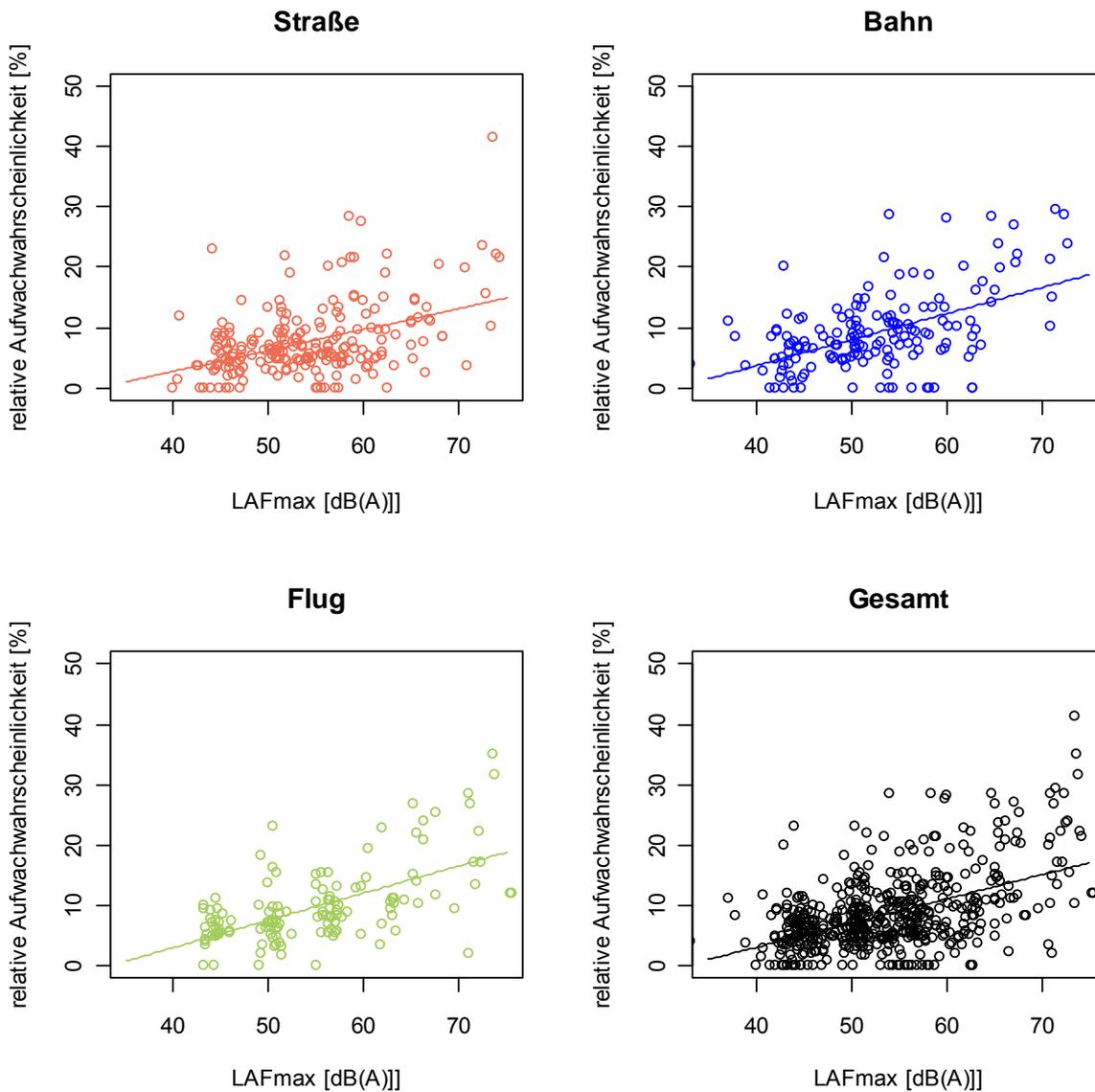


Abbildung 21: Relative Aufwachwahrscheinlichkeit und lineare Regressionsgerade auf Grundlage der Daten aus der IfADo-Studie. Jeder Punkt entspricht einem originärem Geräusch; auf der Y-Achse ist die über die Wiederholungen und Probanden gemittelte Aufwachwahrscheinlichkeit angetragen.

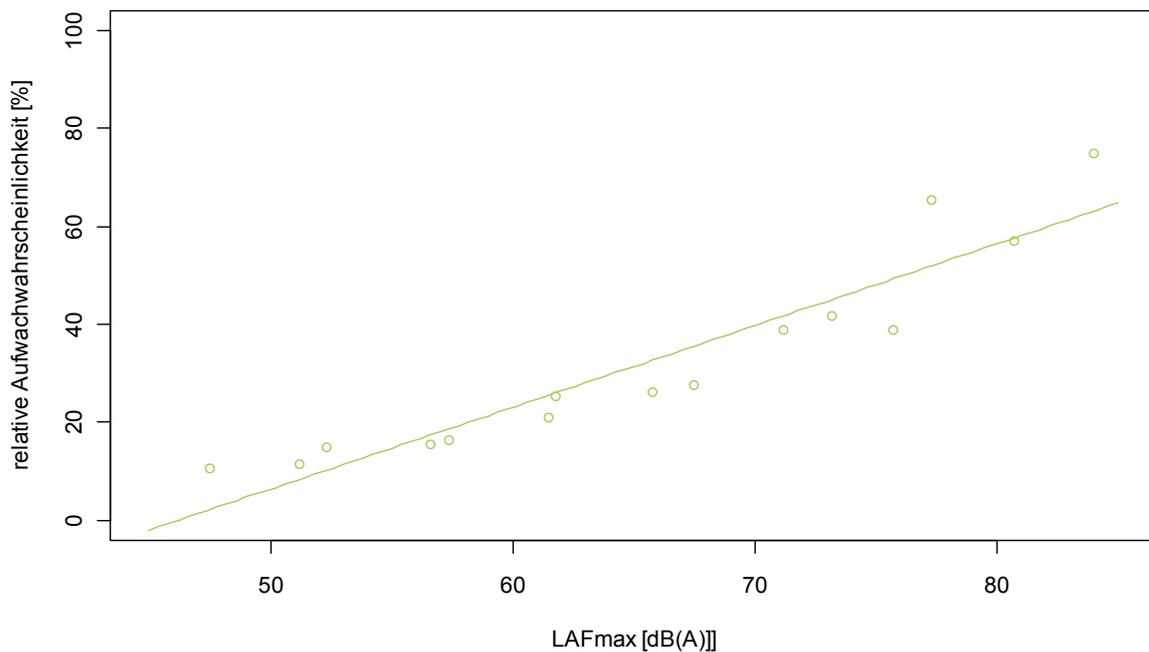


Abbildung 22: Relative Aufwachwahrscheinlichkeit und lineare Regressionsgerade auf Grundlage der Daten aus der STRAIN-Studie. Jeder Punkt entspricht einem originärem Geräusch; auf der Y-Achse ist die über die Wiederholungen und Probanden gemittelte Aufwachwahrscheinlichkeit angetragen. In der STRAIN-Studie wurden nur Flugzeuggeräusche untersucht.

6.3.2 Inferenz-statistischer Vergleich der Datensätze

Im ersten Schritt der Regressionsanalyse wurde für jede Studie bzw. für den entsprechenden Datensatz getrennt das optimale Modell ermittelt. Auf diese Weise können Unterschiede, welche sich auf die Regressionsmodelle auswirken können, aufgedeckt werden. Für die Wahl der Einflussvariablen wird eine Stepwise-Selection [Fahrmeir et al., 2007] verwendet. Das bedeutet, dass ein Algorithmus ausgeführt wird, der von einem Startmodell (in diesem Fall das Intercept-Modell) in jedem Schritt eine Variable hinzufügt oder eine entfernt. Alle dabei möglichen Modelle werden berechnet und das Beste anhand der AICs (Akaike Information Criterion) [Pinheiro et al.,

2009] ausgewählt. Mit diesem Modell als neuem Startmodell kehrt man zu dem vorhergehenden Schritt zurück. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis keine Verbesserung - im Sinne des AICs - mehr erreicht werden kann. Dieses Vorgehen wurde auf alle drei Datensätze getrennt angewendet. Mit diesem Modell als neuem Startmodell kehrt man zu dem vorhergehenden Schritt zurück. Diese Prozedur wird so lange wiederholt bis keine Verbesserung - im Sinne des AICs - mehr erreicht werden kann. Dieses Vorgehen wurde auf alle drei Datensätze getrennt angewendet.

Um anschließend die Koeffizienten der Regressionsmodelle vergleichbar zu machen, ist es notwendig, ein gemeinsames Modell aufzustellen. Da sich die durch die Modellselektionen gewonnenen Modelle in den akustischen Variablen und den nicht-akustischen Einflussvariablen zu großen Teilen überschneiden, ist dies ohne Weiteres möglich. Für das gemeinsame Modell wurden alle Variablen, die in mindestens zwei der drei Modellen vorkamen, ausgewählt. Diese sind der Maximalpegel des Geräusches (L_{AFmax}), Anstiegssteilheit des Geräusches in dB(A)/s (*Anstieg*), Schlafstadium bei Beginn des Geräusches (*StadVor*), Verkehrsträger als Indikatorvariable mit den Ausprägungen Schiene, Straße und Flug (*Typ*), Länge des lärmfreien Intervalls vor Beginn des Geräusches (*IntMin*), Zeit, in der sich der Proband bereits im aktuellen Schlafstadium befindet (*DauerVor*), Zeitpunkt des Geräusches (*TimeGer*) und laufende Nummer des Geräusches pro Nacht (*NumGer*). Zu diesem Modell wurde noch eine Variable hinzugefügt, die die gesamte Anzahl der Geräusche pro Nacht wiedergibt (*GerNacht*). Dies ist nötig, weil in den verschiedenen Studien unterschiedlich viele Geräusche pro Nacht eingespielt wurden. Da aber die Aufwachwahrscheinlichkeit stark von der Anzahl der Geräusche pro Nacht abhängt, muss für diese Variable adjustiert werden. Je weniger Geräusche in einer Nacht eingespielt werden, desto höher ist die Aufwachwahrscheinlichkeit für ein einzelnes Lärmereignis. Die erhöhte Aufwachwahrscheinlichkeit kann mit zwei möglichen Effekten erklärt werden. Es wäre möglich, dass nach einer Aufwachreaktion der Schlafdruck steigt. Die Aufwachwahrscheinlichkeit für die nachfolgenden

Geräusche sinkt folglich. Des Weiteren kann man vermuten, dass es im Lauf einer Nacht zu einem Gewöhnungsprozess kommt, da die Geräusche zum Teil als bekannt und vom Gehirn als nicht bedrohlich eingestuft werden. Analog zur Aufnahme der Variable *GerNacht* wurde auch noch ein Interaktionsterm zwischen dem Parameter L_{AFmax} und *NumGer* hinzugefügt. Auch ein Interaktionsterm zwischen L_{AFmax} und *Typ* wurde hinzugefügt. Der letztere ermöglicht es, Unterschiede in der Wirkung des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Geräuschquelle zu betrachten. Auf das automatisierte Testen von Interaktionseffekten anhand des AICs wurde aufgrund der Tendenz zum Overfitting verzichtet.

In Tabelle 15 sind die Koeffizienten der drei getrennten Modelle aufgeführt. Die meisten Koeffizienten liegen sehr nahe beieinander. Bei dem Vergleich der Modelle liegt besonderes Augenmerk auf den akustischen Variablen (L_{AFmax} , Anstieg), da diese den Einfluss der Geräusche auf die Aufwachwahrscheinlichkeit beschreiben. Insgesamt haben die Geräusche in der IfADo-Studie einen etwas geringeren Einfluss auf den Schlaf. Das kann zum einen an der Auswahl der Geräusche, zum anderen an der unterschiedlichen Laborumgebung liegen. Auch kann es in zufälligen Stichprobeneffekten begründet sein. Trotzdem liegen die entsprechenden Koeffizienten noch nahe genug beieinander, um einen Vergleich zu ermöglichen. Insbesondere der sehr ähnliche Abstand der drei Verkehrsträger zueinander spricht für eine hohe Konsistenz der Daten. So zeigt sich, dass Fluglärm bei gleichem Maximalpegel weniger wahrscheinlich zu einer Aufwachreaktion führt als Schienen- und Straßenlärm. Der Koeffizient fällt bei Schienen- und Straßenlärm etwa 50% höher aus als bei Fluglärm.

	STRAIN		IfADo		AIRORA	
	Koef	p-Wert	Koef	p-Wert	Koef	p-Wert
Intercept	-6,3850	0,000	-8,1111	0,000	-7,7395	0,000
Interaktion: L _{AFmax} (Straße)	X	X	0,0196	0,002	0,0203	0,001
Interaktion: L _{AFmax} (Schiene)	X	X	0,0173	0,007	0,0260	0,000
L _{AFmax} (Flug)	0,0473	0,000	0,0312	0,000	0,0421	0,000
Interaktion: Anstieg (Straße)	X	X	-0,2958	0,000	-0,0126	0,417
Interaktion: Anstieg (Schiene)	X	X	-0,2272	0,001	-0,0292	0,065
Anstieg (Flug)	0,0241	0,001	0,2545	0,000	0,0331	0,001
Schiene	X	X	-0,6031	0,054	-0,7669	0,041
Flug	X	X	-0,3934	0,213	-0,9380	0,013
Tiefschlaf	-0,8414	0,000	-0,3752	0,000	-0,7607	0,000
REM	-0,4813	0,000	0,0292	0,407	-0,2957	0,000
IntMin	0,0075	0,000	0,0077	0,000	0,0120	0,020
DauerVor	-0,0108	0,000	-0,0022	0,034	-0,0147	0,000
TimeGer	0,0014	0,000	0,0019	0,000	0,0020	0,000
NumGer	0,0239	0,000	-0,0013	0,543	-0,0022	0,710
GerNacht	-0,0041	0,000	0,0024	0,001	-0,0002	0,870
L _{AFmax} *NumGer	-0,0005	0,000	-0,000036	0,305	-0,0001	0,575

Tabelle 15: Koeffizienten und p-Werte der generalisierten gemischten Modell für die getrennt gerechneten Daten aus STRAIN, IfADo und AIRORA.

Die Koeffizienten für den Pegelanstieg liegen bei der STRAIN- und AIRORA-Studie ebenfalls sehr nahe aneinander, während die Koeffizienten bei der IfADo-Studie deutlich abweichen. So ist der Koeffizient des Pegelanstiegs für Fluglärm bei der IfADo-Studie deutlich größer als bei den STRAIN- und AIRORA-Studien. Für Straßen- und Schienenverkehrslärm wiederum liegen die Koeffizienten des Pegelanstiegs bei der IfADo-Studie um Null, während bei der AIRORA-Studie noch ein signifikanter Effekt vorhanden ist. Dies ist wahrscheinlich auf die unterschiedliche Geräuschauswahl zurückzuführen. So korreliert bei der IfADo-Studie der Maximalpegel L_{AFmax} mit dem Pegelanstieg mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,67. Da sich die Wirkung von L_{AFmax} und Pegelanstieg gegenseitig verstärkt, führt das dazu, dass dieser Interaktionseffekt zum Teil auf den Koeffizienten des Pegelanstiegs gelegt wird. Dies könnte zwar durch weitere Interaktionsterme abgefangen werden, würde aber das bereits komplexe Modell weiter verkomplizieren und die Interpretation weiter erschweren. Die Unterschiede in der Geräuschauswahl sprechen auch in keiner Weise gegen eine Zusammenführung der Daten, da gerade ein Ziel der Metaanalyse ist, die Basis der zur Verfügung stehenden Geräusche zu erweitern.

