

Macht Schienenlärm krank?

**Studie des [Universitätsklinikums Freiburg](#) zur
Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen
bei Exposition gegenüber Schienenlärm
unter besonderer Berücksichtigung
der DB-Trasse Basel-Offenburg
(und der Haltbarkeit des Schienenbonus)**



Regionalverband Südlicher Oberrhein
Planen. Beraten. Entwickeln.

Freiburg, April 2010

Herausgeber:

Regionalverband Südlicher Oberrhein
Reichsgrafenstr. 19
79102 Freiburg
Tel. +49(0)761-70327-0, Fax +49(0)761-70327-50
rvso@region-suedlicher-oberrhein.de
www.region-suedlicher-oberrhein.de

April 2010

© Regionalverband Südlicher Oberrhein 2010

Schutzgebühr: 12,50 Euro (zzgl. Porto)

erarbeitet

im Auftrag des

Regionalverbandes Südlicher Oberrhein

von



UNIVERSITÄTS
FREIBURG KLINIKUM

Institut für Umweltmedizin & Krankenhaushygiene
Breisacher Straße 115b
D-79106 Freiburg im Breisgau

Prof. Dr. Volker Mersch-Sundermann

Institutsdirektor
Projekt-Monitoring
volker.mersch-sundermann@uniklinik-freiburg.de
Tel.: ++49 (0)761 270 8205

Prof. Dr. Stefan Schmidt

Leiter der Sektion Komplementärmedizinische
Evaluationsforschung
Projektleitung (Diskussion)
stefan.schmidt@uniklinik-freiburg.de
Tel.: ++49 (0)761 270 8305

Dipl. Psych. Christin Adrian

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Projektkoordination (Literaturrecherche, Datenextraktion,
Methodik, Ergebnisse,
Diskussion)
christin.adrian@uniklinik-freiburg.de
Tel.: ++ 49 (0)761 270 8306

Cand. med. Sibylle Grimm

Medizinische Doktorandin
Projektmitarbeit (Theoretischer Hintergrund, Reviews
zu Schlaf, Leistung und physiologischen Parametern)
sibylle.grimm@uniklinik-freiburg.de
Tel.: ++ 49 (0)761 270 8313

Dipl. phys. Matthias Braeunig

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Projektberatung & Schienenlärmexhibit
matthias.braeunig@uniklinik.freiburg.de
Tel ++ 49 (0)761 270 8308

Cand. psych. Julian Schöner

Wissenschaftliche Hilfskraft
Formatierung, Layout, Graphik, Datenextraktion
(Tabellen)
julian.schoener@uniklinik-freiburg.de
Tel.: ++ 49 (0)761 270 8312

Ein besonderer Dank für wertvolle Hinweise –insbesondere zum rechtspolitischen und juristischen Kontext–
sowie für die kritische Diskussion an

Prof. Dr. Reinhard Sparwasser

Rechtsanwalt, Fachanwalt für Verwaltungsrecht
Sparwasser & Heilshorn
Rechtsanwälte Partnerschaft
Mozartstr. 30, 79104 Freiburg
info@shp-rechtsanwaelte.de
Tel.: ++ 49 (0)761 368888-0

Vorwort

Zu lange wurde unterschätzt, wie Schienenlärm den Mensch belastet. Dabei wird Lärm – im Gegensatz zu anderen Umweltbelastungen – mit dem anhaltenden Verkehrswachstum weiter zunehmen, und zwar zur empfindlichen Nachtzeit noch stärker als am Tag. Die Lärmbetroffenen fordern spürbare Lärmverminderung und besseren Gesundheitsschutz.

Der Aus- und Neubau der Rheintalbahn in Südbaden ist in der Bevölkerung und in der Politik das zentrale Thema und erhitzt bekanntermaßen seit Jahren die Gemüter. Die Rheintalbahn ist für den gesamten Oberrhein die derzeit dringlichste verkehrs- und strukturalpolitische Maßnahme. Dabei haben die Fragen des Lärmschutzes eine maßgebliche Bedeutung für die regionale Akzeptanz dieses „Jahrhundertbauwerkes“.

Ausgehend von der sog. Bad Krozinger Erklärung der Region am Oberrhein und Hochrhein im Jahr 2005, dass die Rheintalbahn sowohl menschen- als auch umweltgerecht geplant und betrieben werden muss, hat der Regionalverband Südlicher Oberrhein auf fachlicher und politischer Ebene gewirkt und eine Vielzahl von Impulsen gegeben. Dies geschah mit dem Ziel dem Thema Lärm und seine Auswirkung auf den Raum die notwendige Berücksichtigung beizumessen.

Welche Auswirkungen ein transeuropäischer Schienenverkehrskorridor durch den dichtbesiedelten Oberrhein haben wird, ist zum heutigen Tag nicht absehbar – aber eines ist sicher: Es wird laut, wenn zwischen 22 Uhr und 6 Uhr 155 bzw. nach neuester Prognose für 2025 165 Güterzüge die Rheintalbahn passieren werden.

In Deutschland ist der Schienenbonus eines der Kernprobleme: Zur Ermittlung des erforderlichen Lärmschutzes bei der Ausbauplanung wird in den Planfeststellungsunterlagen der sogenannte *Schienenbonus* in Höhe von minus 5 dB(A) abgezogen. Dieser *Schienenbonus* beruht auf sozialwissenschaftlichen Studien aus den 70er-/80er-Jahren. Die zugrundeliegenden lärmtechnischen Annahmen berücksichtigen aber nicht den neueren Stand der Lärmwirkungsforschung hinsichtlich der gesundheitlich schädlichen Auswirkungen des Schienenverkehrslärms, besonders zur Nacht.

Auf Initiative des Regionalverbandes sagte das Bundesverkehrsministerium im Frühjahr 2006 zu, Studien in Auftrag zu geben, um die Frage gesundheitsschädigender Auswirkungen von Schienenverkehrslärm zu untersuchen und auf der Grundlage dieser Studienergebnisse den Schienenbonus zu überprüfen. Trotz mehrmaliger Erinnerungen sind die zugesagten Studienergebnisse bislang nicht vorgelegt worden.

Das Bundesverkehrsministerium wies in einem Schreiben vom November 2008 lapidar darauf hin, die Bundesregierung werde „den Erkenntnisstand der Lärmwirkungsforschung in diesem Sektor mit hoher Aufmerksamkeit beobachten.“

Aufgrund der bisherigen (Ent-)Haltung des Bundesverkehrsministeriums war zunehmend der Eindruck entstanden, dass die Überprüfung des Schienenbonus keine Priorität hat, um möglichst die anhängigen Planfeststellungsverfahren noch mit dem Schienenbonus zu einem rechtskräftigen Ende zu bringen.

Um auf diesem Gebiet neue Impulse in der politischen Diskussion um den richtigen Lärmschutz zu setzen, veranstaltete der Regionalverband Südlicher Oberrhein gemeinsam mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Juli 2008 den *Ersten Schienenlärmkongress*, bei dem hochrangige Fachleute aus Wissenschaft und Justiz zu verschiedenen Fragen der Lärmreduktion, Lärmmedizin und der Rechtsprechung Stellung nahmen und diskutierten. Ein wesentliches Ergebnis war, dass der Verordnungsgeber einen möglicherweise veränderten Stand der Lärmwirkungsforschung beachten und berücksichtigen müsse. Hierfür seien aber gesicherte Erkenntnisse notwendig, um den Schienenbonus zu kippen.

Aufgrund der bei diesem Kongress gewonnenen Beurteilung beauftragte der Regionalverband Südlicher Oberrhein im Dezember 2008 das Institut für *Umweltmedizin und Krankenhaushygiene* des Universitätsklinikums Freiburg, mit der Erarbeitung einer Studie, die den (weltweit) „anerkannten Erkenntnisstand der Lärmwirkungsforschung im Bereich Schienenlärm“ (und der Haltbarkeit des Schienenbonus) darstellt.

Die Ergebnisse dieser Studie wurde am 30. April 2010 in der Albert-Ludwigs-Universität beim *Zweiten Schienenlärmkongress* einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt und wissenschaftlich sowie (fach-)politisch diskutiert.

Die Studienerkenntnisse setzen sowohl neue politische als auch fachliche und juristische Impulse für die in der Koalitionsvereinbarung der Bundesregierung vom Oktober 2009 postulierten stufenweisen Abschaffung des Schienenbonus.

Danken möchten wir der Industrie- und Handelskammer Südlicher Oberrhein sowie den Städten und Gemeinden Offenburg, Lahr, Ringsheim, Herbolzheim, Kenzingen, Freiburg und Bad Krozingen für ihre Finanzierungsbeteiligung, ohne die das Projekt nicht durchzuführen gewesen wäre.

Unser besonderer Dank gilt dem Direktor des Instituts für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene der Universität Freiburg, Herrn Prof. Dr. Volker Mersch-Sundermann und seinen Mitarbeitern, durch deren Arbeit der wissenschaftlich gesicherte Erkenntnisstand hergestellt werden konnte.

Freiburg im Breisgau, im April 2010



Otto Neideck

Verbandsvorsitzender



Dr. Dieter Karlin

Verbandsdirektor

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	17
2.	Einleitung	21
3.	Theoretischer Hintergrund	24
3.1	Rechtliche Grundlagen	24
3.1.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz und die Verkehrslärmschutzverordnung.....	24
3.1.1.1	§ 2 Immissionsgrenzwerte	24
3.1.2	Schienenbonus	25
3.2	Physikalische Grundlagen	26
3.2.1	Was ist Schall.....	27
3.2.2	Schalldruckpegel	29
3.2.3	Äquivalenter Dauerschallpegel	30
3.2.4	Beurteilungspegel.....	31
3.2.5	Frequenzen	32
3.2.6	Lautstärke und Lautheit.....	33
3.3	Lärm: Messung und Berechnung.....	34
3.3.1	Lärmmessung	35
3.3.2	Lärmberechnung	37
3.4	Die menschliche akustische Wahrnehmung	38
3.5	Gesundheitsbegriff	43
3.6	Schallwirkung	43
3.6.1	Aurale Wirkung von Schall.....	46
3.6.2	Extra-aurale Wirkung von Schall.....	50
3.6.2.1	Moderatoren	51
3.6.2.2	Belästigung	53
3.6.2.3	Störung der Kommunikation.....	57
3.6.2.4	Beeinträchtigung der Leistung	58
3.6.2.5	Schlafstörungen.....	60
3.6.2.6	Schlaf, Schlafstadien und Schlafstruktur	61
3.6.2.7	Verkehrslärm bedingte Schlafstörungen	62
3.6.2.8	Endokrine und autonome Störungen	65
3.6.2.9	Herz-Kreislauf-Erkrankungen.....	70
4.	Methoden	74
4.1	Begründung und Zielsetzung der Arbeit	74

4.2	Fragestellungen.....	74
4.3	Wissenschaftliches Vorgehen	75
4.3.1	Problemformulierung	76
4.3.2	Datensammlung	76
4.3.2.1	PsycInfo.....	77
4.3.2.2	Psyndex.....	78
4.3.2.3	Web of Science.....	78
4.3.2.4	PubMed bzw. PubMedCentral inklusive Medline	79
4.3.2.5	Science Direct.....	79
4.3.2.6	Dissertationen.....	79
4.3.2.7	Handsuche	81
4.3.2.8	Direkter Kontakt zu Autoren	81
4.3.2.9	Kongressbeiträge.....	81
4.3.2.10	Sonstige Quellen	81
4.3.2.11	Literaturverweise	82
4.3.3	Datenbewertung	82
4.3.3.1	Ausschluss von Studien.....	82
4.3.3.2	Internes Bewertungssystem.....	86
5.	Ergebnisse.....	88
5.1	Deskription der Studien	88
5.1.1	Belästigung (N=87, -15 fehlen)	111
5.1.1.1	Dosis-Wirkungsbeziehungen	113
5.1.1.2	Moderatoren	126
5.1.1.3	Vergleich verschiedener Lärmquellen	135
5.1.1.4	Verhaltensänderungen (N=9)	145
5.1.1.5	Lärm und/oder Vibration (N=11)	147
5.1.1.6	New-Infrastructure-Effect	149
5.1.2	Psychische Variablen (N=14).....	152
5.1.3	Gestörtheit bei Aktivitäten (N=29)	154
5.1.4	Schlaf (N=39).....	159
5.1.4.1	Feldstudien (N=20).....	161
5.1.4.2	Laborstudien N=(17)	168
5.1.5	Leistung (N=29).....	177
5.1.5.1	Feldstudien (N=5+2).....	177
5.1.5.2	Laborstudien (N=19-2)	179
5.1.5.3	Ergebnisse	181

5.1.6	Kinder (N=14)	190
5.1.7	Physiologische Reaktionen (N=10)	193
5.1.7.1	Feldstudien (N=3-1)	194
5.1.7.2	Laborstudien (N=7+1)	195
6.	Diskussion	199
6.1	Schlussfolgerungen aus den Reviews	199
6.1.1	Belästigung	200
6.1.2	Gestörtheit von Aktivitäten.....	205
6.1.3	Kinder	206
6.1.4	Schlaf	207
6.1.5	Leistung.....	210
6.1.6	Physiologische Parameter.....	211
6.1.7	Resümee	212
6.2	Allgemeine Methodenkritik.....	212
6.2.1	Interne Validität.....	213
6.2.2	Externe Validität.....	214
6.2.3	Fehlende Vergleichbarkeit der Studien	215
6.3	Skizze einer „optimalen Studie“	216
6.4	Wissenschaftliche Bewertung des Schienenbonus.....	217
6.4.1	Die Festlegung von Grenzwerten zum Schutz vor lärmbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen.....	217
6.4.2	Anwendung des Mittelungspegels als alleinigen Grenzwert.....	219
6.4.3	Der Schienenbonus	221
6.4.3.1	Schienenbonus und Belästigungsforschung.....	221
6.4.3.2	Schienenbonus und unbewusste physiologische Reaktionen/Schlafforschung	223
6.4.4	Zusammenfassung	226
6.4.5	Abschließende Überlegungen zum Risikomanagement für den Zusammenhang zwischen Schienenlärm und manifesten Gesundheitsstörungen	227
6.5	Exhibit.....	232
7.	Bibliographie.....	233

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aurale und extra-aurale Lärmfolgen (Griefahn 1996)	21
Abb. 2: Lärmbelästigung betroffener Anwohner im zeitlichen Verlauf	22
Abb. 3: Luftschall.....	27
Abb. 4: Schallausbreitung.....	27
Abb. 5: Darstellung eines Tons	28
Abb. 6: Darstellung eines Geräusches (Schulze und Hauswald 2005)	28
Abb. 7: Pegelbereiche für Lärm in der Umwelt (Der Sachverständigenrat für Umweltfragen 1999)	29
Abb. 8: Beispiel für einen Mittelungspegel einer LKW Vorbeifahrt (Schulze und Hauswald 2005) .	30
Abb. 9: Kurven gleicher Lautstärke und Frequenzbewertungskurven A,B,C (nach Robinson und Davidson, 1967).....	32
Abb. 10: Frequenzbewertungskurve A (Rothe 2006)	33
Abb. 11: Kurven gleich empfundener Lautstärke	34
Abb. 12: Prinzipskizze von einem Mikrofon	35
Abb. 13: Frequenzempfindlichkeit des Gehörs4.....	36
Abb. 14: Schallmesser und deren prinzipieller Aufbau	36
Abb. 15: Skizze Lindsey & Norman: Mittelohr und Ohrschnecke	38
Abb. 16: Schema der geschlossenen Wirkungskette zwischen Schall und ausgelöster vegetativer Reaktion (Spreng 2000).....	40
Abb. 17: Lärm im Schaltkreis über die Amygdala (Spreng in Ising u. a. 2001)	41
Abb. 18: Funktionsabläufe bei Eustress (mod. nach Seefeld 1989)	42
Abb. 19: Funktionsabläufe nach Distress (mod. nach Seefeld 1989))	42
Abb. 20: Verschiedene Ebenen von Lärmwirkungen (Ising u. a. 2001).....	44
Abb. 21: Auslöseschwellen für Schallwirkungen (Griefahn 1996).....	45
Abb. 22: Beziehung zwischen Belastungsfaktoren, Moderatorvariablen und Beanspruchungsparametern des Umweltlärms (Jansen und Notbohm 1994).....	46
Abb. 23: Typische Schallpegel mit Ankerbeispielen	47
Abb. 24: Pegelgrenzen für aurale Lärmwirkungen	48
Abb. 25: Typisches Audiogramm einer Person mit Hörschwellenverschiebung nach chronischer Lärmbelastung im Vergleich mit einer Referenzperson ohne Hörverlust.....	49
Abb. 26: Komplexer Kreislauf extra-auraler Lärmwirkungen (Ising und Kruppa 2001)	50
Abb. 27: New-Infrastructure-Effect (Lambert, Champelovier und Vernet 1998)	53
Abb. 28: Lärmbelästigung der Bevölkerung nach Geräuschquellen 2004 (UBA Berlin, 2004).....	54
Abb. 29: Highly annoyed people (%) in Abhängigkeit vom Ldn, bezogen auf Fluglärm (oben), Straßenlärm (mittig) und Schienenlärm (unten) (Miedema und Vos 1998)	56
Abb. 30: Zusammenhang zwischen dem gerade noch zulässigen Störgeräuschpegel und dem Sprecher-Hörer-Abstand für eine gute Sprachverständlichkeit und eine entspannte	