Besonders hervorzuheben ist, dass sich in den drei Studien die Effekte von Straßen-, Zug- und Fluglärm relativ zueinander gleich verhalten. So besitzt der Parameter von L_{AFmax} für den Fluglärm jeweils den kleinsten Koeffizienten und impliziert damit auch die geringste Aufwachwahrscheinlichkeit bei gleichem Maximalpegel und bei gleich bleibenden sonstigen Parametern. Die Koeffizienten von Straßen- und Schienenverkehrslärm liegen um ca. 50 Prozent höher als der von Fluglärm. Betrachtet man die Unterschiede zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm, ist die Reihenfolge zwischen der AIRORA- und IfADo-Studie zwar unterschiedlich, jedoch liegen die Koeffizienten für den Straßen- und Schienenverkehrslärm so nahe zusammen, dass hier grundsätzlich nicht von einem signifikanten Unterschied zwischen den Effekten dieser beiden Verkehrsträger gesprochen werden kann. Ob dieser Unterschied signifikant ist, kann aus der Auswertung nicht direkt ab-

gelesen werden. Aus mathematisch-statistischen Gründen ist jeweils immer nur der Unterschied zu einer Referenzkategorie modellierbar. Dies entspricht dem Interaktionsterm zwischen L_{AFmax} und Pegel. In diesem Fall ist die Referenzkategorie der Fluglärm. Für den Straßen- und Schienenverkehrslärm wird dann jeweils der Unterschied zu dem Koeffizienten von L_{AFmax} für Fluglärm berechnet. Der p-Wert gibt dann an, ob dieser Unterschied statistisch signifikant ist. Das heißt, um den Koeffizienten für die Einflussvariable L_{AFmax} für Schienenverkehrslärm zu erhalten, muss der Koeffizient, welcher für Schienenverkehrslärm angegeben ist, zu dem von Fluglärm addiert werden.

Trotz der erwähnten und einiger weiterer Unterschiede in den Koeffizienten, überwiegt doch die Einheitlichkeit der Daten in den entscheidenden Punkten. So sind insbesondere die Schätzungen der Auswirkungen des Maximalpegels auf die Aufwachwahrscheinlichkeit gut miteinander vergleichbar. Des Weiteren ermöglicht nur eine gewisse Diversität in den Daten neue Erkenntnisse und ist deshalb in einem gewissen Maße auch wünschenswert. Würden alle Studien exakt die gleichen Ergebnisse mit sich bringen, so könnte der weitere Schritt – die gemeinsame Analyse der Daten – entfallen.

6.3.3 Gepoolte Datensätze

Nachdem sichergestellt wurde, dass sich die Daten vergleichen lassen, sollen diese im Folgenden zu einem Datensatz zusammengefügt werden. Anhand dieses erweiterten Datensatzes wird dann ein neues Modell berechnet, welches Aufschluss über die gemittelten Effekte geben soll. Da auf eventuell neue Effekte, die sich durch das Zusammenführen der Daten ergeben können, Rücksicht genommen werden soll, wird ein komplett neues Modell gebildet. Auch dient das der Kontrolle der Plausibilität der bisherigen Ergebnisse.

So sollte sich das neu gebildete Modell in den entscheidenden Parametern nicht wesentlich von den bereits betrachteten Modellen unterscheiden. Zur Bildung des neuen Modells wurde wieder eine AIC gestützte Stepwise-Selection als automatisches Modellselektionsverfahren verwendet.

In Tabelle 16 sind die Koeffizienten des selektierten Regressionsmodells zu finden. Dem Modell wurden wie im vorhergehenden Abschnitt manuell die Variable *GerNacht* und die Interaktionsterme zwischen *NumGer* und L_{AFmax} , sowie zwischen der Indikatorvariable für den Geräuschtyp und L_{AFmax} hinzugefügt. Es lässt sich erkennen, dass trotz der Unterschiede in den drei Studien die Interaktionsvariablen für die Studien mit L_{AFmax} nicht mehr signifikant sind. Es lässt sich daraus schließen, dass die Drittvariablen hier einen großen Teil der Unterschiede in den Studien aufklären können. Insbesondere gilt das für die Variablen *NumGer* und *GerNacht*. Der Koeffizient des Effekts für das Alter ist positiv, was bedeutet, dass mit steigendem Alter die Aufwachwahrscheinlichkeit steigt. Allerdings ist dieser Effekt nicht signifikant. Man erkennt weiterhin, dass im Schlafstadium 2 (Referenzkategorie) die höchste Aufwachwahrscheinlichkeit zu erwarten ist, gefolgt vom REM Schlaf und mit der niedrigsten Aufwachwahrscheinlichkeit in den Tiefschlafstadien. Der positiv geschätzte Koeffizient für die Variable *IntMin* bedeutet, dass mit der Dauer einer lärmfreien Epoche die Aufwachwahrscheinlichkeit für ein ihr folgendes Geräusch steigt. Der negative Koeffizient für den Effekt der Variable *DauerVor* lässt den Schluss zu, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit desto stärker sinkt, je länger das gleiche Schlafstadium bereits vorherrscht. Die Variable *DauerGer* spiegelt die Dauer des abgespielten Geräusches wider. Wie aus dem Koeffizienten erkennbar ist, steigt mit der Länge des Geräusches die Aufwachwahrscheinlichkeit tendenziell leicht an. Dieser Effekt ist allerdings statistisch nicht signifikant.

Besonderes interessant ist mit Bezug auf das Kapitel 7 der Interaktionsterm der Indikatorvariable für Flugzeuglärm mit L_{AFmax} . Dessen Koeffizient ist signifikant und negativ, was bedeutet, dass die durch Fluglärm induzierte Aufwachwahrscheinlichkeit kleiner ist als die durch Bahn- und Straßenlärm.

	Koeffizient	Standardfehler	z-Wert	p-Wert
(Intercept)	-5,5220	0,2584	-21,3718	0,0000
L_{AFmax}	0,0635	0,0038	16,8712	0,0000
Interaktion: L_{AFmax} (Schiene)	0,0001	0,0037	0,0151	0,9880
Interaktion: L_{AFmax} (Flugzeug)	-0,0138	0,0040	-3,4148	0,0006
Pegelanstieg	0,0161	0,0043	3,7408	0,0002
Dauer Geräusch	0,0009	0,0009	1,0081	0,3130
Schiene	0,0752	0,2133	0,3525	0,7240
Flugzeug	0,5769	0,2358	2,4463	0,0144
Alter	0,0013	0,0029	0,4633	0,6430
Schlafstadium 3	-0,6396	0,0399	-16,0430	0,0000
Schlafstadium 4	-0,6927	0,0531	-13,0569	0,0000
REM	-0,2155	0,0227	-9,4883	0,0000
IntMin	0,0095	0,0007	13,2362	0,0000
DauerVor	-0,0085	0,0007	-12,1586	0,0000
Schlafzeit	0,0007	0,0001	10,7798	0,0000
Nummer Geräusch	0,0011	0,0018	0,6227	0,5330
Anzahl Geräusche pro Nacht	-0,0025	0,0004	-6,2782	0,0000
IfADo-Studie	0,4164	0,2514	1,6561	0,0977
STRAIN-Studie	-0,1331	0,2711	-0,4910	0,6230
Interaktion: L_{AFmax} und Nummer Geräusch	-0,0001	0,0000	-1,8752	0,0608
Interaktion: L_{AFmax} (IfADo- Studie)	-0,0070	0,0040	-1,7509	0,0800
Interaktion: L_{AFmax} (STRAIN-Studie)	0,0074	0,0044	1,6779	0,0934

Tabelle 16: Koeffizienten des Regressionmodells für die zusammengefassten Daten

Sehr gut erkennen lässt sich dies auch in Abbildung 23. Das dort dargestellte Dosis-Wirkungs-Diagramm wurde anhand des in Tabelle 16 vorgestellten Regressionmodells berechnet. Die Kurve für den Fluglärm liegt deutlich unter den beiden anderen Kurven. Bei einem Maximalpegel von 70 dB(A) liegt die Aufwachwahrscheinlichkeit für Fluglärm um mehr als 7 Prozentpunkte unter der für Bahlärm.

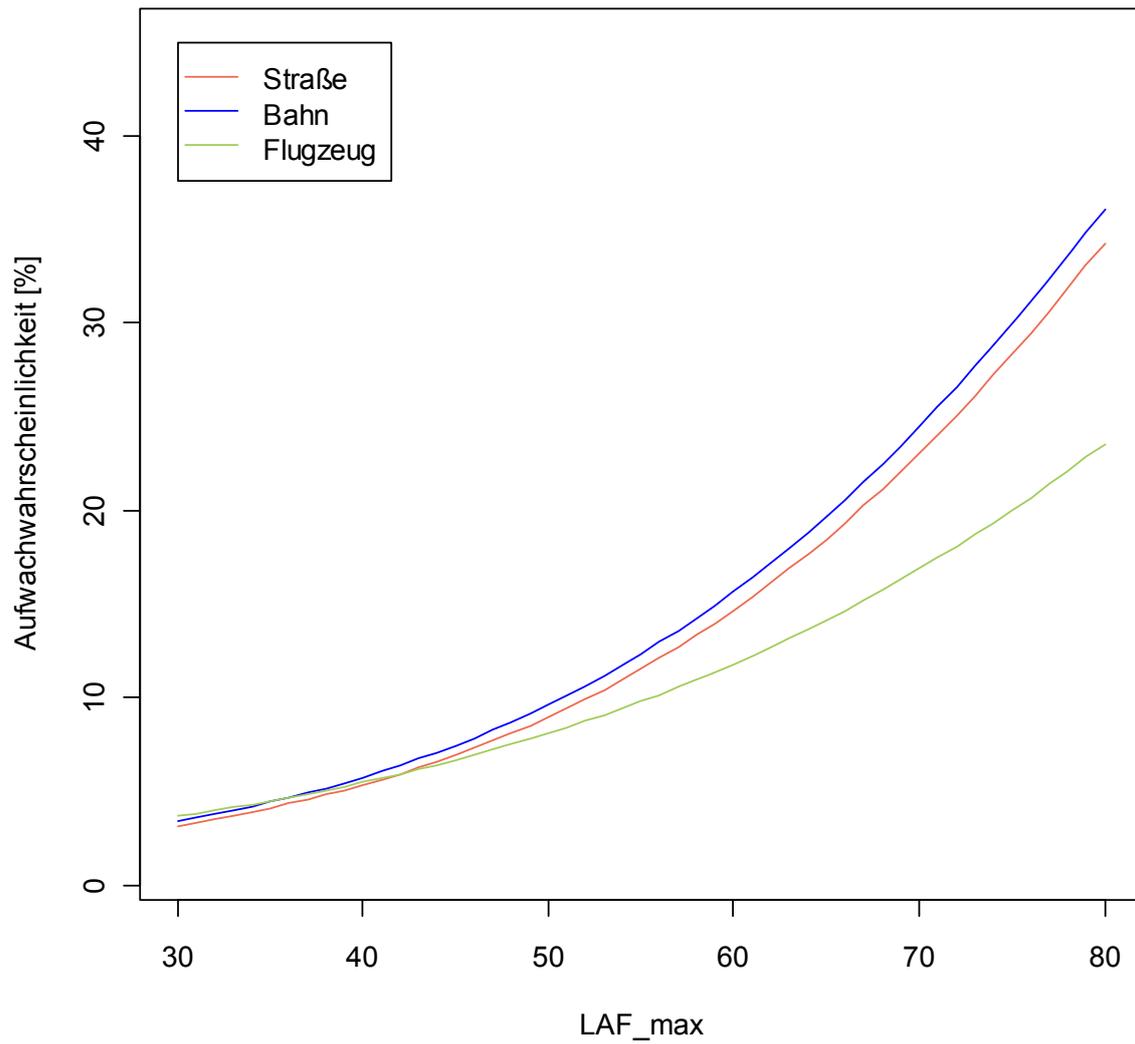


Abbildung 23: Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von L_{AFmax} . Andere Einflussvariablen: Pegelanstieg 5,8 [dB(A)/s] (median); Schlafstadium: 2; StadVor: 10 [Epochen] (median); Schlafzeit: 601 [Epochen]; IntMin: 3,14 [min] (median); DauerGer: 20 [s] (median), GerNacht: 128 (median); NumGer: 55 (median).

6.4 Diskussion

Die Ergebnisse der drei Studien erweisen sich als untereinander konsistent und unter Kontrolle der entsprechenden Drittvariablen gut miteinander vergleichbar. Dies spricht stark für die Verlässlichkeit der erhobenen Daten. Es zeigt auch, dass der oft bemängelte Punkt der relativ kleinen Stichprobengrößen keine übergeordnete Rolle spielt.

Des Weiteren ergibt die Analyse der zusammengeführten Daten eine deutlich höhere Aufwachwahrscheinlichkeit für Straßen- und Bahnlärm im Gegensatz zu Fluglärm. Dabei muss natürlich beachtet werden, dass es sich hierbei um Laborstudien handelt, in denen die Geräusche im Vorfeld aufgenommen und ausgewählt wurden. Dieser Prozess ist kritisch für einen Vergleich der drei Verkehrsträger, da er großen Einfluss auf die Abschätzung der Effekte auf den Schlaf hat und sich immer die Frage nach der Repräsentativität der Geräusche stellt. Diese Frage ist kaum zu beantworten, und der praktikable Weg ist, eine möglichst große Stichprobe an Geräuschen zu ziehen. Genau dies kann mit der Zusammenführung der Daten erreicht werden. Deshalb ist davon auszugehen, dass die hier gefundenen Ergebnisse robust sind. Weiterhin ist zu beachten, dass die Aufwachwahrscheinlichkeiten in Laborstudien immer etwas höher sind, als in Feldstudien [Horne et al. 1994, Fidell et al. 1995, Pearsons et al. 1995]. Der Vergleich der Verkehrsträger untereinander sollte davon aber nicht betroffen sein.

7 Vergleich der Schlafdaten aus den Feldstudien zu Bahn- und Fluglärm

Vinzent Rolny, Mathias Basner

7.1 Einleitung

Dieses Kapitel verwendet, ähnlich wie das vorhergehende Kapitel, Daten aus zwei verschiedenen Studien. Im Unterschied zu dem vorhergehenden Kapitel werden aber Feldstudien­daten aus den DLR-Studien im Projekt RAPS und STRAIN miteinander verglichen. Bei den Daten aus der RAPS-Studie handelt es sich um die gleichen ereigniskorrelierten Daten, welche bereits in Kapitel 4 vorgestellt und analysiert wurden. Auch werden die gleichen statistischen Methoden verwendet. Da aber in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf dem Vergleich zu den Daten aus der STRAIN-Feldstudie liegt, werden sich die vorgestellten Modelle zu denen aus Kapitel 4 unterscheiden, da zum Teil andere Einflussvariablen ausgewählt werden. So wird zum Beispiel für die Quantifizierung des maximalen Schalldruckpegels nicht der L_{AFmax} sondern der L_{ASmax} verwendet. Dies ist dadurch begründet, dass für die Messung von Fluglärm typischerweise der L_{ASmax} verwendet wird. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse und Modelle aus diesem Kapitel mit Kapitel 4 ist deshalb nur leicht eingeschränkt möglich. Zum Unterschied von L_{AFmax} und L_{ASmax} siehe auch Abbildung 6 in Kapitel 3.