Unterhaltung (Kurve 1) und eine gerade noch akzeptable Sprachverständigung und angehobene Sprechweise (Kurve 2)	58
Abb. 31: Prozentsatz von Schülern, deren Lesefähigkeiten unterhalb ihrer Klassenzugehörigkeit lag (Green, Pasternack und Shore 1982)	59
Abb. 32: Zusammenhang zwischen dem Leseverständnis (reading comprehension) und Fluglärm (Stansfeld u. a. 2005).....	60
Abb. 33: Typisches Schlafhypnogramm unter Ruhebedingungen	61
Abb. 34: Typisches Schlafzyklogramm bei nächtlichem, intermittierenden Lärm	63
Abb. 35: Psychophysiologisches Stressmodell nach Henry (1992)	66
Abb. 36: Das Lärm-Stress-Modell: Reaktionsalternativen bei unterschiedlich intensiver Lärmbelastung und Habituation an den Lärm (Ising u. a. 1990).....	67
Abb. 37: Einfluss der Zirkadianrhythmik auf die ACTH- und Cortisolsekretion (Voigt 1996)	68
Abb. 38: Mittlerer Verlauf der kardiovaskulären Reaktionen auf die Einwirkung von rosa Rauschen, Straßenverkehrs- und Impulsgeräuschen (Dauer je 19 Sekunden, Leq: 62-80 dB(A)) (Griefahn und Di Nisi 1992).....	69
Abb. 39: Mittlerer Verlauf der kardiovaskulären Reaktionen bei Personen unterschiedlicher Lärmempfindlichkeit auf die Einwirkung kurz andauernder Geräusche (Dauer je 19 sec., Leq: 62-80 dB(A)) (Griefahn und Di Nisi 1992).....	70
Abb. 40: Modell einer kausalen Beziehung zwischen der chronischen Einwirkung von Lärm und der Manifestation von Herz-Kreislaufkrankungen (Babisch 2002).....	72
Abb. 41: Phasen eines Forschungsreviews (in Anlehnung an Cooper, 1989, S. 15).....	75
Abb. 42: Flussdiagramm der ein- und ausgeschlossenen Studien	86
Abb. 43: Dosis-Wirkungskurven nach Schultz für elf Primärstudien (Schultz 1978)	115
Abb. 44: Aggregierte Dosis-Wirkungskurve nach Schultz für alle Datenpunkte (Schultz 1978)	115
Abb. 45: Vergleich der alten und neuen Regressionskurve aus den erweiterten Daten von Schultz (Fidell, Barber und Schultz 1991).....	117
Abb. 46: Dosis-Wirkungskurven für die drei Hauptverkehrslärmquellen (Miedema und Vos, 1998)	118
Abb. 47: Synthetisierte quellenspezifische Dosis-Wirkungskurven (Miedema und Vos 1998)	120
Abb. 48: Geschätzte Dosis-Wirkungskurven von Schienenlärm und Straßenlärm (Öhrström u. a. 2007)	125
Abb. 49: Schallpegelabhängige Belästigung in Zusammenhang mit der Anzahl der Lärmereignisse (Sörensen und Hammar 1983)	129
Abb. 50: Schwelleneffekt für die Anzahl der Lärmereignisse (Fields und Walker 1982b)	130
Abb. 51: Belästigung in Abhängigkeit von verschiedenen Zügen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Vos 2004)	130
Abb. 52: Schallpegelabhängige Belästigung und Distanz zum Gleis (Öhrström u. a. 2007)	131
Abb. 53: Tageszeitabhängige Belästigung (Schreckenbergs und Guski 2005).....	132
Abb. 54: Drei Pfadmodelle zu nicht akustischen Einflussfaktoren (Lam u. a. 2009)	134
Abb. 55: Belästigung durch verschiedene Lärmquellen (Niemann u. a. 2006)	136

Abb. 56: Regressionskurven der quellenspezifischen Belästigung (Miedema und Vos 1998)	137
Abb. 57: Lärmbelästigung in verschiedenen kombinierten Lärmbelastungssituationen (Basner u. a. 2008)	138
Abb. 58: Verwendung verschiedener Pegelmaße für Belästigungsreaktionen auf Schienen- und Straßenlärm (Öhrström u. a. 2007)	139
Abb. 59: Verschiedene Geräuschbelastungssituationen kombinierten Straßen- und Schienenlärms (Öhrström u. a. 2007)	139
Abb. 60: Lästigkeitsunterschiede für singuläre Quellen vs. kombinierte Geräuschquellenbelastung (Öhrström u. a. 2007)	140
Abb. 61: Lästigkeitsvergleich zwischen Straßen- und Schienenlärm (Öhrström u. a. 2005)	140
Abb. 62: Lästigkeitsvergleich in verschiedenen Geräuschbelastungssituationen (Öhrström u. a. 2005)	141
Abb. 63: Belästigungsvergleich mit verschiedenen Lärmquellen (Öhrström u. a. 2007)	141
Abb. 64: Totale Belästigung als Funktion des Lärmpegels über verschiedene Lärmquellen (Öhrström u. a. 2007)	142
Abb. 65: Durchschnittliche Belästigung verschiedener Lärmquellen als Funktion des Lärmpegels (Yano und Kobayashi 1990)	142
Abb. 66: Quellenspezifische Belästigungsunterschiede (Kurra, Morimoto und Maekawa 1999a)	144
Abb. 67: Verhaltensänderungen (Lambert, Champelovier und I. Vernet 1996)	146
Abb. 68: Vibrationsbestimmte Belästigung (Öhrström und Skånberg 1996)	148
Abb. 69: Reaktionen bezüglich Vibration in Abhängigkeit von der Distanz zum Gleis (Fields 1979)	149
Abb. 70: Pfadmodelle zu drei Messzeitpunkten (Prä, Post und FU) der Eröffnung einer neuen Bahnlinie (Lam und Au 2008)	151
Abb. 71: New-Infrastructure-Effect (Lambert, Champelovier und Vernet 1998)	152
Abb. 72: Gestörtheit von Aktivitäten durch Straßen- und Schienenlärm (Öhrström u. a. 2005) ...	156
Abb. 73: Schienenlärmbedingte Gestörtheitsreaktion während verschiedener Aktivitäten (Öhrström und Skånberg 1996)	158
Abb. 74: Vergleich des gemessenen Wertes (innen) und des quellenspezifischen berechneten Wert (innen) während der Schlafenszeit (Liepert u. a. 1999)	162
Abb. 75: Vergleich des gemessenen Wertes, und des errechneten Wertes _____,	163
Abb. 76: Struktur des Mittelungspegel (1h) für den Tag und den Nachtzeitraum von Schienen- und Straßenlärm (Liepert u. a. 1999)	163
Abb. 77: Spezifische Schlafstörung durch verschiedene Lärmquellen im Zusammenhang zum äquivalenten Dauerschallpegel (Moehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000)	165
Abb. 78: Der Effekt von Lärmpegeln auf die subjektive Schlafqualität (Griefahn, Marks und Robens 2006)	170
Abb. 79: Die Abhängigkeit der subjektiven Schlafqualität von Lärmquelle und Pegel (Basner u. a. 2008)	171

Abb. 80: Der Effekt von Lärmpegeln auf erfragte Müdigkeit (Marks und Griefahn 2005).	172
Abb. 81: Änderung physiologischer Schlafparameter durch verschiedene Verkehrslärmarten. (Griefahn u. a. 2004).....	173
Abb. 82: Kumulative Effekte von Verkehrslärm in Einzel (1x), Doppel (2x) und Dreifach (3x) Expositions Nächten. Die Y-Achse zeigt den Unterschied zu der lärmfreien Kontrollnacht (Basner u. a. 2008).....	174
Abb. 83: Dosis-Wirkungsbeziehung für Aufwachreaktionen bezogen auf den Maximalpegel (Griefahn und Marks 2006).	175
Abb. 84: Zusammenhang zwischen dem äquivalenten Dauerschallpegel und dem Schlaffeffizienz- Index (Marks und Griefahn 2005).	176
Abb. 85: Stroop-Test.....	182
Abb. 86: Leistung der Probanden, nach nächtlicher Lärmbelastung durch Flug (AIR), Straßen (ROAD) und Schienenlärm (RAIL) (Basner u. a. 2009)	183
Abb. 87: Beispielhaftes Exemplar der Karten mit 1, 2, 3 und 4 Motiven (Hambrick-Dixon 1988)..	184
Abb. 88: Gedächtnistest; (Basner u. a. 2009).....	187
Abb. 89: Quotient aus der Zeit bis zur Lösungsangabe (vor der Lärmphase) und der Zeit bis zur Lösungsangabe (während bzw. nach der Lärmphase) (Maruyama 1964b)	188
Abb. 90: Die dreidimensionale Darstellung des Artikulationsindex (Izumiyama 1964)	189
Abb. 91: Vergleich der Leistungsbeeinträchtigung durch Schienenlärm und Sprachinterferenz (Klatte u. a. 2007).....	192
Abb. 92: Dosis-Wirkungskurven für psychische Gesundheit und Verhalten im Klassenraum als Funktion der Schallbelastung (Lercher u. a. 2002)	193
Abb. 93: Mittelwert inkl. Konfidenzintervalle (95 %) für die Herzfrequenz nach Verkehrslärm ohne Erwachen (Griefahn u. a. 2008)	197
Abb. 94: Überblick über die Struktur empirischer Primärarbeiten	199
Abb. 95: Struktur der Belästigungsdaten	200
Abb. 96: Struktur der Daten zu gestörten Aktivitäten.....	205
Abb. 97: Struktur der Daten zu Lärmwirkungen bei Kindern	206
Abb. 98: Struktur der Daten zu Schlaf.....	207
Abb. 99: Evidenz der Daten	212
Abb. 100: Relation der internen zur externen Validität mit passendem Studiendesign (Wikipedia.org)	213
Abb. 101: Mittelungspegel im Vergleich.....	219
Abb. 102: Dosis-Wirkungsbeziehungen der drei Lärmquellen im Vergleich (Yano, Sato und Moriyama 2007)	222
Abb. 103: Psychophysiologisches Lärmwirkungsmodell (nach Babisch 2000)	224
Abb. 104: Geräuschbelastung durch verschiedene Verkehrslärmquellen.....	231
Abb. 105: Überblick über die Literaturdatenbank.....	232

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Immissionsgrenzwerte nach der Bundesimmissionsschutzverordnung	25
Tab. 2: Zu- und Abschläge für den Beurteilungspegel (Schuschke und Maschke 2002)	31
Tab. 3: Schwellen für Sofortreaktionen bei Verkehrslärm (Maschke, Druba und Pleines 1997).....	65
Tab. 4: Numerische Angabe der Artikel aus Dissertationsquellen	80
Tab. 5: Fremdsprachen (Japanisch, Russisch, Italienisch, Französisch) (b).....	83
Tab. 6: Fehlende Verfügbarkeit (inkl. Subito → im deutschen Leihverkehr nicht erhältlich) (c)	84
Tab. 7: Körperliche Schäden (Hörschädigung) als untersuchte abhängige Variable (d).....	85
Tab. 8: Nicht fokussierte Zielgruppen (Bahnarbeiter anstatt Anwohner) (e).....	85
Tab. 9: Übersicht über alle gesammelten Studien zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Schienenlärm	90
Tab. 10: Empirische Arbeiten zu Belästigung	111
Tab. 11: Metaanalysen zu Lärm und Belästigung	114
Tab. 12: Überblick sozialwissenschaftlicher Fragebögen (Fidell, Barber und Schultz 1991).....	117
Tab. 13: Primärstudien der Metaanalyse (Miedema und Vos 1998).....	119
Tab. 14: Studien zum Dosis-Wirkungszusammenhang Schienenlärm und Belästigung.....	121
Tab. 15: Empirische Arbeiten zu psychischen Variablen	153
Tab. 16: Empirische Arbeiten zu Gestörtheit	154
Tab. 17: Empirische Arbeiten zu Schlaf	160
Tab. 18: Empirische Arbeiten zu Leistung	177
Tab. 19: Feldstudien: Probanden der Studien, lebten in durch Schienenlärm belastetem Umfeld	178
Tab. 20: Laborstudien I: Schlaflaborstudien, Lärmbelastung während der Nacht, nicht jedoch während der Testung	179
Tab. 21: Laborstudien II: Verkehrslärm während der Testung	180
Tab. 22: Empirische Arbeiten zu Schienenlärmwirkungen bei Kindern	190
Tab. 23: Empirische Arbeiten zu physiologischen Parametern	193
Tab. 24: Feldstudien zu physiologischen Parametern.....	195
Tab. 25: Laborstudien zu physiologischen Parametern	196
Tab. 26: Einflussfaktoren auf die Lärmerfassung, -berechnung und deren Wirkung.	215
Tab. 27: Berechnete Geräuschbelastung der Bevölkerung (alte Länder) durch Straßen- und Schienenverkehr (Umweltbundesamt, Berlin)	230

Im Rahmen des Projekts „Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm unter besonderer Berücksichtigung der DB-Trasse Basel-Offenburg (und der Haltbarkeit des Schienenbonus“) wurde ein beratender Wissenschaftlicher Beirat eingesetzt, der aus folgenden Mitgliedern bestand.

Wissenschaftlicher Beirat:

1. Prof. Dr. med. Barbara Griefahn
Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund
Ardeystraße 67,
44139 Dortmund
Tel.: ++49(0)231/1084 222
griefahn@ifado.de

2. Prof. Dr. physiol. Manfred Spreng
(ehemals Universität Erlangen, Institut für Physiologie und Biologie)
Privat: Lange Zeile 121,
91054 Erlangen,
Tel.: ++49(0)9131/56638
spreng@physiologie1.uni-erlangen.de

3. Dr. Ing. Wolfgang Babisch
UBA Berlin Dessau
Correnplatz 1
14195 Berlin
Tel.: ++49(0)30/8903 1370
wolfgang.babisch@uba.de

4. Prof. Dr. med. Roland Laszig
Universitätsklinik Freiburg
79106 Freiburg
Tel.: ++49(0)761/270 4206
roland.laszig@uniklinik-freiburg.de

Die Aufgaben des Beirats lagen vor allem bei einer beratenden Funktion hinsichtlich Projektplanung und -gestaltung. Zu diesem Zweck traf sich der Beirat mit der Projektgruppe am 8.4.2009 zu einer ersten richtungsgebenden Konsultation und Orientierung. Bei diesem Treffen wurde nach einem kurzen Input zu eigenen Forschungsschwerpunkten seitens der Experten, die Möglichkeiten, Ziele, Zeitpläne und auch Beschränkungen (durch zeitliche Begrenzungen oder z.B. aufgrund der dünn ausgeprägten empirischen Datenlage im Lärmwirkungsbereich zu Schienenlärm) der geplanten Studie angesprochen und diskutiert.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die teilnehmenden Lärmwirkungsexperten zu keinem Zeitpunkt der Projektdurchführung im Sinne eines qualitätssichernden Organs tätig geworden sind oder in einem solchen Sinn verstanden bzw. herangezogen werden dürfen. Sie stehen weder für inhaltliche noch strukturelle oder formale Aspekte der Studie ein. Ihr Beitrag zum durchgeführten Projekt bestand ausnahmslos in einer beratenden Funktion zu Beginn der Projektdurchführung. Alle Teile des Berichts

unterliegen in ihrer Inhaltlichkeit und Form der Verantwortung der Projektleiter Prof. Dr. Mersch-Sundermann und Prof. Dr. Stefan Schmidt in Zusammenarbeit mit der im Bericht zu Beginn aufgeführten Projektgruppe des Instituts für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene.