Das Ziel ist, Aufschluss über eventuelle Unterschiede in der Auswirkung der zwei verschiedenen Lärmtypen (Flugzeug und Schienenverkehr) auf den Schlaf zu erhalten. Insbesondere in Abhängigkeit des L_{ASmax} sollen hier Unterschiede in der Störung des Schlafs untersucht werden. Aber auch der Pegelanstieg des Geräusches wird in seinem Einfluss untersucht. Dies ist hinsichtlich der Diskussion des 5 dB(A) - Schienenbonus von besonderem Interesse. So existieren Studien, die nahelegen, dass der Schienenbonus hinsichtlich der Belästigung in den Abendstunden nicht gerechtfertigt ist

[Schreckenberget al., 2010]. Auch Ergebnisse aus Laborstudien, die die Störung des Schlafs durch Lärm der verschiedenen Verkehrsträger vergleichen, legen nahe, dass nächtlicher Bahnlärm, vorwiegend verursacht durch Güterzüge, eine gravierendere Störung des Schlafes auslöst als Fluglärm. Insofern drängt sich auch die Frage auf, ob der Schienenbonus hinsichtlich der Auswirkungen auf den Schlaf gerechtfertigt ist. Dies soll hier noch mal gesondert durch den Vergleich von zwei Feldstudien untersucht werden, die über eine hohe ökologische Validität verfügen.

7.2 Methodik

Die in diesem Kapitel verwendete Herangehensweise zur Datenanalyse entspricht weitestgehend der aus dem vorhergehenden Kapitel. Zur Berechnung der Modelle wurde ebenfalls ein gemischtes logistisches Modell mit Random Intercept verwendet [Diggle et al., 2002]. Die Auswahl der Variablen erfolgte über eine AIC [Pinheiro et al., 2009] orientierte, automatische Variablenselektion (siehe hierfür auch Abschnitt 6.2.2). Für die Variablenselektion wurden die Daten aus der RAPS-Studie und der STRAIN-Studie zu einem Datensatz zusammengeführt. Mit diesem Datensatz wurde dann eine Variablenselektion durchgeführt. Die Zusammenführung zu einem Datensatz ist nötig, um bessere inferenz-statistische Aussagen über eventuelle Unterschiede von Flug- und Bahngeräusche machen zu können. Unterschiede zwischen den Geräuschtypen wurden mit Interaktionseffekten untersucht.

Alle Berechnungen wurden mit dem Statistikprogrammpaket R (Version 2.9.2) durchgeführt. Die gemischten Modelle wurden mit dem Paket glmmML (Version 0.81) berechnet.

7.3 Ergebnisse

Dem automatisch selektierten Modell wurde noch ein Interaktionseffekt zwischen Maximalpegel und Art des Geräusches hinzugefügt. Getrennt wurde dabei zwischen Personen- und Güterzügen sowie Flugzeugen. Die Unterscheidung zwischen Güter- und Personenzügen ist nicht nur wegen der unterschiedlichen Geräuschcharakteristik sinnvoll, sondern auch wegen der unterschiedlichen zeitlichen Verteilung dieser zwei Verkehrsträger über den Tag bzw. die Nacht. So verkehren Personenzüge vor allem tagsüber, besonders zu den Hauptverkehrszeiten, während Güterzüge besonders nachts fahren. Dies wird auch anhand der Anzahl der auswertbaren Lärmereignisse deutlich. Als auswertbar werden Geräusche definiert, bei denen innerhalb von 60 Sekunden vor Beginn bis 90 Sekunden nach Beginn des Geräusches keine weiteren Geräusche auftraten, welche nicht vom untersuchten Verkehrsträger oder dem Probanden selbst stammen. Des Weiteren muss sich der Proband zu Beginn des Geräusches in Schlafstadium 2 oder einem tieferen Schlafstadium befinden. Es blieben 6.773 Güterzugvorbeifahrten und 2.132 Personenzugvorbeifahrten, welche ausgewertet wurden. Des Weiteren liegt die durchschnittliche Länge eines Güterzuges und damit die Dauer des verursachten Geräusches deutlich über der eines Personenzuges. Deshalb gebietet den Güterzügen eine besondere Beachtung bei der Untersuchung auf die Störung des Schlafs.

Im Folgenden werden zwei Modelle vorgestellt. Der Unterschied liegt in der Verwendung der akustischen Variable Pegelanstieg im zweiten Modell. Diese Variable beschreibt den Anstieg des Schalldruckmaximalpegels eines Geräusches in dB(A)/s. Die Unterscheidung in zwei Modelle erfolgt aus zwei Gründen. Zum ersten basieren viele Lärmschutzkonzepte nur auf dem Schalldruckpegel oder dem energieäquivalenten mittlerem Dauerschall- druckpegel. Um hier eine Vergleichbarkeit erreichen zu können, darf der Pegelanstieg nicht explizit mit ins Modell genommen werden, da für eine Vorhersage der Schlafstörung auch der Pegelanstieg festgelegt werden

muss. Dies ist insofern problematisch, da der durchschnittliche Pegelanstieg von der Geräuschquelle abhängt. Auch der Zusammenhang des Schalldruckmaximalpegels mit dem Pegelanstieg verhält sich bei den verschiedenen Geräuschquellen anders. So ist bei Fluglärm in der vorliegenden Stichprobe kein Zusammenhang zwischen Maximalpegel und Pegelanstieg zu erkennen (Korrelationskoeffizient: 0.045). Bei Bahnlärm ist hingegen ein deutlicher positiver Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel und Pegelanstieg zu erkennen (Korrelationskoeffizient: 0.398). Dies ist damit zu erklären, dass beim Schienenverkehr beide Größen stark von der Geschwindigkeit eines vorbeifahrenden Zuges abhängen. So erzeugt ein schnell fahrender Zug einen höheren Maximalpegel, wie auch einen höheren Pegelanstieg. Beim Flugzeug hingegen ist dieser Zusammenhang nicht gegeben. So fliegen große Frachtmaschinen relativ langsam (niedriger Pegelanstieg), verursachen aber ein Geräusch mit hohem Schalldruckmaximalpegel. Auf der anderen Seite fliegen kleine Businessjets relativ schnell (hoher Pegelanstieg), verursachen aber ein Geräusch mit eher niedrigem Schalldruckmaximalpegel.

7.3.1 Modell ohne Pegelanstieg

In Tabelle 17 sind die Koeffizienten des Modells ohne die Variable Pegelanstieg aufgeführt. Die Variable Schlafzeit gibt an, wie lange der Proband bereits schläft. Gezählt wird dabei ab dem Einschlafzeitpunkt (vier aufeinander folgende Epochen Schlafstadium 2 oder tiefer) in Epochen (30 Sekunden-Abschnitte). Wie der positive Koeffizient anzeigt, erhöht sich mit fortgeschrittener Schlafzeit die Aufwachwahrscheinlichkeit, was bedeutet, dass der Schlaf in den Morgenstunden besonders empfindlich für Lärmereignisse ist. Die zweite aufgeführte Variable spiegelt wider, wie lange sich ein Proband bei dem Auftreten eines Geräusches bereits in einem gleichen Schlafstadium befunden hat.

	coef	se(coef)	z	Pr(> z)
(Intercept)	-3,12806	0,24460	-12,78930	0,00000
L _{ASmax} (Flugzeug)	0,02197	0,00483	4,54840	0,00001
Interaktion: L _{ASmax} (Personenzug)	0,00710	0,01056	0,67200	0,50200
Interaktion: L _{ASmax} (Güterzug)	0,02027	0,00741	2,73630	0,00621
Personenzug	-0,41549	0,47730	-0,87040	0,38400
Güterzug	-1,03557	0,35880	-2,88640	0,00390
Hintergrundpegel	-0,00830	0,00724	-1,14640	0,25200
Schlafzeit	0,00078	0,00011	7,42010	0,00000
DauerVor	-0,02488	0,00316	-7,86280	0,00000
DauerVor ²	0,00025	0,00004	6,65530	0,00000
Schlafstadium 3	-0,69776	0,12600	-5,53890	0,00000
Schlafstadium 4	-0,44813	0,18490	-2,42330	0,01540
REM	0,26205	0,05416	4,83870	0,00000

Tabelle 17: Übersicht der logistischen, gemischten Regressionsanalyse mit Aufwachwahrscheinlichkeit als abhängige Variable.

Die Koeffizienten des linearen und quadratischen Terms sind so zu interpretieren, dass bei einem erst kürzlich erfolgten Wechsel in das aktuelle Schlafstadium die Aufwachwahrscheinlichkeit leicht erhöht ist. Diese nimmt dann mit längerem Verbleiben in dem Schlafstadium ab, um ab einem gewissen Punkt wieder anzusteigen. Die Koeffizienten für die Schlafstadien zeigen, dass der Schlaf im REM Schlaf am empfindlichsten ist, gefolgt von Schlafstadium 2 (Referenzkategorie). Die Variable *Hintergrund* gibt den Schalldruck der Hintergrundgeräusche in dB(A) an. Der negative Koeffizient bedeutet nicht, dass der Schlaf immer tiefer wird je höher der Hintergrundpegel ist, sondern hängt mit der Differenz zum Maximalpegel zusammen. So muss der maximale Pegel eines Geräusches einen gewissen Abstand zum Hintergrundpegel haben, um zu einer Aufwachreaktion führen zu können. Bei einem bestimmten Maximalpegel eines Geräusches sinkt also die Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Hintergrundgeräusch. Für die Variable *Hintergrund* wurde keine Interaktion bezüglich der Geräuschquelle aufgenommen. Zum einen, weil der Hintergrund unabhängig von dem

durch Züge oder Flugzeuge erzeugten Geräusch ist. Zum anderen sind auch Interaktionsterme zwischen Geräuschtyp und Hintergrund nicht signifikant. Auch die Modellanpassung verbesserte sich dadurch nicht.

Wie man erkennen kann, ist die Aufwachwahrscheinlichkeit bei einem durch Güterzüge verursachten Geräusch bei gleichem L_{ASmax} höher als bei einem durch Flugzeuge erzeugtem. Dabei muss bei der Interpretation des Parameters von L_{ASmax} darauf geachtet werden, dass es sich um sogenannte Interaktionsterme handelt. Das heißt, dass der Koeffizient für den Güterzuglärm sich als Summe aus dem geschätzten Parameter für Fluglärm und der geschätzten Differenz zu diesem ergibt. Konkret ergibt sich also der Koeffizient für Güterzuggeräusche aus 0,02197 und 0,02027 zu 0,04224.

In Abbildung 24 lassen sich die Unterschiede zwischen Fluglärm und insbesondere Lärm von Güterzügen sehr gut erkennen. So hebt sich die Kurve für Güterzuglärm ab 52 dB(A) deutlich von der für den Flugzeuglärm ab. Es ergibt sich beispielsweise bei 70 dB(A) eine um 7 Prozentpunkte höhere Aufwachwahrscheinlichkeit bei einem durch einen Güterzug erzeugtem Lärmereignis gegenüber einem durch ein Flugzeug erzeugtem.

Damit ist der Koeffizient doppelt so groß wie der des Fluglärms und es ergibt sich zusammen mit der negativen Differenz zum Intercept eine höhere Aufwachwahrscheinlichkeit für Güterzüge ab 52 dB(A). Zu beachten ist auch, dass dieser Unterschied hoch signifikant ist. Für Personenzüge ergibt sich zwar auch ein leicht erhöhter Koeffizient, aber der Unterschied ist relativ klein und auch nicht signifikant.

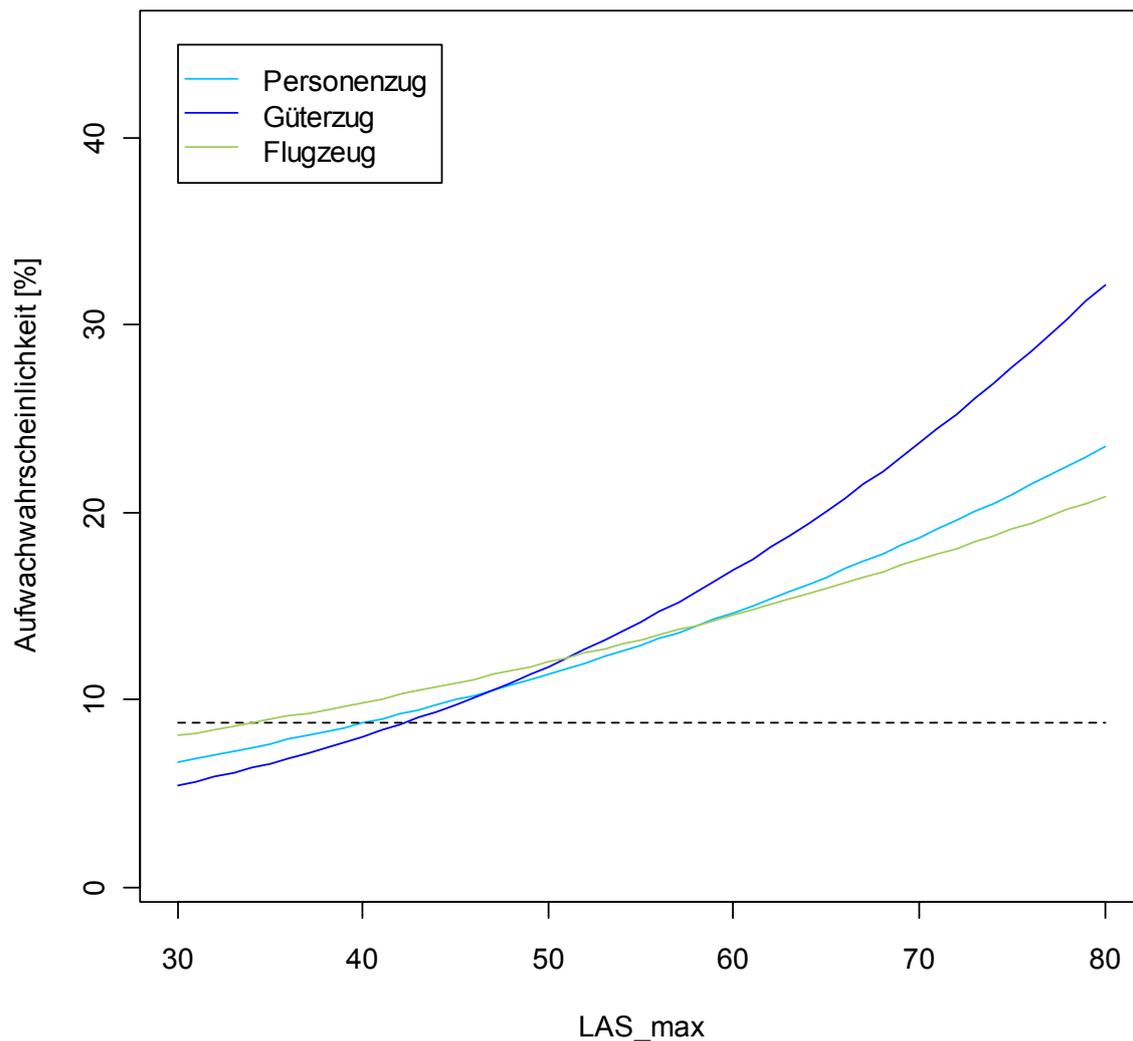


Abbildung 24: Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von LASmax. Andere Einflussvariablen: Schlafstadium: 2; StadVor: 11 [Epochen] (median); Schlafzeit: 601 [Epochen]; Hintergrund: 20.7 [dB(A)] (median). Die gestrichelte Linie gibt die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit an.