1. Zusammenfassung

Hintergrund

Das Projekt „*Macht Schienenlärm krank? Studie des Universitätsklinikums Freiburg zur Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm unter besonderer Berücksichtigung der DB-Trasse Basel-Offenburg (und der Haltbarkeit des Schienenbonus)*“ entstand im Auftrag des Regionalverbands Südlicher Oberrhein im Kontext der politischen Diskussion über die zu erwartende Lärmbelastung durch den Bau eines dritten und vierten Gleises entlang der bestehenden Trasse am Oberrhein. In diesem Rahmen stellt der vorliegende Bericht eine Übersicht über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu den gesundheitlichen Auswirkungen des Schienenlärms auf den Menschen zusammen. Da der Schienenbonus mit einer Besserstellung des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr um 5 dB(A) erhebliche Bedeutung für den vom Vorhabenträger vorzusehenden Lärmschutz, zum Teil sogar für die Trassenwahl hat, versucht die Arbeit außerdem eine wissenschaftliche Beurteilung der Rechtfertigung des Schienenbonus auf der Basis der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse abzugeben.

Datenquellen

In einer systematischen Literaturrecherche, die sechs Hauptquellen einschloss, wurden in einem mehrstufigen Screening-Prozess der aufzufindenden Literatur schließlich 119 publizierte Arbeiten zum Bereich „Schienenlärmauswirkungen auf die menschliche Gesundheit“ zusammengetragen. Es wurden ausschließlich empirische Studien zum Zusammenhang ‚Schienenlärm und Gesundheit‘ in den Review eingeschlossen.

Datenextraktion

Aus jedem Artikel wurden die wesentlichen Angaben zu Autor, Jahr, Studiendesign, Stichprobenzahl, Lärmquellen, abhängige Variablen (Indikatoren für Gesundheit/Krankheit) und unabhängige Variablen (Lärmbelastung) einschließlich ihrer Operationalisierung (Erfassung/Messmethodik) sowie statistische Berechnungsverfahren und methodische Qualität der Studien exzerpiert. Die Heterogenität der untersuchten Parameter und ihrer Operationalisierungen sowie die lückenhafte Berichterstattung wesentlicher Kenngrößen in den Publikationen ließ die Berechnung einer Metaanalyse nicht zu.

Ergebnisse

Diese Übersichtsarbeit schließt die Daten von 119 empirische Primärarbeiten über die Auswirkungen von Schienenlärm auf die Gesundheit gemäß eines ganzheitlichen Gesundheitsbegriffs nach der Definition der WHO ein. Dabei wurden separate Zusammenfassungen für sieben gesundheitlich relevante Aspekte der Lärmwirkungsforschung verfasst. Diese sind im Einzelnen: Belästigung, Gestörtheit von Aktivitäten, Schlaf, Leistung, physiologische Reaktionen, Herz-Kreislauferkrankungen und Kinder. Diese Themen erstrecken sich dabei auf einem Kontinuum von eher subjektiven und selbst berichteten Konstrukten wie etwa der Belästigung und dem Gestörtheitsempfinden bis hin zu manifesten, medizinisch-biologischen Aspekten im Bereich der physiologischen und endokrinen Reaktionen und Herz-Kreislauferkrankungen. Die festgestellte empirisch-wissenschaftliche Evidenz nimmt von den subjektiven zu den objektiven Parametern zunehmend ab.

Um die Aussagekraft der Forschungsbefunde bewerten und einschätzen zu können, wurde ein Bewertungssystem mit vier Evidenzstufen entwickelt, das sich an allgemeinen Modellen zur Evidenzbewertung von wissenschaftlichen Studien orientiert. Diese Evidenzstufen sind wie folgt gestaffelt:

- *Stufe 1 (+++)*
Sekundärstatistischer Nachweis
- *Stufe 2 (++)*
Eindeutige Befunde der Primärstudien
- *Stufe 3 (++/-)*
Widersprüchliche Befunde der Primärstudien mit Tendenz in eine Richtung, oder insgesamt nur schwacher Tendenz in eine Richtung
- *Stufe 4 (+/-)*
geringe Evidenz: zu wenige Studien, widersprüchliche Befunde

Dabei ergaben sich für die sieben erfassten Konstrukte folgende Ergebnisse auf bestehendem Evidenzniveau:

Belästigung

In 44 Studien konnte auf hohem Evidenzniveau ein positiver Dosis-Wirkungszusammenhang zwischen dem Schallpegel von Schienenlärm und subjektiv erfragter Belästigung bestätigt werden. Eine Mehrzahl von Moderatoren, dabei vor allem der Schallpegel und die Distanz von der Schallquelle zum Immissionsort, spielen eine wesentliche Rolle in diesem Dosis-Wirkungszusammenhang [*Stufe 1 (+++)*].

Gestörtheit von Aktivitäten

Im Vergleich der drei Hauptverkehrsquellen (Straße, Schiene, Flugverkehr) ergeben sich in 29 Publikationen widersprüchliche Befunde, die von der Art der gestörten Aktivität abhängen. Schienenlärm scheint vor allem störender während Tätigkeiten im Zusammenhang mit Kommunikation innen und außen, weniger störend aber hinsichtlich der allgemeinen Störung der Ruhe und Erholung, und zwar tags wie auch nachts. Vibration spielt für Schienenlärmanwohner unter Berücksichtigung verschiedener Moderatorvariablen eine merkliche Rolle, wobei die Variablen Lärm und Vibration in ihrem Einfluss auf Belästigungsreaktionen interagieren [*Stufe 2 (++)*].

Schlaf

In 17 *Laborstudien* zu lärmbedingten Schlafstörungen hinsichtlich verschiedener Indikatoren (subjektive Schlafqualität, erfragte Müdigkeit, Dauer des Tiefschlafes und des REM-Schlafes, Aufwachreaktionen sowie Schlafeffizienz-Index) zeigt sich eine größere Beeinträchtigung des Schlafes durch Schienenlärm als durch Straßen- und Flugverkehrslärm. In den 18 *Feldstudien* dagegen korrelieren Schlafstörungskriterien (subjektiv empfundene Schlafstörungen, berichtete Einschlafschwierigkeiten und Aufwachreaktionen, sowie nächtlichen Körperbewegung) stets geringer mit stets geringer mit den Schallpegeln von Schienenlärm als mit denen von Straßen- und Fluglärm [*Stufe 2 (++)*].

Leistung

Hinsichtlich der Auswirkung von Schienenlärm auf verschiedene Leistungsvariablen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Lesefähigkeit, Verständnis, Rechenaufgaben, Textverständnis, Sprachverständlichkeit und Motivation) ergibt sich eine lediglich geringe Evidenz oder diese sind mit einer nur kleinen Studienzahl unzureichend belegt [*Stufe 3 (+ +/-)*].

Kinder

In Bezug auf schienenlärmbedingte Auswirkungen auf Kinder zwischen 4.5 und maximal 14 Jahren findet sich ebenfalls nur mangelnde Evidenz in Bezug auf die Indikatoren Lesefähigkeit, Vokalisation, (Text-/Sprach-)Verständnis, Gedächtnis- und Erinnerungsaufgaben, (Dauer-)Aufmerksamkeit, Rechnen, psychophysischer Stress und Motivation [*Stufe 3 (+ +/-)*].

Physiologische und endokrinologische Reaktionen

Laboruntersuchungen zum Zusammenhang zwischen Schienenlärm und physiologischen oder endokrinologischen Reaktionen wie etwa Herzfrequenz, Katecholamin- und Kortisolkonzentration im nächtlichen Urin, Fingerpulsamplitude, Hautwiderstand, Respiratorischer Sinus Arrhythmie sowie gesteigertem Blutdruck können zwar insgesamt nur schwache Veränderungen nachweisen, deuten aber allesamt auf eine lärmbedingte Sympathikusaktivierung hin. Langzeiteffekte durch lärmbedingte physiologische Veränderungen, die sich schließlich in chronischer Form als Risikofaktoren für Herz-Kreislauferkrankungen manifestieren können, sind in Bezug auf Schienenlärm bislang kaum untersucht [*Stufe 4 (+/-)*].

Schlussfolgerung

Insgesamt ist eine unzureichende wissenschaftliche Evidenz im Bereich medizinischer, *objektiver* Indikatoren für die Auswirkungen von Schienenlärm festzustellen. Dem gegenüber steht eine breite Evidenz der *subjektiven* Belästigung und Gestörtheit durch den Zugverkehr bei steigendem Schallpegel. Die Heterogenität der erfassten Konstrukte und ihrer Erfassung (Operationalisierung) erschweren den Vergleich der Studienergebnisse.

Die bisherigen Untersuchungen zu Schienenlärm und damit das empirische Fundament des Schienenbonus beruhen auf veralteten, methodisch unzureichenden Daten, die sich zudem meist auf die Belästigungsforschung beschränken. Eine Festlegung von Immissionsgrenzwerten zum Schutz der Gesundheit darf sich aber nicht auf das subjektive Belästigungsempfinden allein begrenzen. Sie muss vielmehr auch objektive, biologische, sowie auch nicht bewusst wahrgenommene (physiologische) Faktoren einbeziehen, so zum Beispiel Parameter aus der Schlafforschung, Psychophysiologie und Leistungskriterien. Hier zeigen sich vor allem bei nächtlicher Exposition gegenüber Schienenlärm Störungen des Schlafverhaltens, die langfristig ein Gesundheitsrisiko darstellen. Die Wechselwirkung psychisch-subjektiver Variablen und objektiv-somatischer Reaktionen ist komplex und sollte angelehnt an theoretische Modelle (z.B. Babisch 2000) weitergehend empirisch untermauert werden.

Unzureichend erscheint in diesem Zusammenhang auch die Verwendung des Mittelungspegels als alleiniges Lärmschutzkriterium. Dieses Vorgehen lässt andere wesentliche Aspekte des Schienenlärms wie etwa den Maximalpegel, die Anstiegssteilheit und auftretende Lärm-Ruhe-Intervalle außer Acht, die für die gesundheitliche Wirkung jedoch bedeutsam sind.

Der Bedarf an gut kontrollierten, methodisch sauberen und auf objektiv messbare, medizinische Endpunkte ausgerichtete (möglichst auch Langzeit-) Untersuchungen im Bereich des Schienenlärms ist offensichtlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anwendung der Lärmzumutbarkeitskriterien der 16. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz mit der ausschließlichen Anwendung von Mittelungspegeln sowie einem Schienenbonus, wie sie 1990 auf Basis der damals vorliegenden Untersuchungen eingeführt wurden, unter Einbeziehung neuer Erkenntnisse sowohl nicht mehr sinnvoll als auch unhaltbar erscheint. Der aktuelle Kenntnisstand ergibt hinsichtlich des Vergleichs Schiene und Straße (so dieser überhaupt adäquat geleistet wird) je nach Untersuchungsbereich widersprüchliche Befunde. In den besonders wichtigen Bereichen zu manifesten Erkrankungen infolge von Lärm finden sich keine Vergleichsdaten. Beim Schienenlärm entsteht ein gesundheitliches Risiko vor allem durch eine regelmäßige Störung des Schlafes. Dieses Risiko wird durch den Schienenbonus, sowie dem Fehlen eines Grenzwertes für Maximalpegel, der mangelnden Berücksichtigung der Anstiegssteilheit und dem Fehlen einer Ruhezeitbewertung erhöht. Angesichts dieser Erkenntnisse ist sowohl der Vergleich als auch die einseitige Bevorzugung oder Benachteiligung eines Verkehrsmittels durch die gesetzliche Festlegung eines Bonus nicht angemessen.

2. Einleitung

*„Eines Tages wird der Mensch den Lärm
ebenso unerbittlich bekämpfen müssen
wie Cholera und die Pest“,*

äußerte sich bereits Robert Koch, der Mitte des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts lebte, nicht ahnend wie adäquat er die Folgen der zivilisatorischen Entwicklung damit eines Tages beschreiben würde.

Jedes Geräusch, das zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann, wird als Lärm bezeichnet. Dieser kann mit objektiven Messverfahren nur unzureichend erfasst werden, denn er stellt kein rein physikalisches Phänomen dar, sondern ist das Ergebnis der kognitiven Auseinandersetzung mit Geräuschen.

Aus umweltmedizinischer Sicht ist Lärm, sowohl aus intermittierenden als auch kontinuierlichen Quellen, eine der wichtigsten Ursachen für umweltbedingte Gesundheitsbeeinträchtigungen, -störungen und -schäden. Dies rührt daher, dass der menschliche Organismus ständig darauf vorbereitet ist, Schall, der nicht nur der Kommunikation, sondern auch als Orientierungs- und Alarmsignal dient, zu empfangen, und folglich kontinuierlich zu verarbeiten.

Dies wiederum kann zu adversen Wirkungen führen, die in aurale und extra-aurale Wirkungen unterteilt werden (siehe Abb. 1).

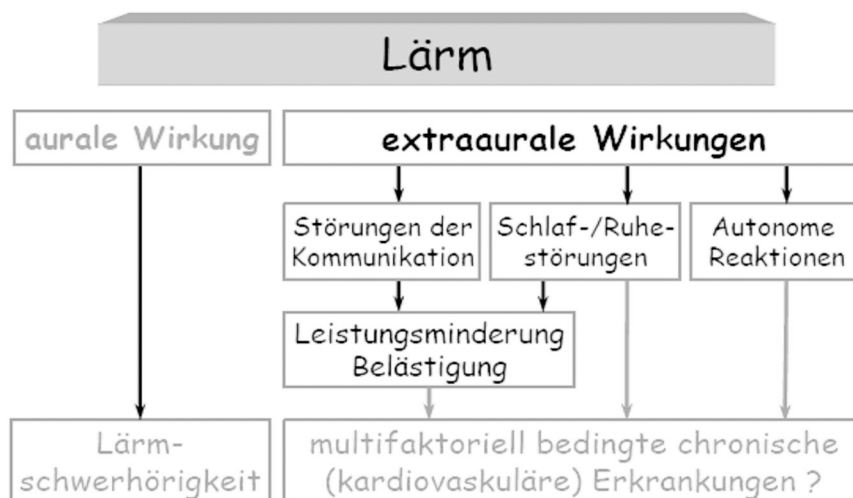


Abb. 1: Aurale und extra-aurale Lärmfolgen (Griefahn 1996)

Ausgehend von dieser theoretischen Konzeption kann der Gegenstandsbereich der verkehrsbedingten Lärmwirkungsforschung grob hinsichtlich zweier übergeordneter Aspekte unterschieden werden. Auf einer – eher psychologischen – Seite wird das subjektive Lästigkeitsempfinden von von Verkehrslärm betroffenen Anwohnern untersucht. Dies erscheint insofern wichtig, als zahlreiche epidemiologische Feldstudien das vermehrte Lästigkeitsempfinden von Anwohnern bestätigen:

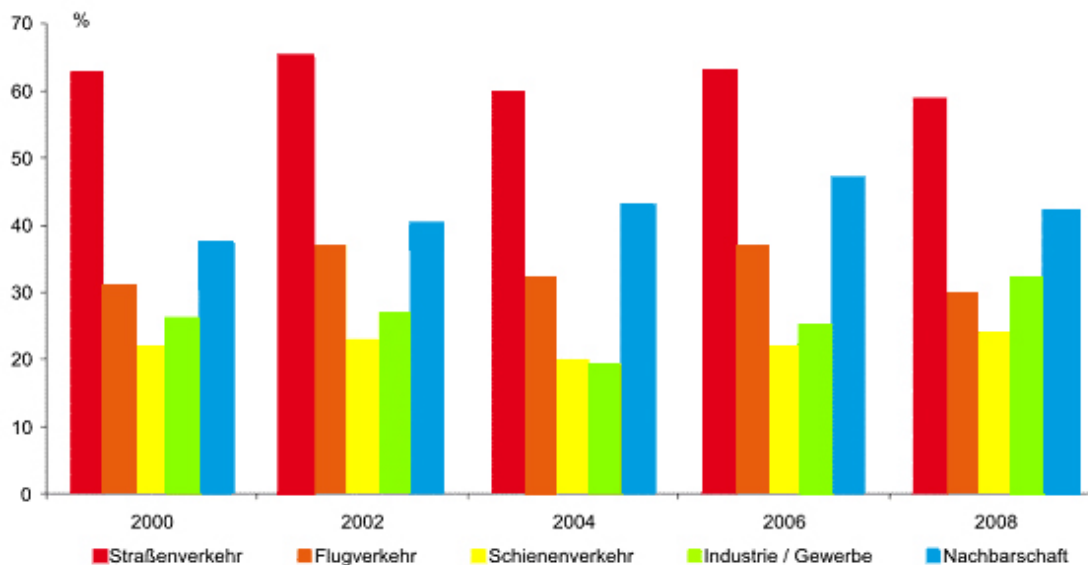


Abb. 2: Lärmbelastung betroffener Anwohner im zeitlichen Verlauf

Dabei zeigt sich z.B. in mehreren vom Umweltbundesamt durchgeführten repräsentativen Umfragen in Deutschland über die letzten acht Jahre (Umweltbewusstsein in Deutschland 2008, Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage vom Umweltbundesamt Berlin, 2008, siehe Abb. 2), dass die Lästigkeit des Straßenverkehrs mit kontinuierlich mehr als 60 % klagenden Betroffenen am größten ausgeprägt ist. Danach folgt der Flugverkehr, durch welchen sich beinahe jeder Dritte belästigt fühlt, und schließlich der Schienenverkehr mit gut einem Viertel Belästigungsreaktionen.