7.3.2 Modell mit Pegelanstieg

Im Folgenden wird das bereits vorgestellte Modell mit dem Pegelanstieg als weitere erklärende Variable erweitert. Dies trägt dazu bei, die Wirkungsmechanismen besser aufzuklären, welche bei geräuschinduzierten Aufwachreaktionen eine Rolle spielen. Dabei wird das Modell aber auch komplexer und schwieriger zu interpretieren. So ist bei einer Abbildung der Aufwach-

wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel eines Geräusches auch immer die Wahl des Pegelanstiegs für die Bildung einer Dosis-Wirkungs-Darstellung zu berücksichtigen. Das Gleiche gilt auch für die Interpretation der Koeffizienten. Diese sollten immer zusammen betrachtet werden.

	coef	se(coef)	z	Pr(> z)
(Intercept)	-3,25672	0,24590	-13,24610	0,00000
L _{ASmax} (Flugzeug)	0,01258	0,00494	2,54660	0,01090
Interaktion: L _{ASmax} (Personenzug)	-0,01069	0,01177	-0,90810	0,36400
Interaktion: L _{ASmax} (Güterzug)	0,01578	0,00779	2,02680	0,04270
Pegelanstieg (Flugzeug)	0,03895	0,00902	4,31940	0,00002
Interaktion: Pegelanstieg (Personenzug)	0,03050	0,02725	1,11930	0,26300
Interaktion: Pegelanstieg (Güterzug)	0,00704	0,01428	0,49290	0,62200
Personenzug	0,25918	0,50370	0,51450	0,60700
Güterzug	-0,83853	0,37160	-2,25630	0,02410
Hintergrundpegel	0,00540	0,00733	0,73650	0,46100
Schlafzeit	0,00073	0,00011	6,52050	0,00000
DauerVor	-0,02412	0,00336	-7,18690	0,00000
DauerVor^2	0,00025	0,00004	6,27210	0,00000
Schlafstadium 3	-0,69574	0,13300	-5,23250	0,00000
Schlafstadium 4	-0,56502	0,20960	-2,69620	0,00701
REM	0,29626	0,05722	5,17740	0,00000

Tabelle 18: Übersicht über die Ergebnisse der logistischen, gemischten Regressionsanalyse mit Aufwachwahrscheinlichkeit als abhängiger Variable und Pegelanstieg als zusätzlicher Einflussvariable

In Tabelle 18 sind die Koeffizienten des um die Variable Pegelanstieg erweiterten Modells dargestellt. Die Koeffizienten der nicht akustischen Einflussvariablen fallen sehr ähnlich wie im Abschnitt 7.3.1 aus und zur Interpretation der Koeffizienten sei auf diesen Abschnitt verwiesen.

Betrachtet man den Koeffizienten des Maximalpegels und besonders den Interaktionsterm für Güterzüge, so fällt auf, dass sich hier der Unterschied um ca. 25 Prozent oder absolut um ca. 0.005 verringert hat. Daraus kann man schließen, dass durch die Aufnahme des Pegelanstiegs ein Teil der unterschiedlichen Wirkungen von Flugzeug- und Güterzuggeräuschen erklärt wird. Zusammen mit der Beobachtung, dass der Maximalpegel bei Güterzügen positiv mit dem Pegelanstieg korreliert, lässt sich ableiten, dass zum Teil die höhere Aufwachwahrscheinlichkeit durch Güterzuggeräusche mit einem höheren Pegelanstieg bei Geräuschen mit höheren Maximalpegeln zu erklären ist. Diese Geräusche stammen folglich von schnell fahrenden Güterzügen.

Der Koeffizient des Interaktionsterms für Personenzüge fällt jetzt sogar negativ aus, ist weiterhin aber nicht signifikant. Dies ist wahrscheinlich auch auf die Rolle des Pegelanstiegs zurückzuführen und legt zumindest die Vermutung nahe, dass bei gleichem Pegelanstieg Geräusche von Personenzügen zumindest keine größeren Auswirkungen als Geräusche von Flugzeugen haben. Es sei aber auch hier noch einmal auf die Korrelation des Maximalpegels mit dem Pegelanstieg bei Schienenverkehrslärm hingewiesen. In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig zu erwähnen, dass der Interaktionsterm von Pegelanstieg und Personenzug deutlich positiv ist.

In Abbildung 25 ist die Dosis-Wirkungs-Beziehung der Aufwachwahrscheinlichkeit zum Maximalpegel dargestellt. Beim Erstellen der Kurve wurde hierbei auf die Tatsache Rücksicht genommen, dass bei den Zuggeräuschen der Pegelanstieg stark mit dem Maximalpegel (L_{ASmax}) korreliert. Somit wurde in Abbildung 25 der Pegelanstieg in Abhängigkeit des L_{ASmax} festgelegt. Hierfür wurde getrennt für Flugzeug-, Personenzug- und Güterzuggeräusche ein lineares Regressionsmodell gerechnet. Anhand der Regressionsmodelle wurde dann jeweils in Abhängigkeit des L_{ASmax} der Pegelanstieg berechnet. Dieses Vorgehen mag ungewöhnlich erscheinen, ist aber die einzige Möglichkeit, eine realistische Darstellung der Dosis-Wirkungs-Beziehung zu erreichen.

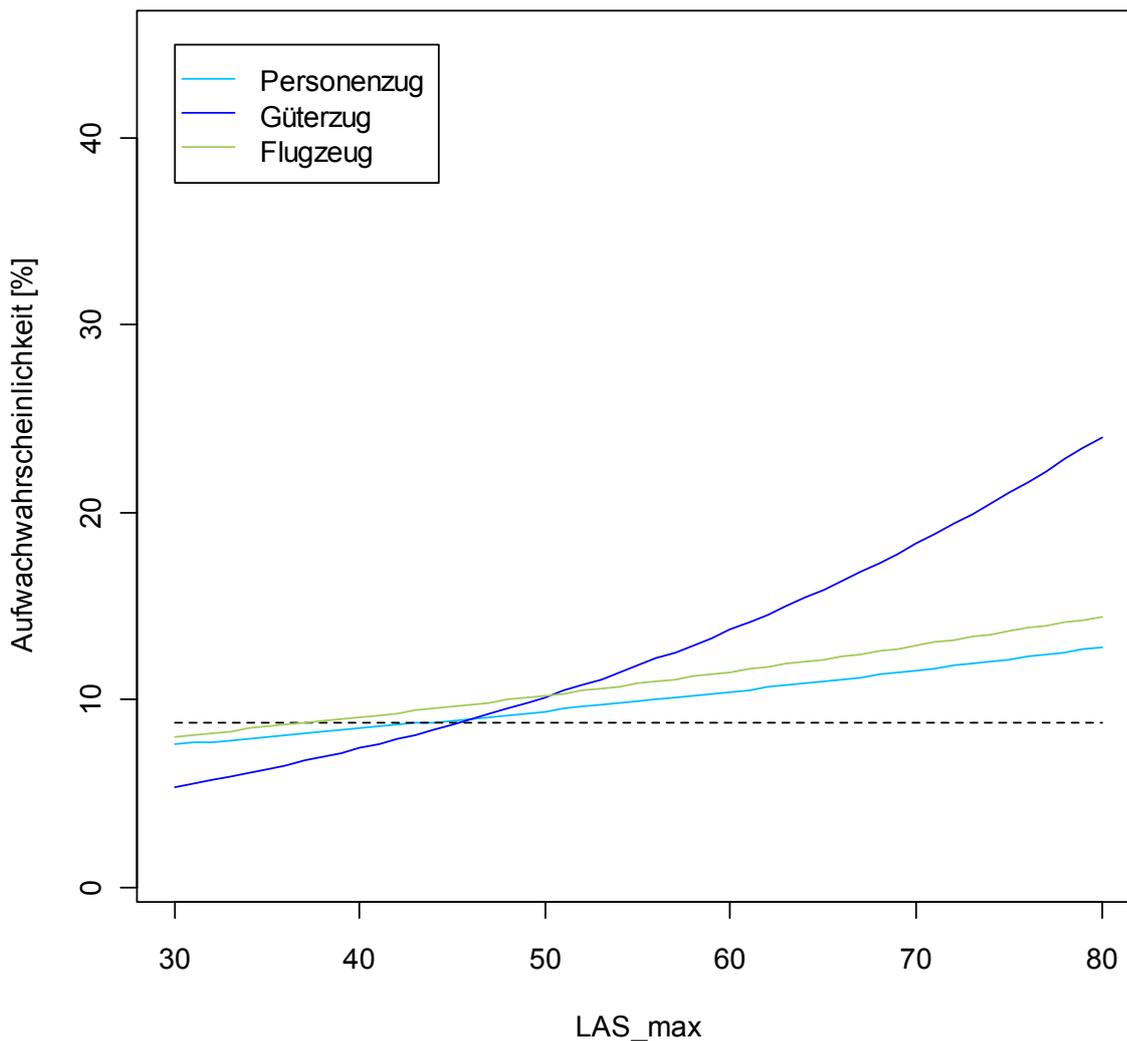


Abbildung 25: Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von LASmax. Andere Einflussvariablen: Schlafstadium: 2; Zeit in Schlafepoche: 11 [Epochen] (median); Schlafzeit: 601 [Epochen]; Hintergrund: 20.7 [dB(A)] (median); Pegelanstieg in Abhängigkeit des LASmax durch lineare Regression. Die gestrichelte Linie gibt die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit an.

Wie man erkennen kann, liegt der Graph für die Aufwachwahrscheinlichkeit bei Geräuschen durch Güterzüge weiterhin deutlich über den beiden anderen Graphen. Im Unterschied zur Abbildung 24 liegt nun der Graph für Flugzeuge leicht über dem für Personenzüge. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in dem Modell mit Pegelanstieg die Aufwachwahrscheinlichkeit bei Personenzuggeräuschen fast gänzlich vom Pegelanstieg abhängt, was die akustischen Variablen betrifft. Dieser wird aber durch das

lineare Regressionsmodell festgelegt, welches die Pegelanstiege tendenziell unterschätzt. Dieser Tatsache ist auch zuzuschreiben, dass die Kurven insgesamt flacher ausfallen als in Abbildung 24. Man sieht also, dass die Untersuchung weiterer akustischer Variablen zwar einen Erkenntnisgewinn bringt, dafür allerdings auch zu einer Erschwerung der Interpretation der gebildeten Modelle führt. Insbesondere gilt dies bei der Erstellung von Kriterien für Lärmschutzkonzepte. Hier muss auf das Zusammenspiel der akustischen Variablen Rücksicht genommen werden, wenn das Konzept auf einem Modell basieren soll, welches mehr als nur eine akustische Variable zur Prädiktion verwendet.

7.4 Diskussion

Abschließend lassen sich zwei Aussagen aus den Ergebnissen ableiten.

Erstens ist eine differenzierte Betrachtung des Schienenverkehrs notwendig. So haben die auf den Regressionsmodellen basierenden Analysen deutlich gezeigt, dass bedeutende Unterschiede in der Störung des Schlafes durch Güter- bzw. Personenzüge existieren. Bei den durch Güterzüge verursachten Lärmereignissen sind die Aufwachwahrscheinlichkeiten deutlich und signifikant höher (auch noch bei Adjustierung für den Pegelanstieg), als bei den durch Personenzüge erzeugten Lärmereignissen. Dies ist wahrscheinlich auf die unterschiedliche Lärmcharakteristik zurückzuführen, welche bei Güterzügen deutlich schriller und wechselhafter ist als bei Personenzügen. Auch die größere Länge von Güterzügen kann hier eine Rolle spielen.

Zweitens lässt sich deutlich erkennen, dass Güterzüge zu signifikant höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten führen als Flugzeuge. Das ist, wie bereits erwähnt, besonders kritisch, da Güterzüge insbesondere in der Nacht fahren und einen Großteil des nächtlichen Schienenverkehrs ausmachen. Auch wenn mit Aufnahme des Pegelanstiegs ein Teil der stärkeren Beeinträchtigung durch Güterzüge erklärt werden kann, ist bei dem auf den Pegelanstieg adjustierten Modell dieser Unterschied weiterhin deutlich und signifi-

kant. Damit lässt sich sagen, dass der 5 dB(A) - Schienenbonus zumindest in der Nacht einer Überprüfung bedarf.

8 Psychologische Wirkungen nächtlichen Bahnlärms

Sibylle Pennig, Julia Quehl

8.1 Einleitung

Lärm kann als „unerwünschter Schall“ definiert werden und verschiedene menschliche Aktivitäten beeinträchtigen. So kann Lärm die Störung von Kommunikation, Erholung und Entspannung sowie des Nachtschlafs nach sich ziehen, welche aufgrund der engen zeitlichen Verbindung mit der Geräuscheinwirkung als Primärreaktionen des Lärms bezeichnet werden. Mit einer zeitlichen Verzögerung führen diese Beeinträchtigungen dazu, dass sich die von der Lärmexposition betroffenen Personen belästigt fühlen. Die Belästigung weiterer Bevölkerungskreise stellt eine zentrale psychologische Wirkung dar [Guski, Schuemer & Felscher-Suhr, 1999]. Zu weiteren so genannten Sekundärreaktionen zählen die subjektive Wahrnehmung des Schlafenerlebens (z.B. wahrgenommene Schlafquantität und -qualität), der Ermüdungsgrad und die Änderungen der Befindlichkeit aufgrund der Lärmeinwirkung.

Der Verkehrslärm, ausgelöst durch den steigenden Straßen-, Schienen- und Flugverkehr, ist ein maßgeblicher Faktor, der bei vielen Teilen der Bevölkerung tagsüber, aber auch nachts zu Belästigungsreaktionen führt. Im Hinblick auf die Geräuschbelastung durch Schienenverkehr sind nach Angaben des Umweltbundesamts [Umweltbundesamt, 2009] etwa 20% der Bevölkerung in Deutschland Mittelungspegeln über 55 dB(A) ausgesetzt, bei denen mit Beeinträchtigungen des physischen und psychischen Wohlbefindens zu rechnen ist. Nachts sind sogar ca. 37% der Bevölkerung mit Mittelungspegeln (>45 dB(A)) belastet, bei denen Beeinträchtigungen des Schlafs bei geöffnetem Fenster erwartet werden. Etwa ein Viertel der Bevölkerung gab bei einer repräsentativen Befragung 2008 an, durch Bahnverkehr belästigt zu sein [Umweltbundesamt, 2008]. Hoch belästigt (definiert durch die Ant-

wortkategorien vier und fünf auf einer fünf-stufigen Skala) fühlten sich nur 3% der Bevölkerung. In vielen Studien wies die Belästigung quellenspezifische Unterschiede auf und fiel bei Schienenverkehrslärm im Vergleich zu Flug- und Straßenverkehrslärm am geringsten aus [Miedema & Outshoorn, 2001; Miedema & Vos, 1998]. Neuere Forschungsergebnisse stellen die Gültigkeit eines generellen „Schienenbonus“ allerdings in Frage [vgl. Möhler, Liepert & Schreckenber, 2010]. Im Hinblick auf die nächtliche Lärmbelastigung und Einschätzung der subjektiven Schlafqualität ergaben sich in einigen Studien keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern oder sogar eine stärkere Beeinträchtigung durch Schienenverkehrslärm [Griefahn et al., 2006; Öhrström, Ögren, Jerson & Gidlöf-Gunnarsson, 2008; Quehl & Basner, 2008]. Daher sind weitere Studien, insbesondere Feldstudien, zu den Sekundärwirkungen des (nächtlichen) Bahnlärms von hoher Relevanz.