Andere Forschungsvorhaben beschäftigen sich vor allem mit den medizinischen Folgen verkehrsbedingter Geräuschbelastung. Lärm ist ein psycho-sozialer Stressor, der das autonome Nervensystem und das endokrine System aktiviert. Auch im Schlaf ist das Gehör als Warnsystem ununterbrochen auf Empfang geschaltet. Es findet keine vollständige körperliche Adaption an den Lärm statt, selbst wenn die Betroffenen berichten, dass sie sich subjektiv an den Lärm gewöhnt hätten (Habituation).

Nun stellt sich die Frage, welche gesundheitlichen Folgen solche Anpassungsprozesse an den Lärm und welche Langzeitfolgen chronische Lärmexposition mit sich bringen können. Diese Fragen beziehen sich im Besonderen auf Störungen der Kommunikation sowie auch Schlaf- und Ruhestörungen, aber auch auf – zum Teil vorerst unbemerkt bleibende – autonome Reaktionen, die langfristig zu schwerwiegenden Herz-Kreislauf-Erkrankungen führen *können*. Laut statistischem Bundesamt (2007) stellen Herz-Kreislauferkrankungen mit rund 43 % die häufigsten Todesursachen dar.

Im Falle des Schienenverkehrslärms und seiner Besserstellung durch den Schienenbonus auf der Basis der in den 70er Jahren in epidemiologischen Feldstudien nachgewiesenen geringeren Lästigkeit verglichen mit anderen Verkehrslärmquellen wird die medizinisch-physiologische Lärmwirkungsforschung unzureichend berücksichtigt. Auf der Basis neuer Befunde gilt es, den Schienenbonus kritisch zu prüfen und gegebenenfalls entsprechende Anpassungen der 16. BImSchV zu fordern.

Mit diesem Erkenntnisziel erörtert dieser Bericht den aktuellen Stand der Forschung über die Auswirkungen von Schienenlärm auf die Gesundheit und gibt einen Überblick über bisherige Ergebnisse der Lärmwirkungsforschung in Bezug auf die extra-auralen Wirkungen von Schienenlärm.

Damit gliedert sich die Arbeit in vier Abschnitte:

1. Theoretischer Hintergrund
2. Methoden
3. Ergebnisse
4. Diskussion

Der Theorieteil schildert rechtliche wie auch physikalische Grundlagen zu Schall und Lärm und fokussiert sich schließlich auf die Lärmwirkungen sowohl auf psychischer als auch auf physiologischer Ebene.

Im Methodenteil findet sich neben Begründung und Zielsetzung der Arbeit eine Dokumentation der Literaturrecherche über den Ein- und Ausschluss der relevanten empirischen Studien zum aktuellen Stand der Lärmwirkungsforschung mit besonderem Augenmerk auf Schienenlärm. Der Ergebnisteil führt separate Reviews zu den wesentlichen gesundheitsgefährdeten Bereichen beim Menschen durch Schienenlärm auf. Der Fokus wird auf den oben dargestellten medizinisch-objektiven, aber auch auf psychisch-subjektiven Faktoren liegen (siehe Abschnitt 3.6.2 Extra-aurale Wirkung von Schall). An diesen dritten Teil wird eine allgemeine Diskussion der Ergebnisse anschließen mit kritischen Anmerkungen zur Methode der angeführten Studien und damit zu Qualität und Aussagesicherheit der gefundenen Ergebnisse. Darüber hinaus soll eine differenzierte Hinterfragung der Berechtigung des Schienenbonus stattfinden auf der Grundlage des aktuellen Stands der medizinischen Forschung und unter Berücksichtigung der technischen und strukturellen Veränderungen des Schienenverkehrs in den letzten Jahrzehnten.

3. Theoretischer Hintergrund

Das theoretische Fundament, das dieser Abschnitt bietet, dient der Einführung in den Bericht über die gesundheitlichen Auswirkungen von Schienenlärm. Dieses erstreckt sich über eine Darstellung des rechtlichen Rahmens (Bundesimmissionsschutzgesetz, Verkehrslärmschutzverordnung), auf dessen Hintergrund der Schienenbonus näher erläutert wird. Anschließend werden die physikalischen Grundlagen des Schalls als *objektiver physikalischer* Größe und als *empfundener* Schallbelastung und deren Messungs- und Berechnungsmethoden dargestellt. Der letzte übergeordnete und für diesen Bericht auch wesentliche Abschnitt beschäftigt sich mit den gesundheitlichen Lärmfolgen beim Menschen, die primär in aurale und extra-aurale Wirkungen unterteilt werden können. Am Ende sollen durch Modelle und Grafiken die komplexen Zusammenhänge zwischen Verkehrslärm und seinen Gesundheitsfolgen für den Menschen – einschließlich der zahlreichen Einflussfaktoren – veranschaulicht werden.

3.1 Rechtliche Grundlagen

3.1.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz und die Verkehrslärmschutzverordnung

Zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Umwelteinflüssen, wie z.B. hohen Lärmpegeln, und zur Vorbeugung gegen das Entstehen schädlicher Umwelteinflüsse, trat am 1.4.1974 das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge; kurz das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Kraft. Nach diesem Gesetz ist ein Geräusch dann eine schädliche Umwelteinwirkung, wenn es ‚geeignet‘ ist Gefahren, erhebliche Nachteile oder eine erhebliche Belästigung für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbei zu führen (§ 3 Abs. 1 BImSchG).

Das Gesetz enthält jedoch selbst keine Immissionsgrenzwerte, sondern regelt lediglich die grundsätzlichen Anforderungen an Lärmschutz und ermächtigt die Verwaltung zum Erlass konkretisierender Verordnungen und anderer Regelwerke.

Aufgrund von § 43 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 BImSchG verordnete die Bundesregierung erst am 12. Juli 1990 die Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, die Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV), welche unter anderem in § 2 Immissionsgrenzwerte festlegt. Diese Verordnung gilt für den Neubau von öffentlichen Straßen und Schienenwegen, wie auch bei wesentlichen Änderungen bereits bestehender Verkehrsstrecken. Aufgrund dieser gesetzlichen Festlegung von Immissionsgrenzwerten zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind die Verkehrsträger verpflichtet, bei Bau und wesentlicher Änderung von Verkehrswegen entsprechenden Lärmschutz zu gewährleisten.

3.1.1.1 § 2 Immissionsgrenzwerte

„(1) Zum Schutz der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Verkehrsgeräusche ist bei dem Bau oder der wesentlichen Änderung sicherzustellen, dass der Beurteilungspegel einen der folgenden Immissionsgrenzwerte nicht überschreitet:“ (§ 2 BImSchV)

Tab. 1: Immissionsgrenzwerte nach der Bundesimmissionsschutzverordnung

	Tag (6-22 Uhr)	Nacht (22-6 Uhr)
1. an Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altersheimen	57 dB(A)	47 dB(A)
2. in reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	59 dB(A)	49 dB(A)
3. in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	64 dB(A)	54 dB(A)
4. in Gewerbegebieten	69 dB(A)	59 dB(A)

Der Beurteilungspegel ist für Straßen- wie auch für Schienenwege zu berechnen. Dieses geschieht bei Schienenwegen nach Anlage 2 der 16. BImSchV, die wiederum unter bestimmten Voraussetzungen auf die Richtlinien zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen (Schall 03) verweist.

Auf der Grundlage von § 47f BImSchG wurde am 15. März 2006 die Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, kurz Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) von der Bundesregierung erlassen. Diese Verordnung gilt für die Kartierung von Umgebungslärm und konkretisiert die Anforderungen an Lärmkarten. Sie beinhaltet u.a. Anforderungen an die Ausarbeitung von Lärmkarten und deren Übermittlung an die Behörden, sowie die Weitergabe von Informationen an die Öffentlichkeit. Für die Berechnung von Schienenlärm gilt die Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen (VBuSch) vom 10. Mai 2006 (34. BImSchV).

3.1.2 Schienenbonus

Bei der Planung der ersten Neubaustrecken des Hochgeschwindigkeitsverkehrs wurde Ende der 70er Jahre von der damaligen Deutschen Bundesbahn ein Schienenbonus in pauschaler Höhe von 10 dB(A) zur Anwendung gebracht. Eine Rechtsgrundlage hierfür gab es aber erst später: Nach § 43 BImSchG, der die Grundlage der – 1990 schließlich erlassenen – 16. BImSchV darstellt, ist den Besonderheiten des Schienenverkehrs in der Verordnung Rechnung zu tragen.

Dazu bezeichnet der 1990 eingeführte Schienenbonus einen bei der Bildung des Beurteilungspegels zu berücksichtigenden Korrekturfaktor (laut 16. BImSchV „die Korrektur um minus 5 dB(A) zur Berücksichtigung der geringeren Störwirkung des Schienenverkehrslärms“).

Dieser wird begründet mit der geringeren psychologischen Störwirkung, die der gleichmäßigere Schienenverkehrslärm bei gleichem mittleren Schalldruckpegel im Vergleich mit Straßenverkehrslärm mit seinen weit stärkeren und zahlreicheren Amplitudenschwankungen aufweist. Außerdem werden dabei die häufigeren und längeren Stilleperioden berücksichtigt. Entsprechend wird nach der 16. BImSchV der für die festgelegten Geräuschpegelgrenzwerte relevante Beurteilungspegel beim Schienenverkehr um 5 dB geringer angesetzt als beim Straßenverkehr. Die Berechnung erfolgt anhand Anlage 2, die unter bestimmten Voraussetzungen die Richtlinie Schall 03 für anwendbar erklärt.

In der Schweiz ist nach der Lärmschutzverordnung (LSV) der Schienenbonus gesetzlich mit einer variablen Pegelkorrektur zwischen 5 bis 15 dB (Ziff. 33 LSV) zugunsten des Schienenverkehrs festgelegt. In Österreich beträgt der Schienenbonus wie in Deutschland 5 dB (Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung).

Im Wesentlichen wurde der Schienenbonus auf die Interdisziplinäre Feldstudie II (IF II) gestützt, die zwischen 1977 und 1983 die Unterschiede der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm und Schienenverkehrslärm untersuchte. Diese Studie stellt fest, dass in Bezug auf die erfassten Reaktionsvariablen (allgemeine Belästigung, Kommunikationsstörungen, Störungen der Erholung und Störungen des Schlafes) ein hoher Schienenbonus für den Nachtzeitraum (7-14 dB(A)) und ein etwas geringerer Schienenbonus für den Tageszeitraum (4-10 dB(A)) berechtigt scheine.

Das Datenmaterial der IF-Studie wurde später in Hinblick auf die Fensterstellgewohnheiten der Befragten weiter ausgewertet. So zeigte sich, dass beim Schienenverkehrslärm im Pegelbereich nachts von ca. 70 dB(A) nur ca. 10 % der im Schlaf stark Belästigten das Fenster geschlossen halten, während beim Straßenverkehrslärm immerhin 60 % der im Schlaf stark Belästigten das Fenster im Sommer schließen (Moehler 1987). Ein ähnliches Bild ergibt sich für Kommunikationsstörungen, für welche sich herausstellte, dass sich durch Schienenverkehrslärm bei einem Mittelungspegel von 60 dB(A) tagsüber beim Fernsehen ca. 70 % der Befragten mittel bis stark gestört fühlen, aber nur 20 % von diesen das Fenster schließen. Dagegen fühlen sich bei gleichem Mittelungspegel 60 % der Befragten durch Straßenverkehrslärm mittel bis stark gestört, allerdings halten von diesen ca. 60 % das Fenster geschlossen (Moehler und Schuemer 1997).

Der Schienenbonus wurde durch mehrfach replizierte sozialwissenschaftliche Untersuchungen, in denen die Anwohner lärmemittierender Verkehrswege hinsichtlich der Störwirkung durch Verkehrslärm befragt wurden, bestätigt (Fields 1979; Joncour u. a. 2000; Knall und Schuemer 1983; Lambert, Champelovier und Vernet 1993; Liepert u. a. 2005; Miedema und Vos 1998; Moehler 1985; Ohrström, Gunnarsson und Ögren 2007; Sandrock u. a. 2008; Schreckenberger u. a. 2001; Schuemer-Kohrs u. a. 1998). Auch die Metaanalyse von Miedema und Vos (1998) stellt fest, dass bei Schienenlärm im Vergleich mit Flug- und Straßenverkehrslärm bei gleichem äquivalenten Dauerschallpegel jeweils weniger Menschen angeben, stark belästigt zu sein (siehe auch Abb. 29). Ob jedoch die schon für die Belästigung umstrittene Rangfolge der Verkehrsquellen auch auf andere Störungen und Risiken übertragbar ist, erscheint fraglich und bedarf noch weiterer Untersuchungen, so Griefahn u. a. (2004).

Über die Gründe, die zum Schienenbonus führen, gibt es nach Moehler und Schuemer (1997) keine gezielten Untersuchungen, jedoch wird vermutet, dass akustische Besonderheiten des Schienenverkehrs wie längere Ruhepausen, das Frequenzspektrum, der gleiche Klangcharakter, langsamerer Pegelanstieg, die Regelmäßigkeit des Auftretens der Geräusche und der in etwa immer gleiche Schallpegel, aber auch nicht-akustische Einflussfaktoren (z.B. die Einstellung zum Verkehrsträger) eine Rolle spielen (Moehler und Schuemer 1997).

Im Koalitionsvertrag für die 17. Legislaturperiode der Bundesrepublik Deutschland ist die Absicht vereinbart, "den Schienenbonus schrittweise [zu] reduzieren mit dem Ziel, ihn ganz abzuschaffen".

3.2 Physikalische Grundlagen

Im Folgenden soll auf die grundlegenden physikalischen Eigenschaften des Schalls eingegangen werden, woran sich eine Beschreibung der Messung und Berechnung von Lärm anschließt.

3.2.1 Was ist Schall

Im physikalischen Sinn werden unter Luftschall (kurz: Schall) Luftdruckschwankungen verstanden, die dem atmosphärischen Druck überlagert sind (siehe Abb. 3).

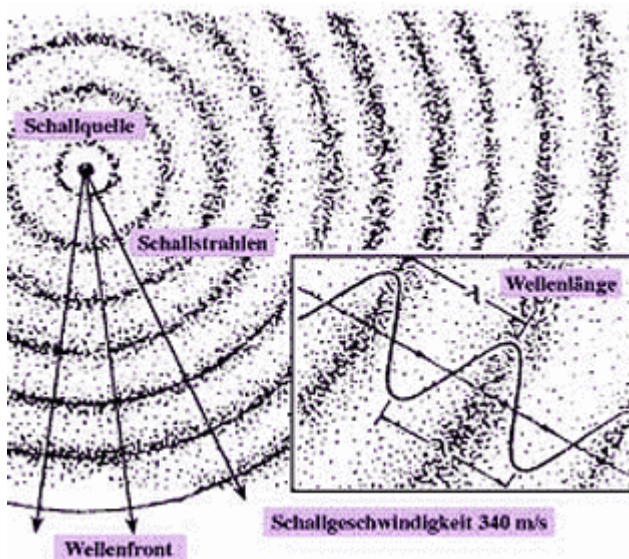


Abb. 3: Luftschall¹

Der Schall breitet sich in einem Medium, z.B. der Luft (oder auch Wasser, Körper) wellenförmig mit einer Geschwindigkeit von etwa 340 m/s aus. Die Schallausbreitung kann durch zahlreiche Faktoren (wie etwa die Luftabsorption, Reflexionen; Bodendämpfung, Witterungsbedingungen usw.) beeinflusst werden (siehe Abb. 4).