Als zentraler akustischer Parameter zur Prognose von Lärmbelästigungen gilt der Mittelungspegel [vgl. Schick, 1997], der meist durch den energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq} charakterisiert wird. Zudem ist auch die Anzahl an Schallereignissen ein wichtiger Einflussfaktor für Belästigungsreaktionen [Fields, 1984]. In Studien zum Schienenverkehr zeigte sich mit zunehmender Anzahl von Zügen eine Erhöhung der Belästigung [z.B. Fields & Walker, 1982; Öhrström & Skanberg, 1996]. Dabei spielt auch die Art des Zuges eine Rolle. Untersuchungen weisen darauf hin, dass Bahnanwohner durch den Lärm von Güterzügen stärker belästigt werden als durch den Lärm von Personenzügen [z.B. Andersen et al, 1983; Fields & Walker, 1982; vgl. Schuemer, 2003].

Die Belästigung durch Verkehrslärm ist nicht ausschließlich durch physikalisch messbare Lärmparameter erklärbar, sondern auch durch nicht-akustische Parameter [Guski, 1999]. So tragen personelle, situative oder soziale Einflussfaktoren zur Erklärung der Belästigung maßgeblich bei. Personelle Parameter schließen z.B. die individuelle Lärmempfindlichkeit, die wahrgenommenen Bewältigungsmöglichkeiten des Lärms und die damit

verbundene subjektive Gewöhnung an den betreffenden Verkehrslärm ein [Fields, 1993; Guski, 1987; Job, 1999; Miedema & Vos, 1999; Stallen, 1999]. Soziodemographische Faktoren, wie Alter und Geschlecht haben eher einen geringen Einfluss auf die Belästigung [Fields, 1993; Miedema & Vos, 1999]. Die Einstellung gegenüber der spezifischen Lärmquelle und Bewertung verschiedener Aspekte, wie die Notwendigkeit oder Vermeidbarkeit des Bahnverkehrs sowie die subjektive Einschätzung der Gesundheitsschädigung durch Bahnlärm, können als wichtige Eigenschaften betrachtet werden, die das soziale „Image“ des Bahnverkehrs beschreiben. Situative oder kontextuelle Faktoren beinhalten z.B. Eigenschaften der Wohngegend und können die subjektive Verkehrslärmbelästigung verändern [Guski, 1987; Ortscheid & Wende 2002].

In der vorliegenden Feldstudie zum nächtlichen Bahnlärm wurden psychologische Wirkungen im Hinblick auf die Belästigung unter Berücksichtigung akustischer sowie nicht-akustischer Einflussgrößen, die wahrgenommene Bahnlärmbelastung und subjektiven Störungen des Schlafs untersucht.

8.2 Methoden

Die psychologischen Bahnlärmwirkungen wurden über Fragebögen erfasst (vgl. Kap. 2.1). Sie beinhalteten morgens die Erhebung der subjektiv wahrgenommenen Belästigung, Bahnlärmbelastung, Müdigkeit und Bewertung des Schlafs nach der Nacht. Die Einschätzungen wurden fast ausschließlich anhand von fünfstufigen Ratingskalen mit verbalen Antwortkategorien vorgenommen (z.B. von „1= nicht belästigt“ bis „5= sehr belästigt“). Damit wurden die Empfehlungen der „International Commission on Biological Effects of Noise“ (ICBEN) zur standardisierten Belästigungsmessung berücksichtigt [Fields et al., 2001]. Für die Beurteilung der Schlafqualität wurde zusätzlich ein Fragebogen mit spezifischeren Aspekten z.B. zur Schlaftiefe, -ruhe und -erholung [vgl. Griefahn et al., 2006] eingesetzt, welche auf einer visuellen Analogskala von 0 bis 1000 zu bewerten waren. Die Endpunkte

dieser Skala beinhalteten z.B. für die Schlaftiefe „tief“ vs. „leicht“, die Schlafruhe „ruhig“ vs. „unruhig“ oder die Schlaferholung „groß“ vs. „gering“.

Die psychologischen Wirkgrößen wurden mit den physikalischen Eigenschaften des Bahnlärms in Verbindung gebracht. Als relevante akustische Parameter für die Analyse dienten der L_{Aeq} (A-gewichteter energieäquivalenter Dauerschallpegel, der im Schlafzimmer während der individuellen Schlafzeit aufgenommen wurde) und die Anzahl der Züge, die nochmals in die Anzahl der Güterzüge und die Anzahl der Personenzüge unterteilt wurde. Aus dem allgemeinen Fragebogen wurden subjektive Angaben der Probanden verwendet, die als weitere relevante Einflussfaktoren auf die Belästigung berücksichtigt wurden. Diese umfassten folgende Aspekte:

- Personale Einflussvariablen: bisherige Bahnlärmbelästigung, subjektive Gewöhnung an den Bahnlärm, Lärmempfindlichkeit, Alter, Geschlecht, Wohndauer
- Soziale Einflussvariablen: Einstellung gegenüber dem Bahnverkehr (allgemein, spezifische Aspekte, z.B. Notwendigkeit des Bahnverkehrs, Unfallgefahr, Gesundheitsschädigung durch Bahnverkehr)
- Situative bzw. kontextuelle Einflussvariablen: Zufriedenheit mit der Wohngegend (z.B. äußeres Erscheinungsbild, Nachbarn, Nähe zum Arbeitsplatz)

Im Hinblick auf die Störwirkungen des Bahnlärms in Form von wahrgenommener Belästigung, Bahnlärmbelastung und subjektiver Beeinträchtigung des Schlafs in der Nacht wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

Mit steigender Bahnlärmbelastung ergibt sich eine signifikante Zunahme

- 1) der Belästigung durch Bahnlärm,
- 2) der eingestuften Bahnlärmbelastung, d.h. Bahnlärmstärke und Häufigkeit unzumutbarer Bahngeräusche,

- 3) der subjektiven Aufwachhäufigkeit und Ermüdung und eine signifikante Abnahme der subjektiv eingeschätzten Schlafquantität und -qualität.

Zur Beantwortung dieser Hypothesen wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen physikalischen Bahnlärmparametern und den erfassten Sekundärreaktionen mittels regressionsanalytischer Verfahren (logistische Regression mit Zufallseffekten, verallgemeinertes Schätzungsgleichungsmodell) unter Einschluss relevanter Moderatorvariablen ermittelt. Für die Auswertung wurde die erste Studiennacht ausgeschlossen, da diese zur Anpassung an die Messinstrumente vorgesehen war und die Effekte ansonsten nicht eindeutig auf die unabhängigen Variablen zurückgeführt werden können.

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Belästigung und subjektive Bahnlärmbelastung

Vor der Durchführung der Studie wurde die generelle Belästigung der Probanden durch Bahnlärm erfasst. Abbildung 26 zeigt die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Bahnlärmvorbelastung. Ungefähr die Hälfte der Probanden (54% bzw. 18 von 33 Personen) gab an, durch Bahnlärm „ziemlich“ oder „sehr“ belästigt zu sein.

Darüber hinaus berichteten in etwa zwei Drittel der Probanden (67%), von bestimmten Bahnlärmsituationen besonders belästigt zu sein. Eine qualitative Auswertung dieser Situationen ergab, dass die Mehrzahl insbesondere durch Güterzüge belästigt wird (18 Nennungen, N=33). Als Hauptgrund für die erhebliche Belästigung wurde die Lautstärke bzw. der Lärm genannt (15 Nennungen, N=33). 73% derjenigen, die sich durch bestimmte Bahnlärmsituationen besonders belästigt sahen, waren der Ansicht, dass diese Situationen unbedingt vermieden werden sollten. Darüber hinaus wurden von der Mehrzahl der Probanden Güterzüge als Zugtypen, die besonders laut sind,

genannt (88%), und Personenzüge (inklusive ICE, S-Bahn und Regionalzüge) als Zugtypen, die besonders leise sind, beschrieben (64%).

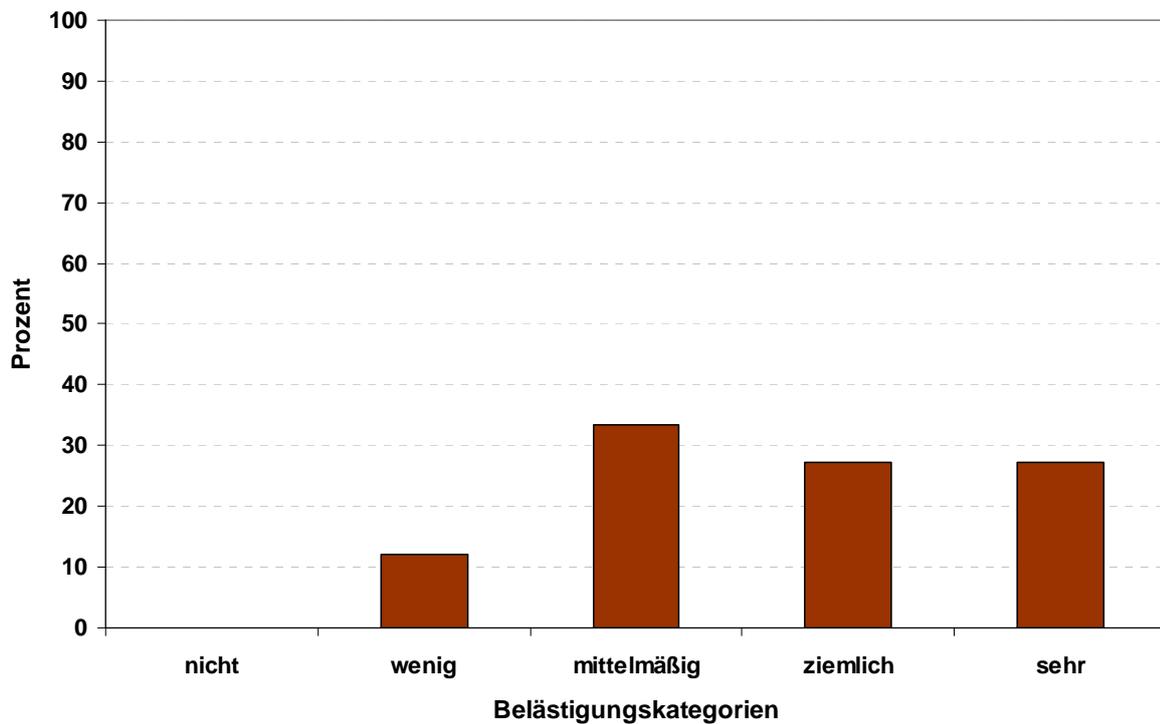


Abbildung 26: Prozentuale Verteilung der Belästigungsbeurteilung („Wie stark werden Sie belästigt durch Bahnlärm?“) **vor** der Studie (N=33).

Die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Antworten bezüglich der Belästigung durch den Bahnlärm der vorangegangenen Nacht ist in Abbildung 27 dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die Mehrheit der Untersuchungsteilnehmer (88%) „nicht“ oder „wenig“ belästigt war. 10% gaben an, „mittelmäßig“ belästigt worden zu sein und lediglich 2% fühlten sich „ziemlich“ belästigt. Die oberste Kategorie („sehr“ belästigt) wurde von den Studienteilnehmern gar nicht genannt.

Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei der subjektiv erlebten Bahnlärmbelastung. Die oberste Kategorie wurde ebenfalls nicht verwendet. Die Mehrheit der Probanden gab an, den Bahnlärm der vergangenen Nacht „nicht“ oder „wenig“ gehört zu haben (84%) und „nie“ oder „selten“ unzumutbare Bahngeräusche gehört zu haben (91%). 13% der Untersuchten

hörte den Bahnlärm „mittelmäßig“ stark und 3% „ziemlich“ stark; 7% der Befragten gaben an, „gelegentlich“ unzumutbare Geräusche von Zügen in der Nacht gehört zu haben und 2% „oft“.

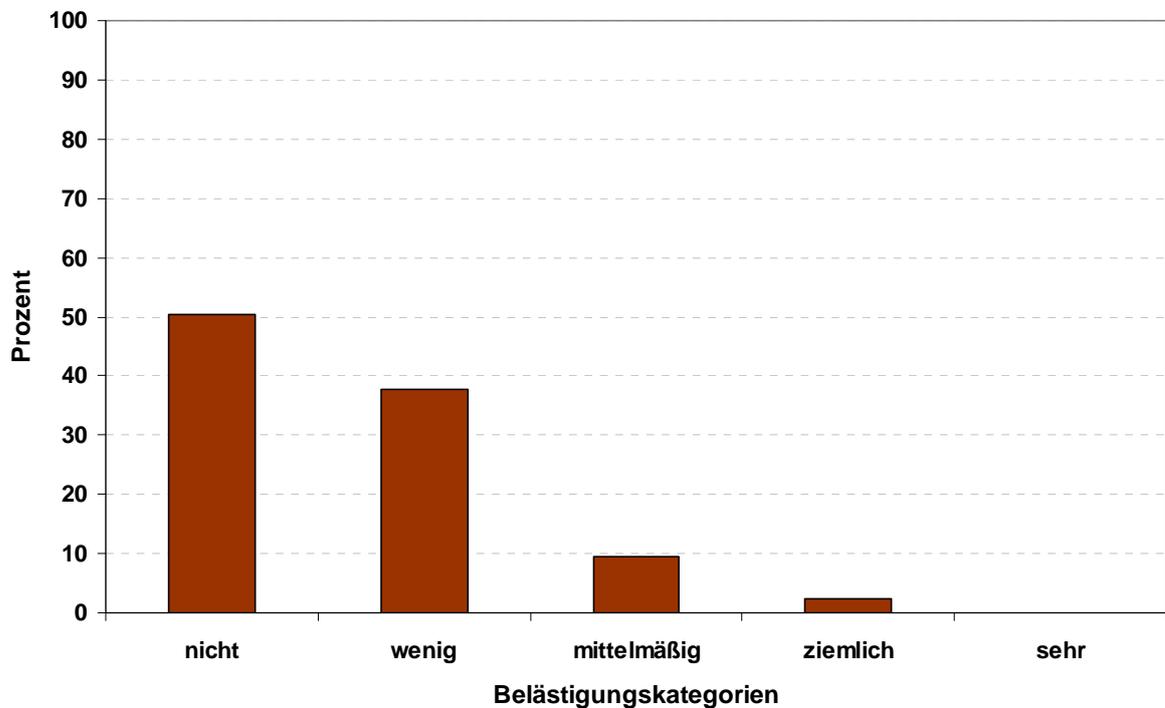


Abbildung 27: Prozentuale Verteilung der Belästigungsbeurteilung („Wie stark wurden Sie durch den Bahnlärm der vergangenen Nacht belästigt?“) gemittelt über 8 Nächte (N=33).

Für die Ermittlung von Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen nächtlichem Bahnlärm und der Belästigung, wurde die 5-stufige Skala in eine dichotome Variable umgewandelt. Aufgrund der geringen Nutzung der Kategorien 4 und 5, die den Anteil der hoch Belästigten („highly annoyed“) abbilden, wurden auch die mittelmäßig Belästigten einbezogen und somit die Skalenstufen ≥ 3 („mittel bis sehr belästigt“) zusammengefasst. Als physikalische Parameter des Bahnlärms wurden der L_{Aeq} , die Gesamtanzahl der Züge, die Anzahl der Güterzüge und die Anzahl der Personenzüge einbezogen und deren Einfluss mittels einer logistischen Regressionsanalyse mit Zufallseffekten überprüft. Bei einzelner Betrachtung der akustischen Größen im Modell

konnte kein signifikanter Zusammenhang mit der Belästigungsbeurteilung gefunden werden.

Daraufhin wurden zusätzliche nicht-akustische Einflussgrößen als mögliche Moderatorvariablen überprüft. Die Parameter, die sich einzeln auf die dichotome Belästigungsvariable signifikant auswirkten, wurden in das Regressionsmodell aufgenommen. Der Großteil der untersuchten Faktoren, wie z.B. das Alter oder die Lärmempfindlichkeit hatte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Belästigung. Schrittweise wurden die Variablen mit dem geringsten Einfluss (höchstem p-Wert) entfernt, so dass die Gewöhnung an Bahnlärm („Wie gut können Sie sich grundsätzlich an Bahnlärm gewöhnen?“, 5-stufige Skala) und die Wohndauer (in Jahren) sich schließlich als die entscheidenden nicht-akustischen Faktoren für die Modellanpassung herausstellten. Unter Einschluss dieser beiden Variablen wurde dabei für jeden akustischen Parameter ein eigenes Modell entwickelt.

Wie aus Tabelle 19 ersichtlich ist, konnte auch unter Berücksichtigung der Moderatorvariablen im Regressionsmodell kein signifikanter Einfluss des L_{Aeq} auf die Belästigung festgestellt werden (vgl. Modell 1). Im Hinblick auf die Anzahl der gesamten Züge, d.h. Güter- und Personenzüge ließ sich jedoch ein signifikanter Anstieg des Anteils der mittel bis sehr Belästigten mit Zunahme der Anzahl erkennen (vgl. Modell 2). Bei getrennter Betrachtung der Art der Züge stellte sich heraus, dass die Belästigung signifikant mit der Anzahl der Güterzüge, aber knapp nicht mehr mit der Anzahl der Personenzüge zunahm (vgl. Modell 3 bzw. 4).

In Abbildung 28 wird der Anteil der mittel bis stark Belästigten (Skalenstufe ≥ 3) in Abhängigkeit der Gesamtanzahl der Züge wiedergegeben. Der Anteil belästigter Personen variierte dem Modell zufolge von etwa 2% bei insgesamt 10 Zügen bis zu ca. 45% bei der maximal gemessenen Gesamtanzahl von 183 Zügen. Der Mittelwert dieser Anzahl lag bei 67 Zügen pro Nacht (SD=27). Hier war auf Grundlage der Regressionsanalyse ein Anteil von ca. 6% mittel bis stark belästigter Probanden festzustellen.

Modell	Variable	Parameter		
		β	SE	p
1	Intercept	-1.244	1.636	0.447
	L_{Aeq}	0.021	0.038	0.584
	Gewöhnung	-0.828	0.225	<0.001**
	Wohndauer	0.106	0.032	0.001**
	Random Intercept	0.100	2.517	
2	Intercept	-1.020	0.865	0.216
	Gesamtanzahl der Züge	0.021	0.009	0.018*
	Gewöhnung	-1.111	0.270	<0.001**
	Wohndauer	0.087	0.036	0.015*
	Random Intercept	0.406	0.590	
3	Intercept	-0.817	0.901	0.365
	Anzahl der Güterzüge	0.020	0.01021	0.048*
	Gewöhnung	-1.083	0.290	<0.001**
	Wohndauer	0.100	0.039	0.010*
	Random Intercept	0.585	0.4936	
4	Intercept	-0.691	0.751	0.357
	Anzahl der Personenzüge	0.044	0.024	0.07
	Gewöhnung	-0.979	0.231	<0.001**
	Wohndauer	0.076	0.032	0.017*
	Random Intercept	0.000002	0.6158	

Tabelle 19: Logistische Regressionsmodelle mit Zufallseffekten für die Vorhersage der Belästigung durch den L_{Aeq} , Gesamtanzahl der Züge, Anzahl der Güter- und Personenzüge und die nicht-akustischen Variablen Gewöhnung und Wohndauer, *p<.05, **p<.01.

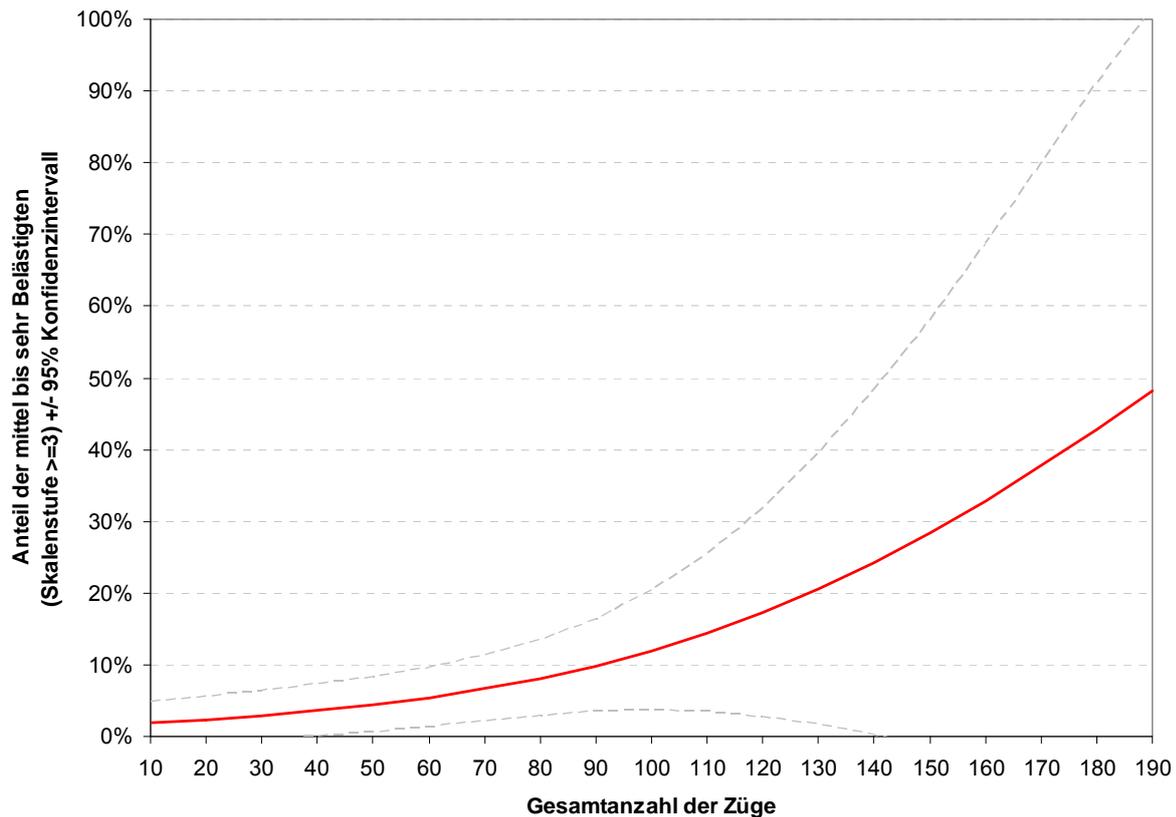


Abbildung 28: Durch Regressionsmodell 2 vorhergesagter Anteil durch Bahnlärm mittel bis sehr Belästigter (Skalenstufe ≥ 3) in Abhängigkeit von der Gesamtanzahl der Züge, Gewöhnung=3 (Median) und Wohndauer=3,1 (Median).

Der Einfluss der im Regressionsmodell berücksichtigten Moderatorvariablen Gewöhnung und Wohndauer geht ebenfalls aus Tabelle 19 hervor. Die Probanden fühlten sich umso stärker durch den gemessenen Bahnlärm in den untersuchten Nächten belästigt, je weniger sie sich subjektiv an den Lärm durch Schienenverkehr gewöhnen können. In Abbildung 29 ist dieser Effekt der Gewöhnung auf die Belästigungsreaktion veranschaulicht. Im Hinblick auf die Wohndauer verhielt es sich umgekehrt. Je länger die Probanden bereits in der von Bahnlärm betroffenen Umgebung wohnten, desto höher stufen sie ihre Belästigung durch den nächtlichen Bahnlärm ein.

In Bezug auf die wahrgenommene Bahnlärmbelastung wurde die eingestufte Bahnlärmstärke und Häufigkeit unzumutbarer Geräusche in Abhängigkeit der akustischen Parameter analysiert. Da die Daten nicht normal verteilt waren, wurde das regressionsanalytische Verfahren des verallgemeinerten

Schätzungsgleichungsmodells angewandt. Die wahrgenommene Stärke des Bahn lärms der vergangenen Nacht nahm signifikant mit der Gesamtanzahl der Züge ($\beta = 0.005$, $SE = 0.002$, $p = 0.011$) und mit der Anzahl der Güterzüge ($\beta = 0.006$, $SE = 0.002$, $p = 0.009$) zu, nicht jedoch mit der Anzahl der Personenzüge. Für die eingestufte Häufigkeit an unzumutbaren Geräuschen von Zügen in der Nacht ergab sich eine signifikante Zunahme mit steigender Gesamtanzahl der Züge ($\beta = 0.003$, $SE = 0.001$, $p = 0.017$) sowie der Anzahl der Güterzüge ($\beta = 0.004$, $SE = 0.001$, $p = 0.002$), nicht jedoch mit der Anzahl der Personenzüge. Für den L_{Aeq} konnte kein signifikanter Einfluss auf die subjektive Bahn lärmbelastung festgestellt werden.

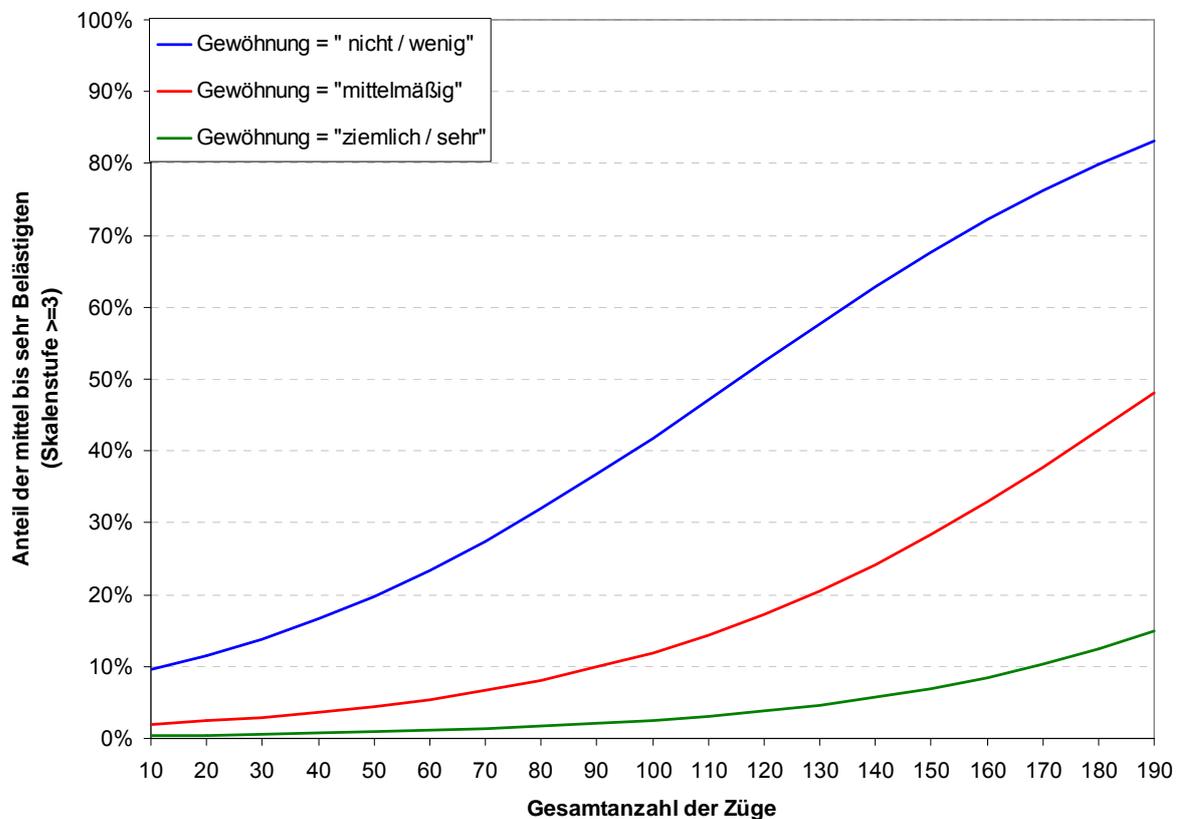


Abbildung 29: Durch Regressionsmodell 2 vorhergesagter Anteil durch Bahn lärmmittel bis sehr Belästigter (Skalenstufe ≥ 3) in Abhängigkeit von der Gesamtanzahl der Züge und der Gewöhnung an Bahn lärmmittel (N=6 für Kategorien „nicht / wenig“, N=12 für Kategorie „mittelmäßig“ (Median), N=15 für Kategorien „ziemlich / sehr“), Wohndauer=3,1 (Median).

8.3.2 Subjektive Störung des Schlafs durch Bahnlärm

Die Probanden schätzten, im Durchschnitt 19,3 Minuten ($SD=13,6$) zum Einschlafen gebraucht zu haben und 22% berichteten von Einschlafschwierigkeiten am Abend, die sich jedoch nicht auf den Einfluss der akustischen Parameter zurückführen ließen. In der Mehrzahl der Nächte (79%) konnten die Untersuchungsteilnehmer sich morgens daran erinnern, aufgewacht zu sein und in 20 % dieser Nächte führten die Probanden das Aufwachen auf die Geräusche von Zügen zurück. Die Ergebnisse der Regressionsmodelle (verallgemeinerte Schätzungsgleichungsmodelle) zeigten für die subjektiv eingeschätzte Aufwachhäufigkeit („Wie häufig sind Sie in der vergangenen Nacht aufgewacht?“, 5-stufige Skala von „nie“ bis „immer“) eine signifikante Zunahme mit steigender Gesamtanzahl der Züge und Anzahl der Güterzüge, allerdings nicht mit der Anzahl der Personenzüge (vgl. Tabelle 20). Tendenziell nahm die subjektive Aufwachhäufigkeit auch mit erhöhten L_{Aeq} zu. In 17% der Fälle hatten die Probanden anschließend Probleme wieder einzuschlafen. Von diesen Nächten gaben die Probanden zu 40% an, dass Züge sie am Wiedereinschlafen gehindert hätten, während in den Regressionsanalysen kein signifikanter Einfluss des Bahnlärms sichtbar wurde.