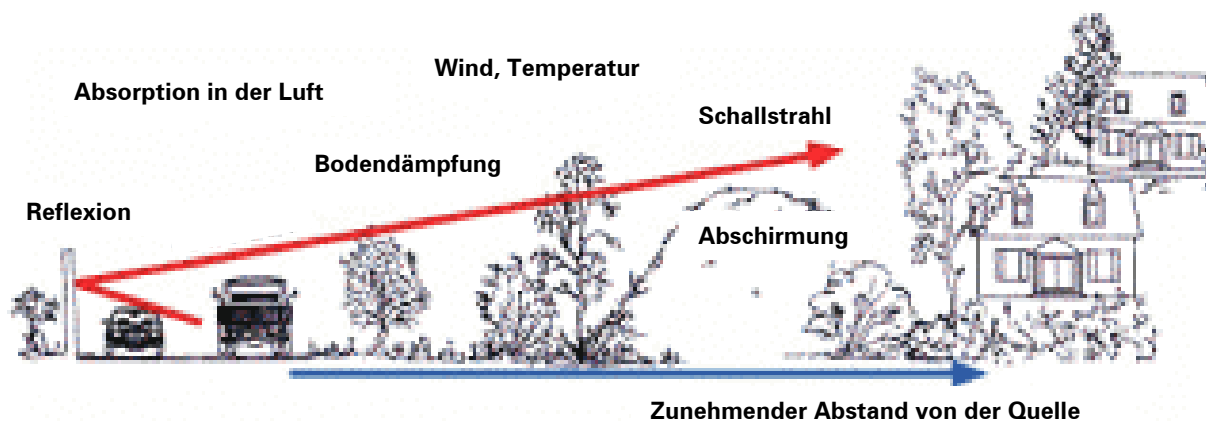


Abb. 4: Schallausbreitung²

¹ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen>

² <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen>

Die Zahl der Luftdruckschwankungen pro Sekunde wird als Frequenz bezeichnet; sie wird in Hertz [Hz] angegeben. Die Frequenz ist verantwortlich für die Tonhöhe: je höher die Frequenz, desto höher der Ton. Das gesunde Ohr einer jungen Person kann Töne der Frequenzen 20 Hz bis 20.000 Hz wahrnehmen, die Frequenzen der menschlichen Sprache liegen bei 100 bis 6.000 Hz. Schallwellen werden also durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde (Frequenz in Herz, Hz) und die maximale Amplitude (Schalldruck in Pascal, Pa) beschrieben. Bei gleicher Frequenz ist die Lautstärke eines Tons von der Amplitudengröße und somit vom Schalldruck abhängig. Ein Ton besteht aus einer Schallwelle mit nur einer Frequenz (siehe Abb. 5), ein Geräusch besteht darüber hinaus aus zahlreichen Überlagerungen unterschiedlicher Frequenzen (siehe Abb. 6) (Schulze und Hauswald 2005).

Leiser Ton mit kleiner Amplitude
Lauter Ton mit großer Amplitude

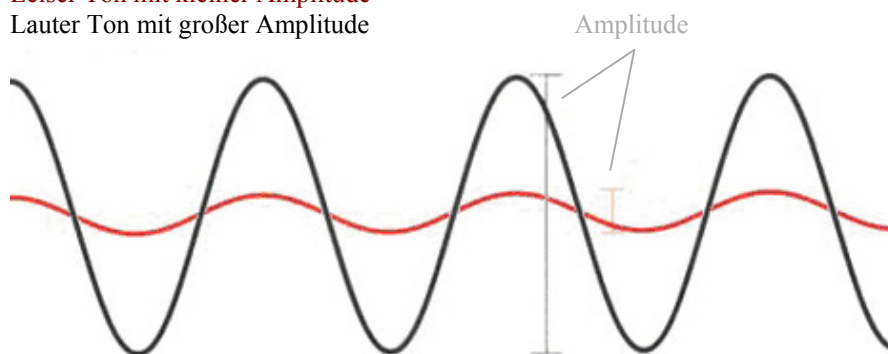


Abb. 5: Darstellung eines Tons

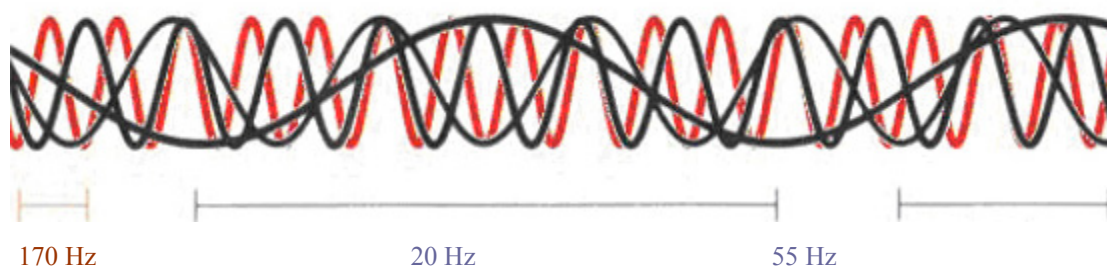


Abb. 6: Darstellung eines Geräusches (Schulze und Hauswald 2005)

Die untere Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörvermögens liegt für ca. 2000 Hz als Bezugsfrequenz bei 2×10^{-5} Pa und die Obergrenze bei etwa 20 Pa. Ab dieser Obergrenze kann davon ausgegangen werden, dass die Hörempfindung in Schmerz übergeht. In dieser Weise liegt die Skalierung des Hörvermögens durch den Schalldruck über 6 Zehnerpotenzen, jedoch entsprechen diese nicht der menschlichen Lautstärkewahrnehmung (Schuschke und Maschke 2002). Die Lautstärke eines Tons wird durch den Schalldruckpegel (siehe Abschnitt 3.2.2) beschrieben. Da das Ohr in der Lage ist, ein weites Spektrum an Schallpegeln zu hören, wurde ein logarithmiertes Maß entwickelt, der Schalldruckpegel, angegeben in Dezibel (dB). Aufgrund der logarithmischen Skalierung können die Schalldruckpegel von einzelnen Tönen nicht einfach aufaddiert werden. Eine Verdoppelung der Schallintensität ist zum Beispiel nur mit einem Anstieg des Schalldruckpegels um 3 dB verbunden.

Für die subjektive Wahrnehmung der Lautstärke ist neben dem Schalldruckpegel auch die Frequenz des Tones von Bedeutung. Sehr tiefe oder sehr hohe Töne werden von dem menschlichen Ohr in Schwellennähe schlechter wahrgenommen. Der Schalldruckpegel

wird daher häufig einer spezifischen Bewertung unterworfen, der so genannten A-Bewertung. Der A-bewertete Schalldruckpegel berücksichtigt somit die Wahrnehmungsweise des Ohrs.

3.2.2 Schalldruckpegel

Zur Erfassung von Schallereignissen und ihrer Bewertung als Lärm gibt es mehrere Möglichkeiten. Durchgesetzt hat sich in Deutschland als Maßeinheit das dB(A) für den Schalldruckpegel, wobei versucht wird, mittels technischer Einrichtungen die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres bei bestimmten Tonhöhen zu berücksichtigen. Neben dem Schalldruckpegel sind die Dauer des Geräusches, die Tageszeit, die Frequenzzusammensetzung und die Häufigkeit zu berücksichtigen. So stellt der Schalldruckpegel einen logarithmischen Wert dar, welcher dem menschlichen Hörvermögen entspricht (Schneider und Bigenzahn 2007) und somit die menschliche Lautstärkenwahrnehmung besser beschreiben kann als der Schalldruck (Schuschke und Maschke 2002). Der Schalldruckpegel wird in Dezibel (dB) angegeben; dies ist im engeren Sinne keine Einheit, sondern lediglich eine Referenzgröße. Daher ist die Angabe einer Bezugsgröße notwendig. Dieser Wert wurde auf $20 \mu\text{Pa}$ festgelegt und beschreibt den Schalldruck der Hörschwelle bei 1000 Hz. Der hörbare Bereich umfasst in der Dezibel-Skala 0 bis 130 dB(A) (Schneider und Bigenzahn 2007). In Abb. 7 sind typische Schalldruckpegel für verschiedene Geräuschquellen angeführt.

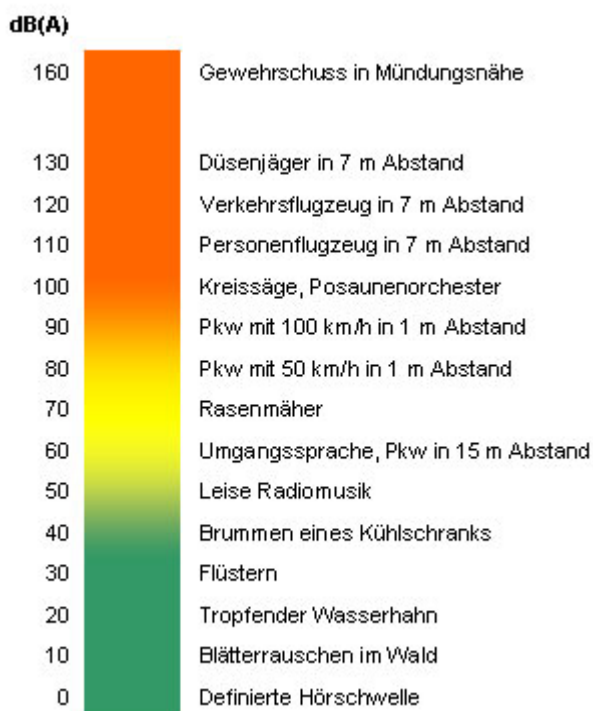


Abb. 7: Pegelbereiche für Lärm in der Umwelt (Der Sachverständigenrat für Umweltfragen 1999)

Der Schalldruckpegel wird durch die folgende Gleichung definiert:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{ dB}$$

L_p Schalldruckpegel

p Schalldruck

p_0 Bezugsschalldruck

Des Weiteren sei zu erwähnen, dass der Schalldruckpegel mit zunehmendem Abstand von der Quelle abnimmt. So ist es bei Angabe eines Schalldruckes immer wichtig, die Entfernung der ihn verursachten Quelle zu benennen.

3.2.3 Äquivalenter Dauerschallpegel

Umweltgeräusche, z.B. Zuglärm, sind nicht konstant, sondern erzeugen zeitlich veränderliche Schallpegel. Der äquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) stellt eine Möglichkeit dar, Geräusche dieser Art zu beschreiben. In einigen Regelwerken wird er auch als Mittelungspegel (L_m) bezeichnet. Er entspricht dem Schallpegel eines fiktiven Dauergeräusches, welches die gleiche Schallenergie enthält wie das zeitlich schwankende Geräusch (Schuschke und Maschke 2002). Zur Veranschaulichung sei das Beispiel des Mittelungspegels eines LKWs in Abb. 8 (Schulze und Hauswald 2005) dargestellt. Der Mittelungspegel wird aus dem Beurteilungszeitraum und den auftretenden Schallpegeln in Abhängigkeit zur Zeit berechnet.

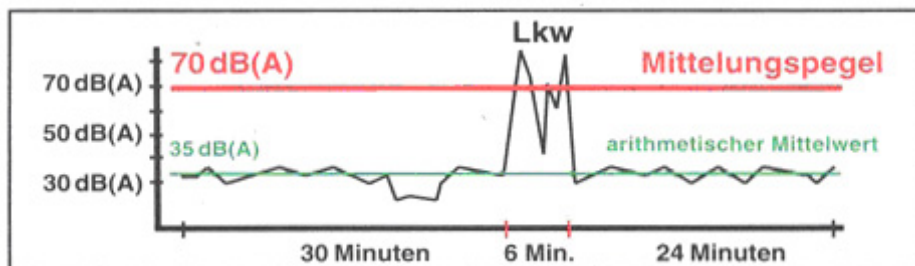


Abb. 8: Beispiel für einen Mittelungspegel einer LKW Vorbeifahrt (Schulze und Hauswald 2005)

Die algorithmische Definition dieses äquivalenten Dauerschallpegels lautet wie folgt:

$$L_m = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)} dt \right)$$

$L_m = L_{eq}$ Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A)

T betrachtetes Zeitintervall (Beurteilungszeitraum)

$L(t)$ Schallpegel in dB(A) in Abhängigkeit zur Zeit t

Dieses Energieäquivalenzprinzip geht davon aus, dass nur die auf den Organismus insgesamt einwirkende Schallenergie das Ausmaß der resultierenden Schädigung bestimmt. Dies ist allerdings nicht nur für die Bewertung der subjektiven Belästigung durch das Geräusch unzutreffend und unzureichend, sondern auch für andere extra-aurale Schädigungen in seiner Angemessenheit anzuzweifeln (z.B. Köckemann 2002; Windelberg), da wie bereits zuvor beschriebene Faktoren des zeitlichen Verlaufs und der

Ruhepausen zwischen dem Auftreten der Schallereignisse einen erheblichen Einfluss ausüben. Der Mittelungspegel ist eine rein messtechnische Größe, die in Grenzen (Energieäquivalenzprinzip) das Gehörschadenrisiko gut beschreibt und auch als Expositionsmaß für extra-aurale Wirkungen mehr oder weniger erfolgreich herangezogen wird in Bezug auf z.B. gesundheitliche Langzeiteffekte.

Da der Schallpegel entfernungsabhängig ist, wird in einigen Regelwerken (z.B. Schall 03) ein Emissionspegel angegeben. Dieser beschreibt den Mittelungspegel in 25 m Abstand und 3,5 m Höhe über der Achse des Gleises bei freier Schallausbreitung.

3.2.4 Beurteilungspegel

Der äquivalente Dauerschallpegel ist allein nicht ausreichend, um die Geräuschsituation für den Menschen korrekt zu beschreiben. Dies führt dazu, dass ein Teil der Einflussgrößen im Immissionsschutzrecht pauschal durch Zuschläge oder Abschläge berücksichtigt werden (Schuschke und Maschke 2002). Infolgedessen geben z.B. einige Studien den Tag-Nacht-Pegel (L_{dn}) an, welcher die erhöhte Empfindlichkeit des Menschen in den Nachtstunden berücksichtigt. Er wird mit dem Mittelungspegel für 24 Stunden berechnet, indem für die Nachtstunden ein Zuschlag von 10 dB(A) auf den gemessenen Schallpegel gegeben wird (Schuschke und Maschke 2002).

Tab. 2: Zu- und Abschläge für den Beurteilungspegel (Schuschke und Maschke 2002)

Kurzzeichen	Beschreibung	Größenordnung
K_I^*	Zuschlag für Impulshaltigkeit / auffällige Pegeländerungen	3-6 dB
K_{Ton}	Zuschlag für Tonhaltigkeit	3-6 dB
K_{Inf}	Zuschlag für Informationshaltigkeit	3-6 dB
K_{Qu}	Zu- oder Abschlag für bestimmte Geräuschquellen	
K_{Sit}	Zu- oder Abschlag für örtliche Situationen	Staffelung der zulässigen Immissionswerte
K_R	Zuschlag für Exposition während Ruhezeiten am Tage	6 dB

* Der Zuschlag für Impulshaltigkeit entfällt, sofern der äquivalente Dauerschallpegel mit den Zeitbewertungen *Impulse* oder *Takt-Maximal* gebildet wurde.

Aus dem physikalischen Schalldruckpegel und den Zuschlägen (siehe Tab. 2) wird so ein Beurteilungspegel gebildet, welcher ein Maß zur Kennzeichnung der auf einen Ort wirkenden Schallimmissionen darstellt und zur Kennzeichnung der Belastung zum Schutz vor Lärm für den Menschen dient. Der Beurteilungspegel wird als Summe des Schalldruckpegels und von Zuschlägen ermittelt, die den Grad der Belästigung durch die zu beurteilende Lärmsituation beschreiben. Da diese Zuschläge nicht immer aus messbaren Eigenschaften des Geräusches ermittelt werden, ist der Beurteilungspegel keine direkt messbare Größe. Im Schall 03 wird der Beurteilungspegel getrennt für den Tag (6 bis 22 Uhr) und die Nacht (22 bis 6 Uhr) angegeben. Er wird aus dem relevanten Emissionspegel, den Pegeldifferenzen auf den jeweiligen Ausbreitungswegen und der Korrektur für die geringere Störwirkung des Schienenverkehrslärms (5 dB(A)) bestimmt.

3.2.5 Frequenzen

Wie schon in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, ist für die Beschreibung von Schallwellen die Frequenz notwendig. Diese bestimmt, ob ein Ton hoch oder tief wahrgenommen wird. Tiefe und besonders hohe Frequenzen wirken leiser als Töne mit einer Frequenz von etwa 2000 Hz. Diese sogenannte Frequenzabhängigkeit ist bei niedrigen Schallpegeln stark ausgeprägt und sinkt mit steigendem Pegel. Die größte Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs liegt im Frequenzbereich von etwa 3 bis 4 kHz. Frequenzen unter 16 Hz, auch Infraschall genannt, können auch bei sehr hohen Schallpegeln nicht mehr wahrgenommen werden. Gleiches gilt für Frequenzen über 20 kHz, auch als Ultraschall bezeichnet (Schuschke und Maschke 2002). Die Hörschwelle hängt demnach von der Frequenz des Schalls ab, weil er vom Gehörgang über das Trommelfell bis zu den Gehörknöchelchen je nach Frequenz unterschiedlich stark weitergeleitet wird. So bestimmen Schalldruckpegel und Frequenz das Lautstärkeempfinden.

Der Pegel- und Frequenzabhängigkeit der akustischen Wahrnehmung und der Tatsache, dass das menschliche Ohr Töne mit gleichem Schalldruck in unterschiedlichen Tonhöhen unterschiedlich laut empfindet, wird international mit den so genannten Frequenzkurven Rechnung getragen. Da die Krümmung der Kurven gleicher Lautstärkepegel und damit der Frequenzgang des Gehörs vom Schalldruckpegel abhängig ist, wurden für unterschiedlich hohe Schalldruckpegel unterschiedliche Bewertungskurven definiert. Es gibt drei Bewertungskurven (A, B, C), die jeweils die Frequenzabhängigkeit des Gehörs in den unterschiedlichen Pegelbereichen berücksichtigen.

A-Bewertung: entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 20-40 phon

B-Bewertung: entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 50-70 phon

C-Bewertung: entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 80-90 phon

D-Bewertung: entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei sehr hohen Schalldrücken

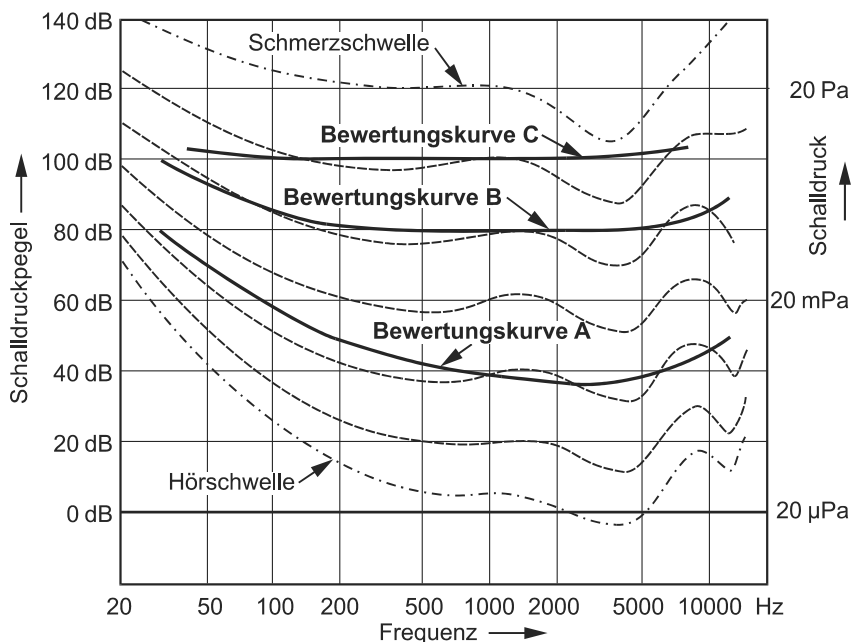


Abb. 9: Kurven gleicher Lautstärke und Frequenzbewertungskurven A,B,C (nach Robinson und Davidson, 1967)

Bewertete Pegel werden durch den entsprechenden Buchstaben der Frequenzbewertung als Index der Messgröße gekennzeichnet, z.B. wird ein A-bewerteter Schalldruckpegel mit L_{pA} oder ein Schallleistungspegel mit L_{WA} bezeichnet und in dB - in der Praxis auch häufig in dB(A) - angegeben.

International hat sich hauptsächlich die Frequenzbewertung nach der „A-Kurve“ durchgesetzt. (Vergleiche mit Abb. 10) (Rothe 2006; Schuschke und Maschke 2002).

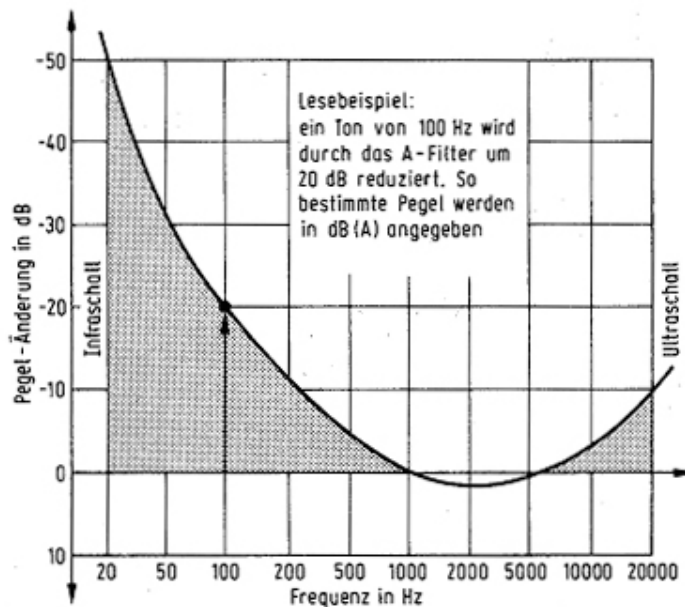


Abb. 10: Frequenzbewertungskurve A (Rothe 2006)

So wird auch der äquivalente Dauerschallpegel zumeist in der A-Bewertung angegeben.

Diese Bewertungskurven sind jedoch nur eine Annäherung an die menschliche Lautstärkewahrnehmung (Pörschmann 2005). So ist z.B. ein Nachteil der A-Frequenzbewertung, dass tieffrequente Schallereignisse mit hohen Pegeln in ihrer Lautheit unterschätzt werden (Schuschke und Maschke 2002).

3.2.6 Lautstärke und Lautheit

Die Lautstärke eines Geräusches ist zum einen vom Schalldruck und zum anderen von der Frequenz abhängig. Die Änderung des Schalldruckpegels um 1 dB(A) ist gerade noch wahrnehmbar, die Änderung um 3 dB(A) gut wahrnehmbar (Schuschke und Maschke 2002). Der Schalldruckpegel ist kein lineares Maß, sondern logarithmisch. Dies führt dazu, dass sich beim Anstieg des Messwertes um 10 dB(A) die Lautstärke verdoppelt (Radon u. a. 2007).

Da die Berücksichtigung der Frequenzempfindlichkeit durch die A-Bewertungskurve zwar ausreichend, aber nicht genau ist, soll hier noch auf den Lautstärkepegel und die Lautheit eingegangen werden. Der Lautstärkepegel L_N wird in Phon angegeben und stellt eine wahrnehmungsbezogene Größe dar. Die Abb 11 zeigt Kurven gleicher Lautstärke (Isophone), die durch psychoakustische Experimente mit mehreren Probandengruppen gewonnen wurden. Auf der Basis dieses Versuchs wurde der Lautstärkenpegel definiert und gibt an, wie laut ein Geräusch von einer Person wahrgenommen wird. Als Vergleichston wurde der 1000 Hz-Ton festgelegt. Das heißt, dass bei 1000 Hz der Schalldruckpegel dem Lautstärkepegel in Phon entspricht (Pörschmann 2005).

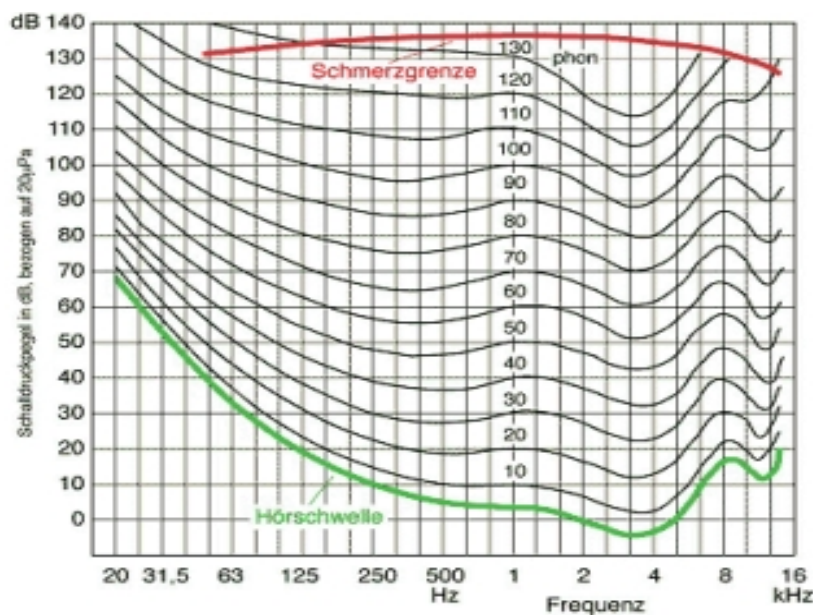


Abb. 11: Kurven gleich empfundener Lautstärke³

Ein Nachteil der Beschreibung der Lautheit über den Lautstärkepegel, besteht darin, dass die Skala kein Verhältnisniveau aufweist. Daher kann anhand einer Lautstärkepegeldifferenz nicht beurteilt werden, wie viel lauter ein Geräusch wahrgenommen wird.

Die Hörempfindung Lautheit S_N wird auf einer linearen Skala aufgetragen, und wird in sone (sonare (lat.): klingen) angegeben. Die Lautheit, bezieht sich auf einen 1000 Hz Ton mit einem Schallpegel von 40 dB. Das heißt, dass dem Lautstärkepegel 40 phon der Lautheit 1 sone entspricht. Ein Schall, der doppelt so laut empfunden wird, besitzt die Lautheit 2 sone (Widmann).

Messverfahren zur Lautheitsmessung können die Lautstärkewahrnehmung des Menschen relativ genau beschreiben. Die Normen *DIN 45631* (siehe DIN) bzw. *ISO 532 B* (siehe ISO) beschreiben Verfahren zur Lautheitsmessung. Ergebnis dieser Messungen ist schließlich die Lautheit in Sone. Das Sone ist ein lineares Maß, das heißt eine Verdoppelung der Lautheit in Sone entspricht einer Verdoppelung der wahrgenommenen Lautstärke. Um vergleichbare Größen zur Pegelmessung zu erhalten, wird das Ergebnis von Lautheitsmessungen auch als – ebenfalls logarithmischer – Lautstärkepegel in Phon angegeben.

3.3 Lärm: Messung und Berechnung

Der Begriff "Schall" ist physikalisch definiert und kann durch physikalische Charakteristika [wie etwa *Schalldruckpegel*, *Tonhöhe*, *Tonhaltigkeit* (einzelne tonale Komponenten im Geräusch erhöhen die wahrgenommene Lautstärke), *Impulshaltigkeit* (Geräusche mit starken Pegeländerungen (z.B. Hämmern) werden unangenehmer empfunden als Geräusche mit konstanter oder gleichmäßiger Lautstärke)] beschrieben werden. Der Begriff "Lärm" hingegen beinhaltet eine subjektive Komponente. Schall wird dann zu Lärm, wenn er als belästigend oder störend empfunden wird. "Lärm ist unerwünschter

³ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

Schall". Über diese Definition hinaus wird in der Lärmwirkungsforschung Lärm aber auch als jener Schall definiert, welcher *Gesundheitsschäden hervorruft*. Im Folgenden wird der Begriff "Lärm" mit dieser Bedeutung verwendet. Bevor es um die gesundheitsspezifischen Auswirkungen von Lärm geht, soll zuvor noch auf Messung und Berechnung des Lärms eingegangen werden.

3.3.1 Lärmmessung

Objektive Schallmessungen sind notwendig für den Lärmschutz. Umweltlärm kann sehr unterschiedlich ausfallen, z.B. in seiner Ton- oder Impulshaltigkeit. Auch Störungen durch Fremdgeräusche, wie z.B. andere Verkehrsgeräusche, Hundegebell, spielende Kinder und vieles mehr müssen berücksichtigt werden. Hierfür existieren Normen und Richtlinien, die festlegen, welche Parameter gemessen werden müssen. Des Weiteren wird häufig auch die Einstellung der Messgeräte vorgeschrieben, oder auch der Umgang mit meteorologischen Bedingungen. So ist das Ergebnis einer Lärmmessung niemals nur eine Zahl, sondern ein spezifischer Wert, der für bestimmte Parameter und Kenngrößen, die ihrerseits wiederum festgelegt sind, ermittelt wurde (Schulze und Hauswald 2005). Trotz zahlreicher Bemühungen einer genaueren Beschreibung verschiedener Lärmmeßverfahren, um eine Beurteilung der Angemessenheit der Lärmerfassung in den später vorgestellten Studien zu gewährleisten, ist diese gescheitert aufgrund der Aussage mehrerer Experten, dass eine knappe, aber vollständige Beschreibung dieser Verfahren aufgrund ihrer Komplexität nicht im Rahmen des zeitlich und finanziell Möglichen lägen.

Im Folgenden seien dennoch kurz die notwendigen Apparaturen zur Lärmmessung erläutert. Bei einem Kondensatormikrofon (siehe Abb. 13) bewegt die auftreffende Schallwelle eine etwa 0,002 mm dünne Metallmembran im Rhythmus der Schalldruckschwankungen (Pascal). Die Membran bildet zusammen mit einer dahinter liegenden Elektrode einen Kondensator, der durch eine anliegende elektrische Gleichspannung aufgeladen ist. Durch die Abstandsänderung der Elektroden wird die Kapazität des Kondensators synchron zu den Schalldruckschwankungen verändert. Über einen Entladungswiderstand ergibt sich ein dem Schalldruck proportionales Spannungssignal (Volt), das für die weitere Verarbeitung elektronisch verstärkt wird. Mikrofone wandeln Luftdruck-schwankungen schließlich in elektrische Signale um.