Weder für die subjektiv empfundene Schlafquantität und -qualität, noch für verschiedene Komponenten der Schlafqualität, wie Schlaftiefe, -ruhe und -erholung sowie die morgendliche Ermüdung konnte ein signifikanter Einfluss des gemessenen nächtlichen Bahnlärms festgestellt werden. Diese Ergebnisse bestätigten sich auch unter Berücksichtigung möglicher Moderatorvariablen, wie Alter, Geschlecht, subjektive Gewöhnung an Bahnlärm, Lärmempfindlichkeit und Belästigung durch Bahnlärm in den statistischen Modellen.

Modell	Variable	Parameter		
		β	SE	p
1	Intercept	1.500	0.421	< 0.001
	L _{Aeq}	0.019	0.011	0.094
2	Intercept	1.925	0.152	< 0.001
	Gesamtanzahl der Züge	0.004	0.002	0.024*
3	Intercept	1.974	0.134	< 0.001
	Anzahl der Güterzüge	0.004	0.002	0.021*
4	Intercept	2.098	0.186	< 0.001
	Anzahl der Personenzüge	0.005	0.008	0.528

Tabelle 20: Regressionsmodelle (verallgemeinerte Schätzungsgleichungsmodelle) für die Vorhersage der subjektiven Aufwachhäufigkeit durch den L_{Aeq}, Gesamtanzahl der Züge, Anzahl der Güter- und Personenzüge, *p<.05.

8.4 Diskussion

Im Hinblick auf die psychologischen Wirkungen des nächtlichen Bahnlärms lag das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung der Belästigungsreaktionen der Anwohner von Bahnstrecken. Darüber hinaus wurde die wahrgenommene Bahnlärmbelastung und subjektive Störung des Schlafs nach der lärmexponierten Nacht betrachtet.

Zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen dem nächtlichen Bahnlärm und der Belästigung wurden Dosis-Wirkungs-Kurven aus einer logistischen Regression mit Zufallseffekten abgeleitet. Es wurden getrennte Modelle für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel (L_{Aeq}), die Gesamtanzahl der Züge, die Anzahl der Güterzüge und die Anzahl der Personenzüge erstellt und jeweils der Einfluss nicht-akustischer Moderatorvariablen berücksichtigt. Die aufgestellte Hypothese bezüglich der Zunahme der Belästigungsreaktion in Abhängigkeit der gemessenen Bahnlärmbelastung kann angenommen werden. Regressionsmodelle, die neben der Belästigung auch signifikante nicht-akustische Moderatorvariablen (subjektive

Gewöhnung und Wohndauer) einschlossen, zeigten einen signifikanten Anstieg der Belästigung mit zunehmender Gesamtanzahl der Züge (vorhergesagter Anteil mittel und stark Belästigter von etwa 2% bei 10 Zügen bis zu 45% bei 183 Zügen). Bei Betrachtung der Art der Züge ergab sich eine signifikante Zunahme der Belästigung mit steigender Anzahl der Güterzüge, allerdings knapp nicht mehr mit erhöhter Anzahl der Personenzüge. Für den energieäquivalenten Dauerschallpegel konnte kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Entgegen den Ergebnissen von Feldstudien zur Belästigung in Abhängigkeit des nächtlichen Fluglärms [vgl. Quehl & Basner, 2006] zeigten sich allerdings lediglich unter Berücksichtigung der nicht-akustischen Moderatorvariablen signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Bahnlärm und der Belästigung. Der Effekt ist bei den untersuchten Probanden als eher gering einzustufen und unterliegt einer hohen Streuung. Zu einer genaueren Schätzung mit einem schmaleren Konfidenzintervall könnte die Untersuchung einer höheren Anzahl von Probanden beitragen. Die geringer ausgeprägte Belästigung durch nächtlichen Schienenverkehrslärm gegenüber nächtlichem Fluglärm bestätigt allerdings Studien, in denen ein direkter Vergleich zwischen dem Lärm verschiedener Verkehrsträger durchgeführt wurde [Miedema & Vos, 1998; Quehl & Basner, 2008].

Hypothesenkonform ergab sich eine Zunahme der subjektiven Bahnlärmbelastung, die sich in einer erhöhten wahrgenommenen Bahnlärmstärke und eingestuften Häufigkeit unzumutbarer Geräusche mit steigender Anzahl der Züge, insbesondere der Güterzüge, in der vorausgegangenen Nacht äußerte. Der L_{Aeq} hatte keinen signifikanten Effekt.

Insgesamt sprechen die Befunde zur Belästigung und subjektiven Bahnlärmbelastung dafür, dass von Bahnlärm betroffene Personen insbesondere die Anzahl der Züge als störend wahrnehmen und auf globale Lärmimmissionen, die durch den Mittelungspegel erfasst werden, weniger reagieren. Darüber hinaus lassen die regressionsanalytisch ermittelten Ergebnisse sowie die qualitativen Auswertungen zur Belästigung durch bestimmte Bahn-

situationen auf eine stärkere Störwirkung der Güterzüge im Gegensatz zu den Personenzügen schließen. Dies stimmt auch mit den Befunden anderer Studien überein [vgl. Schuemer, 2003] und kann darauf zurückzuführen sein, dass Güterzüge in der Regel durch längere Vorbeifahrzeiten und höheren Maximalpegel gekennzeichnet sind. Darüber hinaus überwiegt der Güterverkehr nachts gegenüber dem Personenzugverkehr.

Während die Belästigung durch nächtlichen Bahnlärm, die über die Studie hinweg jeden Morgen erfragt wurde, eher gering ausfiel (2% ziemlich bis sehr Belästigte), gaben die Probanden vor der Studie einen weitaus höheren Belästigungsgrad an (54% ziemlich bis sehr Belästigte). Da diese Einschätzung nicht auf die Nacht bezogen war, könnte dieses Ergebnis dadurch erklärt werden, dass sich die Belästigungsbeurteilung der Probanden primär auf die Tag- und Abendstunden konzentrierte. Die Bedeutsamkeit, die Tageszeit in der Erfassung der Belästigung zu berücksichtigen, wurde bereits hervorgehoben. So wurden höhere Belästigungsurteile für Schienenverkehrslärm in den Abendstunden als tagsüber [Schreckenberger, Möhler & Liepert, 2010] und tagsüber höhere als nachts [Griefahn, Möhler & Schuemer, 1999] gefunden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Feldstudie machen ferner deutlich, dass neben den akustischen Parametern nicht-akustische Moderatorvariablen eine wichtige Rolle bei der Erklärung der Belästigung spielen [vgl. Guski, 1999]. In diesem Fall erwies sich die subjektive Gewöhnung an den Schienenverkehrslärm als besonders relevante Einflussgröße. Personen, die angaben, sich grundsätzlich weniger an Bahnlärm gewöhnen zu können, stellten sich auch als stärker belästigt heraus. Es ist anzunehmen, dass es sich bei dem erfassten Konzept nicht um eine Variable handelt, die durch die Wohndauer bestimmt wird. Diesbezüglich zeigte sich ein entgegengesetzter Effekt, da die nächtliche Belästigung mit zunehmender Wohndauer signifikant anstieg. Die bisherigen empirischen Befunde zum Zusammenhang zwischen der Wohndauer und Lärmreaktionen sind widersprüchlich [vgl. Guski, 1987; Schuemer, 2003]. Teilweise gehen berichtete Effekte eher auf das

mit der Wohndauer korrelierte Alter zurück. Diese Erklärung konnte in der vorliegenden Studie jedoch in den erfolgten Analyseschritten ausgeschlossen werden. Der Befund spricht daher deutlich gegen das Auftreten einer generellen Anpassungsreaktion, je länger die Betroffenen dem Lärm ausgesetzt sind [vgl. auch Weinstein, 1982]. Es könnte eher darauf geschlossen werden, dass die Bereitschaft, mit dem Lärm umzugehen und sich daran zu gewöhnen abnimmt. Allerdings könnte es sich auch um eine Reaktion auf den zunehmenden Bahnverkehr in der Wohngegend und den damit einhergehenden angestiegenen Lärm handeln. Bei der erfassten subjektiven Gewöhnung ist eher davon auszugehen, dass es sich um eine individuelle Einstellungsvariable handelt, die mit den erlebten Bewältigungsmöglichkeiten zusammenhängt.

Im Gegensatz zu Laborstudien zur Wirkung nächtlichen Schienenverkehrslärms [Griefahn et al., 2006; Quehl & Basner, 2008] zeigte sich in der vorliegenden Feldstudie kein Einfluss auf die subjektive Schlafquantität und -qualität. Lediglich eine erhöhte subjektive Aufwachhäufigkeit konnte mit zunehmender Anzahl der Züge, insbesondere der Güterzüge und tendenziell mit steigendem L_{Aeq} festgestellt werden. Die Hypothese zur zunehmenden Störwirkung des Bahnverkehrs auf den Schlaf mit steigender Lärmbelastung bestätigte sich daher nur zum Teil. Die fehlenden Zusammenhänge zwischen den Bahnlärmparametern und den übrigen Aspekten der subjektiven Schlafbewertung entsprechen den Befunden anderer Feldstudien [vgl. Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Moehler & Mehnert, 2000; Horne et al., 1994], welche im Vergleich zu Laborstudien zwar durch eine höhere externe, aber geringe interne Validität gekennzeichnet sind. Das Ergebnis könnte daher darauf zurückzuführen sein, dass (ähnlich wie bei der Belästigung) personale oder situative Moderatorvariablen berücksichtigt werden müssen, die sich auf die Bewertung des Schlafs auswirken (z.B. Gewöhnung, Alter oder Lärmempfindlichkeit). Allerdings konnten in dieser Studie auch durch die Aufnahme von Moderatorvariablen in das

Regressionsmodell keine signifikanten Effekte der physikalischen Parameter nachgewiesen werden.

9 Zusammenfassung

In einer früheren Lärmwirkungsstudie des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin hatte sich gezeigt, dass Bahnlärm zu höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten führte als Straßenverkehrs- und Fluglärm. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz z.B. zu einer Metaanalyse von Belästigungsstudien aus den Jahren 1965 – 1998, die Grundlage des EU-Positionspapiers „*Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance*“ ist und der zufolge der Bahnlärm als am wenigsten belästigend, Fluglärm hingegen als am stärksten belästigend eingestuft wird.

Aus diesem Grund war es eine Aufgabe des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin im vorliegenden Projekt DEUFRAKO/RAPS, in einer Metaanalyse die Ergebnisse zweier Lärmwirkungsstudien im Schlaflabor des DLR und sowie einer Laborstudie des Leibnitz-Instituts für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo) zusammenzuführen und somit die Effekte von Verkehrslärm auf den Schlaf auf Grundlage einer breiteren Datenbasis mit einer größeren Anzahl an Probanden und eingespielten Lärmereignissen valider abzuschätzen. Bieten Laborstudien den großen Vorteil, unter hoch kontrollierten Bedingungen grundlegende Effekte untersuchen zu können, so sind die für mögliche Grenzwertsetzungen notwendigen ökologisch validen Daten nur in Feldstudien zu gewinnen. Aus diesem Grund führte das DLR zudem in DEUFRAKO/RAPS zwischen Februar 2008 und Juli 2009 eine jeweils 9 Nächte umfassende Feldstudie bei 33 Probanden vor Ort im vom nächtlichen Bahnlärm hochbelasteten Rheintal zwischen Köln und Koblenz durch. Die Ergebnisse dieser Bahnlärmfeldstudie können unmittelbar mit den Ergebnissen einer vom DLR 2001-2002 durchgeführten Fluglärmfeldstudie verglichen werden.

Bei der Metaanalyse wurden 35.647 eingespielte Straßenverkehrsgeräusche, 27.680 eingespielte Schienenverkehrsgeräusche (eine Unterscheidung zwischen Güter- und Personenverkehr war hier nicht möglich)

und 46.509 eingespielte Flugzeuggeräusche berücksichtigt. In der Bahnlärmfeldstudie wurden insgesamt 11.836 Güterzüge und 4.193 Personenzüge gezählt, deren Lärmauswirkungen auf den Schlaf mit denen der 16.411 gemessenen Flugzeuggeräusche aus der früheren Fluglärmfeldstudie verglichen wurden.

Die ereigniskorrelierte Auswertung, basierend auf einem multivariaten logistischen Regressionsmodell, zeigt sowohl bei der Metaanalyse der Labor- als auch bei der Analyse der Feldstudien Daten, dass Schienenverkehrslärm zu signifikant höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten führt als Fluglärm. Einen signifikanten Einfluss haben dabei der Schalldruckmaximalpegel L_{AFmax} bzw. die Emergenz (Maximalpegel minus Hintergrundpegel) sowie die Schnelle des Pegelanstiegs des Geräuschs.

Die Metaanalyse der Schlaflaboruntersuchungen ergibt zudem, dass der Unterschied zwischen Bahnlärm und Straßenverkehrslärm nur marginal ist und dort keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Die Feldstudienanalyse zeigt des Weiteren, dass der Schienenverkehrslärm differenziert zu betrachten ist. Bei den durch Güterzüge verursachten Lärmereignissen sind die Aufwachwahrscheinlichkeiten deutlich und signifikant höher als bei den durch Personenzüge erzeugten Lärmereignissen. Die Aufwachwahrscheinlichkeiten auf Grund von Lärmereignissen verursacht durch Personenzüge und Flugzeuge sind annähernd gleich.

Die Gesamtschlafparameter der Nacht wie Schlaflatenz und -effizienz zeigen im Studienphasenverlauf auch bei sich deutlich ändernder Anzahl an Lärmereignissen kaum Varianz.

Als Gesamtfazit für den Schlaf kann festgehalten werden, dass die Wahrscheinlichkeit für Aufwachreaktionen durch Lärm aller Verkehrsarten, verglichen mit klinischen Schlafstörungen, zwar insgesamt nur gering, jedoch signifikant erhöht ist. Aufgrund der hohen inter-individuellen Variabilität in

der Empfindlichkeit für verkehrslärmbedingte Schlafstörungen und aufgrund der eingeschränkten Repräsentativität der Stichprobe ist jedoch nicht auszuschließen, dass in nicht untersuchten Teilpopulationen der Bevölkerung stärkere Lärmwirkungen beobachtet werden können. In den vorliegenden Studien wurden Risikogruppen, d.h. kranke Personen und Kinder explizit ausgeschlossen, um die Auswirkungen des Verkehrslärms möglichst unverzerrt zu untersuchen. Gerade in diesen Bevölkerungsgruppen sind stärkere Wirkungen zu erwarten.

Physiologisch findet zudem keine komplette Anpassung an den Lärm statt, da die Lärmwirkungen auch noch bei langjähriger Exposition beobachtet werden können. Aussagen zu möglichen langfristigen Gesundheitsstörungen sind aufgrund dieser hier vorgestellten Schlafstudien nur indirekt möglich. Epidemiologische Studien können hier größeren Aufschluss geben.

Zum Zeitpunkt der Berichtstellung wird in Deutschland dem Schienenverkehr ein Lärmbonus von 5 dB(A) gewährt. Der in diesem Projekt vorgenommene Vergleich der Aufwachwahrscheinlichkeiten aufgrund von Bahn-, Straßenverkehrs- und Fluglärm lässt zumindest für den Güterverkehr nicht erkennen, dass dieser Bonus physiologisch begründet ist und er bedarf somit vor allem für die Nacht einer weiteren Überprüfung.