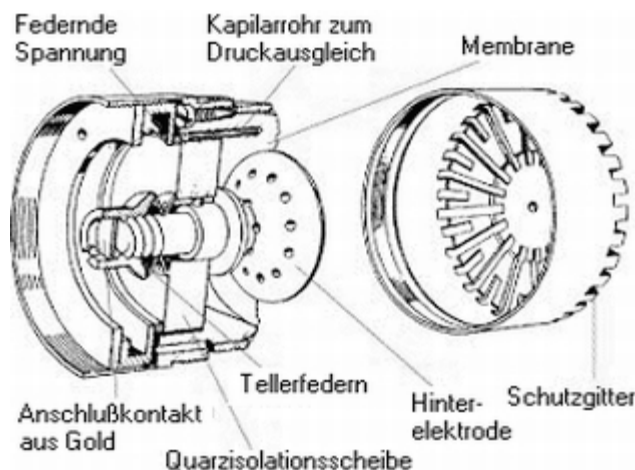


Abb. 13: Prinzipskizze von einem Mikrofon⁴

⁴ <http://www.lfu.bayern.de/learn/fachinformationen/index.htm>

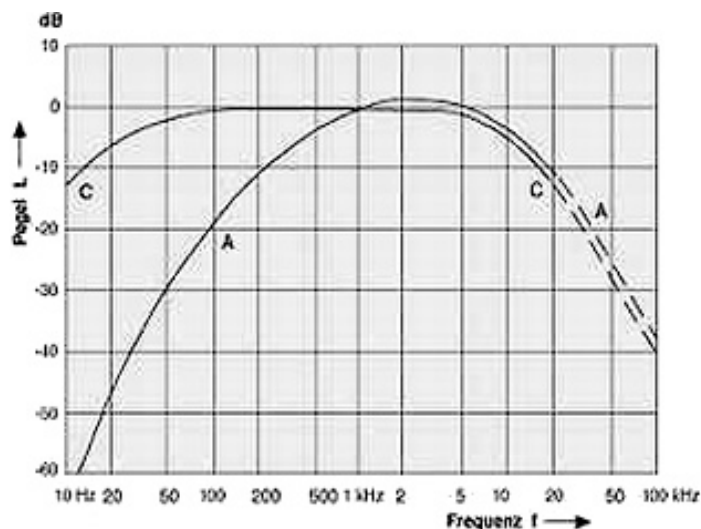


Abb. 13: Frequenzempfindlichkeit des Gehörs⁵

Da das Mikrofon in seinem Frequenzbereich den Schalldruck im Gegensatz zum menschlichen Gehör gleichmäßig aufnimmt, muss durch einen zusätzlichen Filter im Messgerät die Frequenzbewertung des Ohres (siehe Abb. 13) nachgebildet werden. Die A-Kurve kommt der Frequenzempfindlichkeit des Gehöres bei der üblichen Geräusch-situation recht nahe. Bei sehr lauten und tieffrequenten Geräuschen ist die C-Kurve besser.

Der prinzipielle Aufbau eines Schallpegelmessers nach Brüel und Kjær ist anschließend dargestellt (siehe Abb. 14).

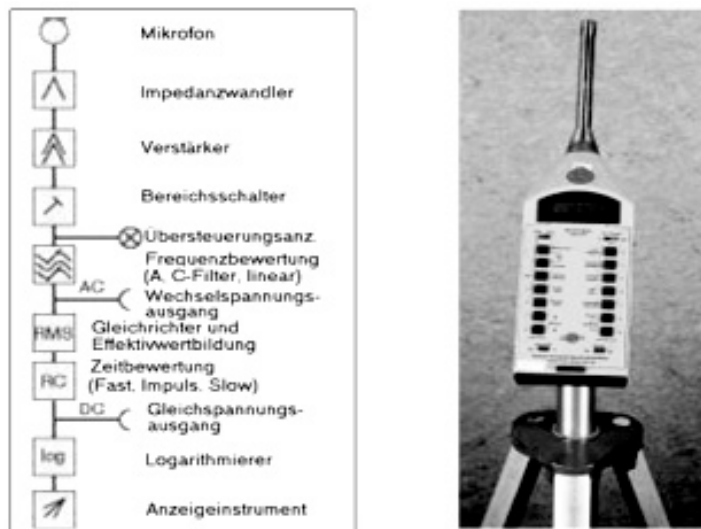


Abb. 14: Schallmesser und deren prinzipieller Aufbau⁶

⁵ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

⁶ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

3.3.2 Lärmberechnung

Wie bereits zuvor erörtert werden die Immissionsgrenzwerte für den Schienenlärm aus der 16. BImSchV nach deren Anlage 2 und mit Hilfe der Richtlinie zur Berechnung der Schallimmission von Schienenwegen (Schall 03) berechnet. Nach der Einführung der 16. BImSchV 1990 kam es zu wesentlichen Änderungen gegenüber der Fassung von 1976. Diese beinhalteten unter anderem, dass nun bei der Berechnung des Beurteilungspegels der Schienenbonus mit einer Korrektur von 5 dB berücksichtigt werden muss.

Mit der „Vorläufigen Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen“ (VBUSch) können die Lärmindizes der 34. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung - 34. BImSchV) für den Schienenverkehr berechnet werden, die für die Kartierung von Umgebungslärm nach § 47c BImSchG benötigt werden. Die VBUSch gilt nicht für Schallberechnungen nach der 16. BImSchV. Die VBUSch ist angelehnt an die „Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen – Schall 03“, wurde jedoch an die Erfordernisse der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/49/EG (Umgebungslärmrichtlinie) angepasst. Dies beinhaltet die ausschließliche Berücksichtigung von A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegeln ohne Beurteilungszu- oder -abschläge, die Berücksichtigung eines für die Lärmemission ausschlaggebenden und hinsichtlich der Witterungsbedingungen durchschnittlichen Jahres sowie die Lage der Ermittlungspunkte für die Immissionspegel L_{den} und L_{night} .

Weitere Anpassungen an die Erfordernisse der Richtlinie sind im Einzelnen:

- Aerodynamische Geräusche schnell fahrender Hochgeschwindigkeitszüge werden durch eine hoch liegende Schallquelle berücksichtigt.
- Schwellengleise und Schotterbett (Beton- und Holzschwellen) werden einheitlich berechnet. Der Korrekturwert für den Einfluss der Fahrbahnarten beträgt hierfür + 2 dB(A).
- Die Anwendung des Schienenbonus entfällt, da es sich bei den Lärmindizes entsprechend Anhang I der Richtlinie 2002/49/EG um A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel gemäß ISO 1996 - 2 handelt und insofern Beurteilungszu- oder -abschläge für die Lästigkeit von Geräuschen nicht berücksichtigt werden können.
- Als Verfahren zur Berücksichtigung der Abschirmwirkung durch Bebauung wird das Verfahren für lange geschlossene Häuserzeilen verwandt, da die flächenhafte Berechnung der Schallimmissionen die Berücksichtigung mehrerer Gebäudereihen erfordert.
- Einfache Reflexionen an Hausfassaden oder anderen Flächen werden berücksichtigt.
- Auf die Darstellung des Verfahrens der langen geraden Strecke wird verzichtet, weil schalltechnische Berechnungen heute nahezu vollständig unter Verwendung von Computerprogrammen erfolgen, die generell nach dem Teilstreckenverfahren arbeiten.
- Hinweise auf Planungen wie z.B. Neu- und Ausbaustrecken sind in der VBUSch nicht enthalten, da lediglich real vorhandene Strecken mit den zum Zeitpunkt der Kartierung vorhandenen Betriebsprogrammen entsprechend § 47c BImSchG erfasst werden.

Weiterhin wurde festgelegt, dass die VBUSch bis zur verbindlichen Einführung eines harmonisierten Berechnungsverfahrens gemäß Artikel 5, Absatz 1, Satz 2 der Richtlinie 2002/49/EG anzuwenden sei. Die Generaldirektion Umwelt der EU-Kommission sieht die 34. BImSchV und die vorläufigen Berechnungsmethoden als nicht europarechtskonform

an, weil diese an bundesdeutscher Methodik und nicht an Art. 6 ULR orientiert seien (Final Report on Assessment of the equivalence of national noise mapping methods against the interim methods, 22.12.2008).

3.4 Die menschliche akustische Wahrnehmung

Wie in den vorhergehenden Abschnitten bereits eingehend erläutert sind Schallwellen Druckschwankungen in der Luft.

Das Außen- wie auch das Mittelohr sind für die Weiterleitung dieser Druckschwankungen zum Innenohr verantwortlich. Im Innenohr wird die mechanische Energie (Schall) mit Hilfe der äußeren und inneren Haarzellen in elektrische Signale auf dem Hörnerv umgewandelt und an das Zentralnervensystem (ZNS) gesendet und dort weiter verarbeitet. Im engeren Sinne geht der Schall bis zur tatsächlichen Hörempfindung folgend beschriebenen Gang (siehe Abb. 15):

- Die Ohrmuschel fängt den Schall auf; er wird durch den Gehörgang geleitet und versetzt das Trommelfell in Schwingungen.
- Die winzigen Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel nehmen die Schwingungen auf.
- Der Steigbügel ist der kleinste Knochen des Menschen und nur halb so groß wie ein Reiskorn.
- Er überträgt die Schwingungen auf das ovale Fenster der Ohrschnecke, die mit Flüssigkeit gefüllt ist. In ihr wandert die Schallwelle die Vorhoftreppe empor und die Paukentreppe wieder zurück; am runden Fenster erfolgt der Druckausgleich.
- Je nach Frequenz des Geräusches werden Haare (Zilien) verschiedener Reihen von Haarzellen auf der Basilarmembran im Schneckengang bewegt; sie lösen damit Reizfolgeströme (kleine Ionenströme) aus. Die etwa 20.000 Sinneszellen mit den Zilien und deren Einbettung auf der Basilarmembran sowie die Deckmembran bilden das Cortische Organ. Dort wird also die Schallenergie in elektrische Energie umgewandelt.
- Der Hörnerv leitet die Reizfolgeströme zur Hirnrinde: wir hören.

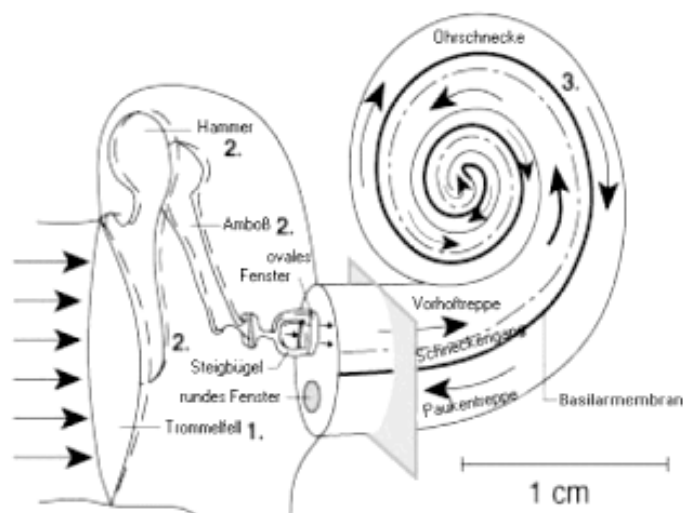


Abb. 15: Skizze Lindsey & Norman: Mittelohr und Ohrschnecke⁷

⁷ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

Das Sinnesorgan Ohr ist jederzeit geöffnet, da es keine Schutzbarriere besitzt wie beispielsweise das Auge durch das Augenlid. Dies hat zur Folge, dass das Ohr wie auch die weitere Verschaltung im Gehirn zu jeder Zeit, auch im Schlaf, aktiviert werden kann. Kommt es demnach zu einem Dauerreiz, entsteht unwillkürlich auch eine Dauererregung des menschlichen Organismus. Durch die derartige Beschaffenheit der akustischen Wahrnehmung hat der Organismus die Fähigkeit, jederzeit angemessen auf Schallereignisse zu reagieren (Ising u. a. 2001). Dies geschieht zum einen über das zentrale auditorische System im ZNS, wo es zur Musteranalyse, räumlichen Lokalisation und Rauschunterdrückung kommt. Die Musteranalyse dient der Spracherkennung sowie der Erkennung anderer Schallquellen (Klinke 2000). Außerdem werden über die Hörbahn direkt subkortikale Bereiche im Gehirn aktiviert, die dann über andere subkortikale Verarbeitungsbahnen Verbindungen zwischen sensorischer Aktivierung und Emotionen herstellen. (Ising und Maschke 1997). Diese Regionen sind vor allem Teile des limbischen Systems (Amygdala), der Formatio reticularis (aufsteigendes retikuläres aktivierendes System, ARAS) und des Hypothalamus, die ihrerseits das autonome Nervensystem (ANS) und spezielle hormonelle Stressreaktionen beeinflussen können (Ising u. a. 2001; Ising und Maschke 1997). Dieser komplexe Prozess von der akustischen Wahrnehmung bis hin zu physiologischen und endokrinologischen autonomen Reaktionen ist in Abb. 16 veranschaulicht. Das aufsteigende retikuläre aktivierende System (ARAS), auch „Weckzentrum“ genannt, ist für das Schlaf-Wach-Verhalten wesentlich, hält koordinierende motorische Programme (Angriff und Flucht) bereit und ist grundsätzlich für eine gesteigerte Aufmerksamkeit verantwortlich. Es wird von sensibel-sensorischen Reizen aller Qualitäten sowie Impulsen aus dem limbischen System und dem Kortex erregt und kann durch den akustischen Reiz auf drei Arten aktiviert werden (Ising und Maschke 1997; Trepel 2003):

1. direkt über den Sinnesreiz
2. indirekt über die Hörrinde
3. durch eine emotionale Reaktion

Wird das ARAS erregt, kann es indirekt über Projektionen in den Thalamus die Aktivität des gesamten Kortex steigern und somit den gesamten Organismus in einen wachen Zustand versetzen. Diese Aktivierung verläuft nach einem unspezifischen Muster, das bei allen Sinnesreizen, egal ob akustisch, visuell, sensibel oder chemisch zuerst einmal gleich abläuft (Trepel 2003).

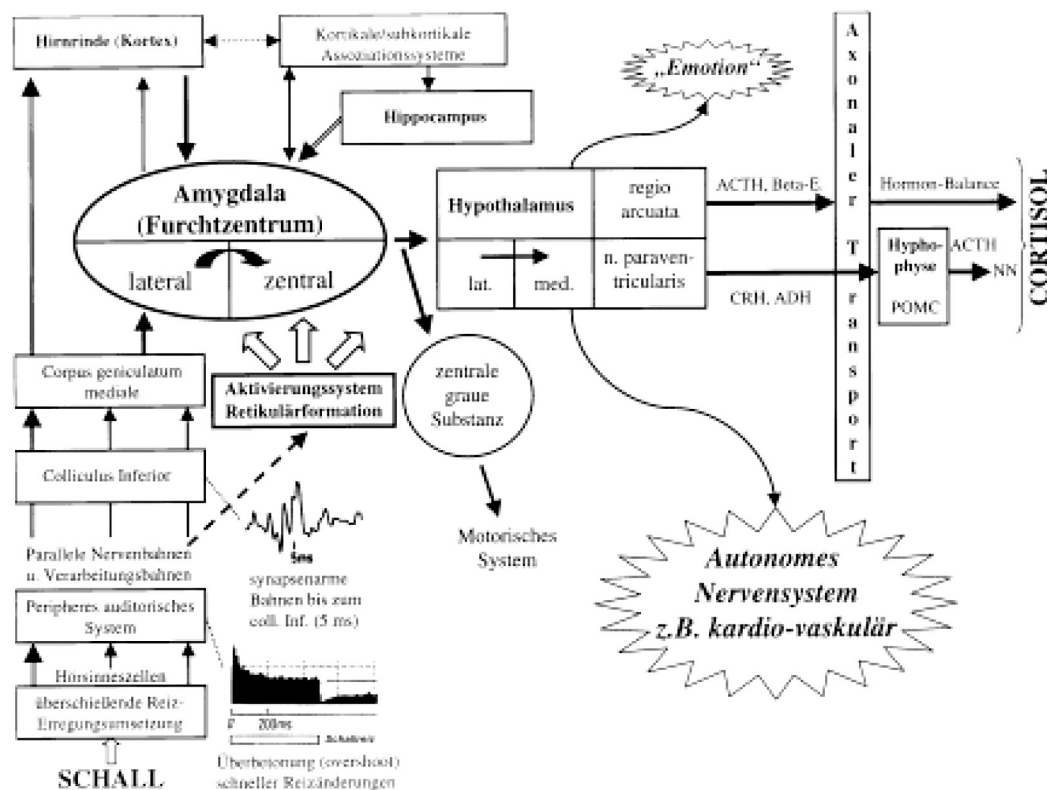


Abb. 16: Schema der geschlossenen Wirkungskette zwischen Schall und ausgelöster vegetativer Reaktion (Spreng 2000)

Das Kerngebiet der Amygdala (siehe Abb. 17) ist eng (afferent und efferent) mit weiteren limbischen, aber auch neokortikalen Zentren verbunden und stellt ebenfalls einen wesentlichen Teil des auditorischen Systems dar, indem sie von Teilen der Hörbahn miterfasst und auch mit erregt wird. Ihre Funktion besteht unter anderem in einem modulierenden Einfluss auf die Zentren des Hypothalamus, welcher das beherrschende vegetativ-nervöse bzw. hormonelle Regulationszentrum für den gesamten Organismus darstellt (siehe Abb. 16). Unten dargestellt (siehe Abb. 17) ist die physiologische Regelung der Cortisolausschüttung, die durch massive lärminduzierte Erregungen der Amygdala überspielt bzw. überaktiviert wird (Schwarze Pfeile: Hemmung, weiße Pfeile: Aktivierung) (Spreng in Ising u. a. 2001).