Die psychologischen Untersuchungen der Bahnlärmfeldstudie zeigen, dass sich die Belästigungsbeurteilung der Probanden primär auf die Tag- und Abendstunden konzentriert. Für den energieäquivalenten Dauerschallpegel der Nacht kann kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Insgesamt sprechen die Befunde zur Belästigung und subjektiven Bahnlärmbelastung dafür, dass von Bahnlärm betroffene Personen insbesondere die Anzahl der Züge als störend empfinden und auf globale Lärmimmissionen, die durch den Mittelungspegel erfasst werden, weniger sensitiv reagieren. Darüber hinaus lassen die regressionsanalytisch ermittelten Ergebnisse sowie die qualitativen Auswertungen zur Belästigung durch bestimmte Bahnsituatio-

nen auf eine stärkere Störwirkung der Güterzüge im Gegensatz zu den Personenzügen schließen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Bahnlärmfeldstudie machen ferner deutlich, dass neben den akustischen Parametern nicht-akustische Moderatorvariablen eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Belästigung spielen. In diesem Fall erwies sich die subjektive Gewöhnung an den Schienenverkehrslärm als besonders relevante Einflussgröße. Es ist anzunehmen, dass es sich bei dem erfassten Konzept nicht um eine Variable handelt, die durch die Wohndauer bestimmt wird. Diesbezüglich zeigte sich ein entgegengesetzter Effekt, da die nächtliche Belästigung mit zunehmender Wohndauer signifikant anstieg.

Es konnten keine Auswirkungen des Schienenverkehrslärms auf die kognitive Leistung des folgenden Tages nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die Leistungstests, die am Morgen als auch am Abend durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu denen der Fluglärmfeldstudie, die mit demselben Reaktionszeittest durchgeführt wurde und bei der zwar geringe, aber signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem nächtlichen L_{Aeq} und der mittleren Reaktionszeit am folgenden Morgen nachweisbar waren.

Trotz methodischer Probleme ist für die Zukunft die Ausdehnung der Untersuchungen auf besonders vulnerable Bevölkerungsschichten wie z.B. Kranke unerlässlich, um ein umfassenderes Bild über die Auswirkungen von Verkehrslärm in stark belasteten Gebieten zeichnen zu können. Auch muss sich die Lärmwirkungsforschung verstärkt der Aufklärung der Wechselwirkungsmechanismen von im Alltag häufig zeitgleich auftretenden, verschiedenen Verkehrslärmquellen widmen.

10 Danksagungen

Wir danken unseren Kollegen des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin, Abteilung Flugphysiologie ganz herzlich für ihren hervorragenden Einsatz und ihre enorme Unterstützung bei der Durchführung dieser herausfordernden Studie. Insbesondere möchten wir Manfred Schulze, Stefan Schmitt, Helga Buess, Ernst-Wilhelm Müller, Martin Wittkowski, Julia Quehl, Sandra Schwanitz, Martin Vejvoda, Norbert Luks, Jürgen Wenzel, Gernot Plath und Tanja Niederl danken.

Allen Versuchspersonen gebührt ganz besonderer Dank für ihre Geduld und die Ausdauer, die Studie erfolgreich abzuschließen.

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert (19 U 6014B).

11 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AIC	Akaike Information Criterion
AIRORA	Air, Road and Rail Traffic Noise
ASDA	American Sleep Disorders Association
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
dB	Dezibel, physikalische Einheit des Schalldruckpegels
dB(A)	physikalische Einheit des A-bewerteten Schalldruckpegels
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DEUFRAKO	Deutsch-Französische Kooperation in der Verkehrsforschung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EEG	Elektroenzephalografie
EKG	Elektrokardiografie
EMG	Elektromyografie
EOG	Elektrookulografie
EN	Europäische Norm
FPI	Freiburger Persönlichkeitsinventar
HGF	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
IfADo	Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund
L_{Aeq}	energieäquivalenter Dauerschallpegel (= zeitlicher Mittelwert) des A-bewerteten Schalldruckpegels
L_{AF}	A-bewerteter Schalldruckpegel, gemessen mit der Zeitbewertung „fast“
L_{AS}	A-bewerteter Schalldruckpegel, gemessen mit der Zeitbewertung „slow“
L_{AFmax}	Maximalwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, gemessen mit der Zeitbewertung „fast“
L_{ASmax}	Maximalwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, gemessen mit der Zeitbewertung „slow“
L90	Perzentilpegel, Pegel der in 90% der Messzeit überschritten wird
PLMS	Periodic limb movements in sleep

Abkürzung	Bedeutung
RAPS	Railway noise (and other modes), Annoyance, Performance, Sleep
REM	<i>Rapid Eye Movement</i> , Traumschlafphase
SDI	Sleep Disturbance Index
SOL	Sleep Onset Time
SPT	Sleep Period Time
SRT	Single Reaction Time
SWS	Slow Wave Sleep
STRAIN	Study on Human Specific Response to Aircraft Noise
TST	Total Sleep Time

12 Literaturverzeichnis

- Andersen T.V., Kühl K., Relster E. (1983): Reactions to railway noise in Denmark. *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), 311-314.
- ASDA Report (1992): EEG arousals: scoring rules and examples. *Sleep*, 15(2), 174-184.
- Basner M., Elmenhorst E.-M., Maaß H., Müller U., Quehl J., Vejvoda M. (2008): Single and combined effects of air, road and rail traffic noise on sleep. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) 2008, Foxwoods, CT.
- Basner M., Müller U., Samel A. (2006): Nachtfluglärmwirkungen – Band 2 – Methodik, Akustik. Forschungsbericht DLR FB 2004-08/D, ISSN 1434-8454.
- Basner M., Buess H., Elmenhorst D., Gerlich A., Luks N., Maaß H., Mawet L., Müller E.-W., Müller U., Plath G., Quehl J., Samel A., Schulze M., Vejvoda M., Wenzel J. (2004): Effects of nocturnal aircraft noise (Volume 1). Executive summary, FB2004-07/E, ISSN 1434-8454, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Cologne, Germany.
- Destatis (2010): Statistisches Bundesamt - Deutschland Güterverkehr 2009. Starker Rückgang des Transportaufkommens um 11.2 %, Pressemitteilung Nr. 030 vom 21.01.2010.
- Diggle P., Heagerty P., Liang K.Y., Zeger S. (2002): *Analysis of Longitudinal Data*. Oxford University Press, Oxford.
- DIN 2719 (1987): Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. VDI-Richtlinie, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 45645- Teil 1 (1996): Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. VDI-Richtlinie, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 61672-1 (2003): Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002), Beuth-Verlag, Berlin.
- Dinges D.F., Powell J.W. (1985): Microcomputer analysis of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 17, 652-655.

- Elmenhorst E.-M., Elmenhorst D., Wenzel J., Quehl J., Müller U., Maaß H., Vejvoda M., Basner M. (2010): Effects of nocturnal aircraft noise on cognitive performance in the following morning: dose-response relationships in laboratory and field. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2010 Feb 9, DOI 10.1007/s00420-010-0515-5.
- Fahrenberg J, Hampel R., Selg H. (2001): FPI-R. Das Freiburger Persönlichkeitsinventar. 7. Auflage, Göttingen: Hogrefe
- Fahrmeir L., Kneib, T., Lang, S. (2007): *Regression*. Springer Verlag, Heidelberg.
- Fasold W., Vere, E. (1998): *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Fidell S., Howe R., Tabachnick B. G., Pearsons K., Sneddon M. (1995): Noise-induced sleep disturbance in residences near two civil airports (Rep. No. NASA Contractor Report 198252). Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-001, U.S.A.: NASA.
- Fields J.M., DeJong R.G., Gjestland F., Flindell I.H., Job, R.F.S., Kurra S., Lercher P., Valle, M., Guski R., Felscher-Suhr U., Schuemer R. (2001): Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242, 641-679.
- Fields J.M. (1984): The effect of number of noise events on people's reactions to noise: An analysis of existing survey data. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93, 2753-2763.
- Fields J.M., Walker J.G. (1982): The response to railway noise in residential areas in Great Britain. *Journal of Sound and Vibration*, 85, 177-255.
- Greiser E., Greiser C., Janhsen K. (2007): Night-time aircraft noise increases prevalence of prescriptions of antihypertensive and cardiovascular drugs irrespective of social class - The Cologne-Bonn Airport study. *Journal of Public Health*, 15, 327-37.
- Griefahn B., Basner M., Bröde P., Robens S. (2008): Development of a sleep disturbance index (SDI) for the assessment of noise-induced sleep disturbances. *Somnologie*, 12, 150-157.

- Griefahn B., Schütte M., Samel A., Bisping R. (2007): Lärmbedingte Schlafstörungen: Verkehrslärmarten, Frequenzspektren, temporäre Verkehrsruhe. Schlussbericht, Forschungsverbund ‚Leiser Verkehr‘, Bereich 2000 ‚Lärmwirkungen‘, Einzelaufgabe 2311.
- 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, 129-140.
- 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, 129-140.
- Griefahn B., Schuemer-Kohrs A., Schuemer R., Moehler U., Mehnert P. (2000): Physiological, subjective, and behavioural responses during sleep to noise from rail and road traffic. *Noise and Health*, 3(9), 59-71.
- Griefahn B., Möhler U., Schuemer R. (Hrsg.) (1999): Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Straßen- und Schienenverkehr. München, SGS.
- Guski R. (1999): Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, 3, 45-56.
- Guski R., Schuemer R., Felscher-Suhr U. (1999): The concept of noise annoyance: how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, 223, 513-527.
- Guski R. (1987): Lärm - Wirkungen unerwünschter Geräusche. Hans Huber, Bern.
- Horne J. A., Pankhurst F. L., Reyner L. A., Hume K., Diamond I. D. (1994): A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. *Sleep*, 17, 146-159.
- Jarup L., Babisch W., Houthuijs D. et al. (2008): Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environmental Health Perspectives*, 116, 329-33.
- Job R.F.S. (1999): Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise and Health*, 3, 57-68.
- KleinAnfr 17/2308 (2010): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/ Die GRÜNEN vom 28.06.2010, Drucksache 17/2308.

- Kötz W.-D. (2004): Zur Frage der effektiven Schalldämmung von geöffneten Fenstern. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 51, 21-26.
- Marks A., Griefahn B. (2007): Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise. Noise and Health, 9(34),1-7.
- Marks A., Griefahn B. (2005): Railway noise – its effects on sleep, mood, subjective sleep quality and performance. Somnologie, 9, 68-75.
- Maßnahmen Lärmsanierung (2004): Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes - Gesamtkonzept der Lärmsanierung – Anhang 1. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, EW 15/14.86.15/114 DB 04.
- Miedema H.M.E., Oudshoorn C.G.M. (2001): Annoyance from traffic noise, Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environmental Health Perspectives, 109, 409-416.
- Miedema H.M.E., Vos H. (1999): Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. Journal of the Acoustical Society of America, 105, 3336-3344.
- Miedema H.M.E., Vos H. (1998): Exposure-response relationships for traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America, 104, 3432-3445.
- Möhler U., Liepert M., Schreckenber D. (2010): Zur Anwendung des Schienenbonus bei der Beurteilung von Verkehrsgeräuschen. Lärmbekämpfung, 5(2), 47-56.
- Öhrström E., Ögren M., Jerson T., Gidolf-Gunnarsson A. (2008): Experimental studies on sleep disturbances due to railway and road traffic noise. Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN). Mashantucket, Foxwoods, CT, USA, 471-478.
- Öhrström E., Skanberg A-B. (1996): A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: Annoyance and activity disturbance effects. Journal of Sound and Vibration, 193 (1), 39-47.
- Ortscheid J., Wende H. (2002): Lärmbelästigung in Deutschland - Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 49, 41-45.

- Pearsons K., Barber D., Tabachnic, B. G., Fidell, S. (1995): Predicting noise-induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 331-338.
- Pinheiro J., Bates D. (2009): *Mixed-Effects Models in S and S-Plus*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Planungsbüro Obermayer (1983): Interdisziplinäre Feldstudie II über die Besonderheiten des Schienenverkehrslärms gegenüber dem Straßenverkehrslärm. Bericht über ein Forschungsvorhaben zum Verkehrslärmschutzgesetz im Auftrag des Bundesministers für Verkehr (Forschungsnr. 70081/80), Band I: Hauptbericht, Band II: Anhang, Planungsbüro Obermayer, München.
- Quehl J., Basner M. (2008): Nächtlicher Flug-, Straßen- und Schienenverkehrslärm: Belästigungsunterschiede und kumulative Wirkungen. *Lärmbekämpfung*, 3(6), 240-243.
- Quehl J., Basner M. (2006): Annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: Laboratory and field-specific dose-response curves. *Journal of Environmental Psychology*, 26(2), 127-140.
- Quehl J. (2005): Effects of Nocturnal Aircraft Noise – Volume 4– Psychological Effects. Forschungsbericht DLR FB 2004-10/E, ISSN 1434-8454.
- Rechtschaffen A., Kales A., Berger R.J. et al. (1968): A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Public Health Service, U.S. Government, Printing Office Washington, D.C.
- Samn S.W., Pirelli L.P. (1982): Estimating aircraft fatigue: a technique with application to airlift operations. Technical Report SAM-TR-82-21, USAF School of Medicine, Brooks AFB, TX.
- Schapkin S.A., Falkenstein M., Marks A., Griefahn B. (2006): Executive brain functions after exposure to nocturnal traffic noise: effects of task difficulty and sleep quality. *European Journal of Applied Physiology*, 96, 693-702.
- Schick A. (1997): *Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung*. Pabst Science, Lengerich.
- Schreckenber D., Möhler U., Liepert M. (2010): Gilt der Schienenbonus auch während der Abendzeit? *Lärmbekämpfung*, 5(2), 57-63.

- Schuemer R. (2003): Belästigungswirkung von Schienenverkehrslärm. In Schuemer, R., Schreckenber, D., Felscher-Suhr, U. (Hrsg.). Wirkungen von Schienen- und Straßenverkehrslärm. Bochum: Zeus GmbH. Online verfügbar unter: <http://www.verkehrslaermwirkung.de/03schstr.pdf> (Stand: 23.03.2010).
- Stallen P.J. (1999): A theoretical framework for environmental noise annoyance. *Noise and Health*, 3, 69-79.
- Umweltbundesamt (2010): Umweltbundesamt - Lärmbonus bei der Bahn? - Ist die Besserstellung der Bahn im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern noch gerechtfertigt? Texte Nr. 23/2010, UBA-FBNr: 001338, Förderkennzeichen: 3708 51 102.
- Umweltbundesamt (2009): Verkehr: Straßen- und Schienenlärm, Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/laerm/strassen-und-schienen-verkehr.htm>. (Stand: 25.03.2010).
- Umweltbundesamt (2008): Umweltbewusstsein in Deutschland 2008. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadPrint.do?ident=17075> (Stand: 25.03.2010).
- Weinstein N.D. (1982): Community noise problems: evidence against adaptation. *Journal of Environmental Psychology*, 2, 87-97.
- Zimmer K., Ellermeier W. (1998): Konstruktion und Evaluation eines Fragebogens zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit. *Diagnostica*, 44, 11-20.