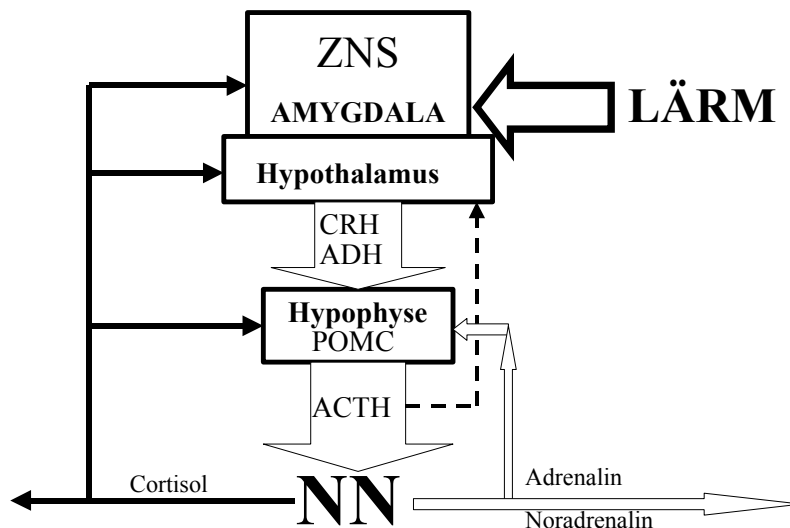


Abb. 17: Lärm im Schaltkreis über die Amygdala (Spreng in Ising u. a. 2001)

In erster Linie ist er damit für schnelle Veränderungen über das vegetative Nervensystem (z.B. Herz-Kreislauf-System, Herzfrequenzsteigerung, Blutdrucksteigerung) und Veränderungen des hormonellen Gleichgewichts (Stresshormonausschüttung) verantwortlich. Die Amygdala ist außerdem eng mit dem autonomen Nervensystem verknüpft und dient der Speicherung emotional betonter Gedächtnisinhalte (Spreng 2000; Trepel 2003). Die direkte Durchschaltung von Furchtantworten, die durch akustische Reize ausgelöst werden, erfolgt über den schnellen monosynaptischen, thalamo-amygdalären Trakt (Spreng in (Ising u. a. 2001)). So fungiert die Amygdala als Furchtzentrum und zeichnet sich durch eine außergewöhnliche Lernfähigkeit aus, insbesondere hinsichtlich aversiver (mit negativer Bewertung verbundener) wiederholter (konditionierter) Schallreize. Durch diese Lernfähigkeit, die besonders bei störenden Ereignissen ausgeprägt ist, kann es z.B. bei immer wieder kehrenden Schallreizen zu einer Empfindlichkeitssteigerung bezüglich bestimmter Schallfrequenzen kommen (Edeline und Weinberger 1992; Ising u. a. 2001). Vereinfacht dargestellt kann man davon ausgehen, dass sich die Amygdala durch die vom Schall ausgelöste Erregung unter dem Einfluss der simultan aktivierten Hirnrinde (z.B. bei hoher Anstiegssteilheit und charakteristischer Frequenzzusammensetzung) und auch unter dem Einfluss anderer kortikaler Bereiche (z.B. den für komplexere kognitive Prozesse verantwortlichen Hippocampus) plastisch derartig verändern kann, dass der gesamte Organismus sensibler auf bestimmte Stimuli reagiert. Dadurch kommt es bei Wiederholung dieses Reizes (z.B. Verkehrslärm) zu einer schnelleren, sensitiv gebahnten Verarbeitung mit direktem Zugriff auf vegetative und hormonelle Reaktionssysteme wie auch emotionale Bereiche. Diese Verarbeitungssysteme funktionieren ohne kognitive Beteiligung, was dazu führt, dass sie auch während des Schlafs vollständig aktiv sind (Spreng in (Ising u. a. 2001)). Dies wiederum macht die Tatsache plausibel, dass länger einwirkende Geräusche mit niedriger oder mittlerer Intensität, jedoch mit spezifischem Informationsgehalt (z.B. Verkehrslärm), nicht nur anfängliche belästigende Erregung, sondern auch emotionale, vegetative und hormonelle Reaktionen auslösen können, die sonst nur bei lauten Schallereignissen zu beobachten sind (Ising und Maschke 1997).

Die Erregungen der Formatio reticularis und somit auch die Erregung des endokrinen Systems kann über Emotionen, Erinnerungen, Assoziationen, Analyse und Wertung von Umweltreizen verstärkt oder gedämpft werden. Dies erklärt zusammen mit der Lernfähigkeit der Amygdala die enge Verkopplung von physiologischen und psychischen

Prozessen der Lärmwirkung, so dass von einer psycho-physiologischen Reaktion die Rede sein kann (Radon u. a. 2007).

All diese Aktivierungsreaktionen sind grundsätzlich physiologisch und stellen keinen pathologischen Prozess dar. Die Aktivierung hat den Sinn, bei Anforderung, Belastung oder Gefahr schnell Energie bereitzustellen, um eine Anpassung des Organismus an die neue Situation zu gewährleisten. Dies kann als Eustress (griechisch: eu = echt, gut) bezeichnet werden (siehe Abb. 18). Kommt es jedoch zu einer dauerhaften oder ständigen Aktivierung ohne ausreichende Erholungsphasen, folgt der Distress (lateinisch dis = gestört, entartet). Dieser führt zu Erschöpfung mit eventuellen (funktionellen) Fehlregulationen der Aktivierungssysteme und/oder nachfolgenden autonomen oder hormonellen Stressreaktionen (Schuschke und Maschke 2002; Seyle 1964) (siehe Abb. 19). Dies bedeutet im Klartext, dass beide Systeme einer möglichen Überaktivierung durch Umweltreize (z.B. Schienenlärm) unterliegen können. Dies wiederum kann eine nachhaltige Störung des Bio- und Soziorhythmus bewirken und damit langfristig die Gesundheit beeinträchtigen (Ising und Maschke 1997).

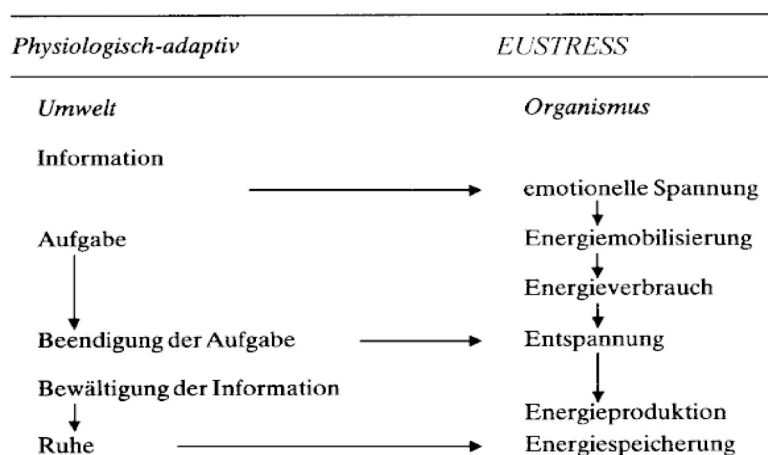


Abb. 18: Funktionsabläufe bei Eustress (mod. nach Seefeld 1989)

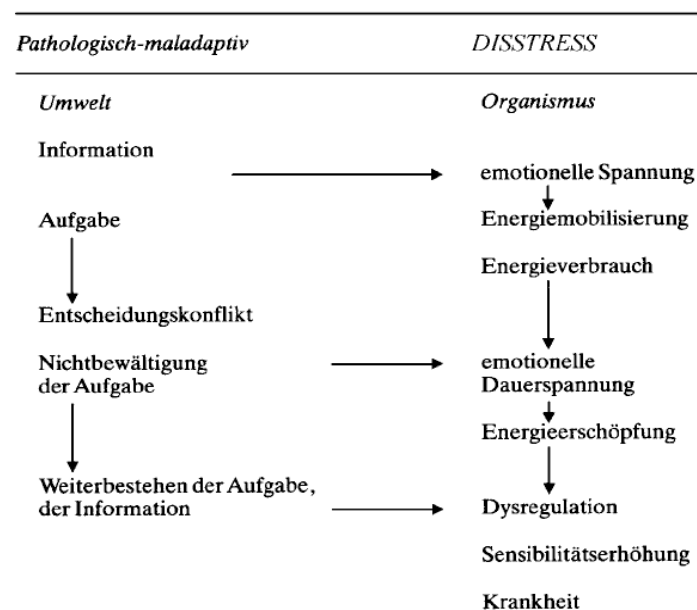


Abb. 19: Funktionsabläufe nach Distress (mod. nach Seefeld 1989))

3.5 Gesundheitsbegriff

Eine Diskussion von Gesundheitsproblemen mit möglichem Umweltbezug sollte mit der Definition des Begriffes "Gesundheit" einsetzen.

Hurrelmann (1997) beispielsweise definiert Gesundheit als: „Zustand des objektiven und subjektiven Befindens einer Person, der gegeben ist, wenn diese Person sich in den physischen, psychischen und sozialen Bereichen ihrer Entwicklung im Einklang mit den eigenen Möglichkeiten und Zielvorstellungen und den jeweils gegebenen äußeren Lebensbedingungen befindet.“

Eine andere Begriffsbestimmung leistet die Weltgesundheitsorganisation (WHO) in der Gründungserklärung vom 22. Juni 1946, in welcher Gesundheit "als Zustand vollständigen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur des Freiseins von Krankheit" definiert wird (nach WHO, 1947).

Im medizinischen (physischen) Sinne bedeutet Wohlbefinden, dass sich alle Organe und Organsysteme des menschlichen Körpers im physiologisch funktionellen Zustand befinden (Gesundheit). Das medizinische Wohlbefinden ist eng verbunden mit dem psychischen Wohlbefinden, denn es setzt im Regelfall medizinisches (physisches) Wohlbefinden voraus.

Ausgehend vom Basisbegriff des medizinischen Wohlbefindens ist die Abgrenzung des normalen physiologischen Bereichs vom pathologischen Bereich unabdingbar. Die Überschreitung der Grenze des Normbereiches ist für die Entstehung einer Erkrankung zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung; das temporäre Überschreiten von normalen Blutdruckwerten, normaler Körperkerntemperatur auch bei körperlichen Arbeiten oder in Extremsituationen mentaler Belastungen (Prüfungen o. ä.) kann erst dann in eine Krankheit münden, wenn diese temporären Belastungen in dauernde Belastungen und Beanspruchungen übergegangen sind. Krankheit kann jedoch nicht allein auf das physische Wohlbefinden eingeschränkt werden, sondern umfasst auch psychosomatische Störungen.

In dem Sinne schlägt der Umweltrat der Sachverständigen für Umweltfragen vor, von umweltbeeinflussten Gesundheitsstörungen oder Gesundheitsbeeinträchtigungen zu sprechen.

3.6 Schallwirkung

Zu viel Schall – in Stärke oder Dauer – kann nachhaltige gesundheitliche Beeinträchtigungen oder Schäden hervorrufen. Diese betreffen zum einen das Gehör, das durch kurzzeitige hohe Schallspitzen oder Dauerschall bleibende Schäden davontragen kann (aurale Wirkungen). Dazu gehören Beeinträchtigungen des Hörvermögens bis hin zur Schwerhörigkeit, sowie zeitlich begrenzte oder dauerhafte Ohrgeräusche (Tinnitus). Ferner wirken Schall oder Lärm auf den gesamten Organismus, indem er körperliche Stressreaktionen auslöst (extra-aurale Wirkungen). Dies kann auch schon bei niedrigeren, nicht gehörschädigenden Schallpegeln geschehen, wie sie in der Umwelt vorkommen (z.B. Verkehrslärm). Zu diesen extra-auralen Wirkungen gehören unter anderem die nachfolgend im Diagramm vermerkten Aspekte, die auf verschiedenen Schallebenen auftreten (siehe Abb. 20).

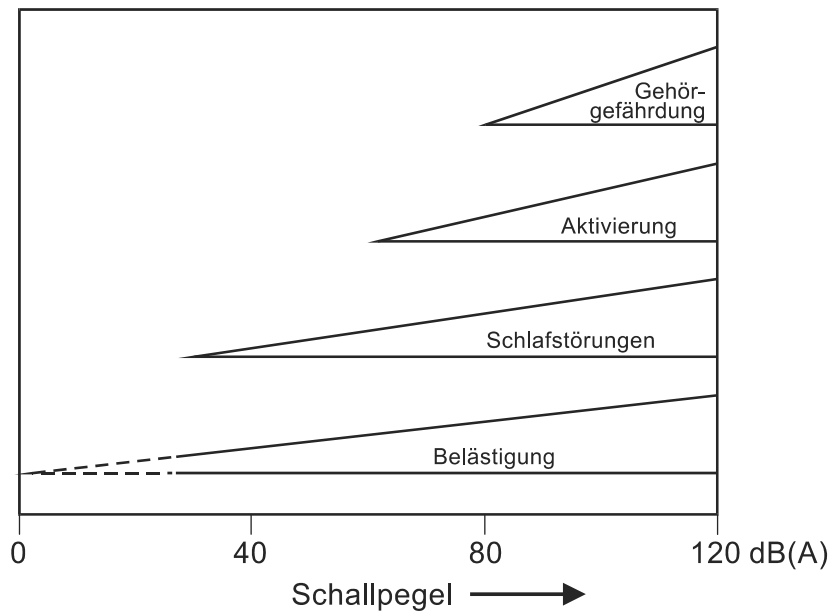


Abb. 20: Verschiedene Ebenen von Lärmwirkungen (Ising u. a. 2001)

Lärm ist nicht gleichzusetzen mit Schall, denn Lärm ist mehr als Schall, wie das Zitat von Palmerston verdeutlicht *„Lärm ist eben kein Lärm, sondern Schall, der zur falschen Zeit am falschen Ort zu hören ist.“*

Zwei ähnliche Geräusche können - selbst bei gleichem Schallpegel - sehr unterschiedlich empfunden werden. Ein Wasserfall in einer idyllischen Bergwelt wird allgemein mit Erholung gleichgesetzt, während eine befahrene Autobahn eine Belastung darstellt.

Die Wirkung eines Geräusches im Einzelnen hängt im Wesentlichen von den folgenden Merkmalen ab:

- **den akustischen Geräuschmerkmalen**

Lautstärke, Dauer, zeitlicher Verlauf (gleich bleibend/schwankend bis impulshaltig), Frequenzzusammensetzung (ohne/mit hervortretenden Tönen), Häufigkeit der Geräuschereignisse, Differenz zwischen Störgeräusch und Hintergrundgeräusch

- **der Geräuschart**

Naturgeräusch: Vögel, Wind, Blätterrauschen, Wasserfall, Gewitter, Musik und Sprache: natürlich oder elektronisch wiedergegeben

Geräusche am Arbeitsplatz Geräusche vom Verkehr: Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr

Geräusche von Anlagen: Gewerbe, Gaststätten, Sport, Freizeit, Schießen, Baustellen

- **Zeitpunkt des Auftretens des Geräusches**

allgemein: tags, nachts, während der Ruhezeiten (morgens, abends, sonn- und feiertags)

individuell: Wach-/Schlafzustand, Arbeiten/Wohnen und Erholen, Konzentrationszustand

- **der Ortsüblichkeit des Geräusches**

Wohngebiet, Mischgebiet, Gewerbegebiet

- **der Informationshaltigkeit und Bedeutung des Geräusches**

tropfender Wasserhahn, Wimmern des Babys für die Mutter/einen Fremden, Musik als Wohlklang oder Ruhestörung

- **der Geräuschempfindlichkeit der Betroffenen**

Persönlichkeitsmerkmale (ausgeglichene/reizbare, optimistische/pessimistische Grundeinstellung)

situative Empfindlichkeit (Geräusche ungewohnt/gewohnt; entspannt, ruhig, erholt/angespannt, nervös, müde, erschöpft)

- **der Einstellung zur Geräuschquelle**

Zuneigung zum/Neid auf Geräuschverursacher

geräuschvolle Tätigkeit sinnvoll/unsinnig

Geräusch verursachendes Verhalten allgemein anerkannt/abgelehnt

Geräusch vermeidbar/unvermeidbar, nicht verminderbar

Lärm als psychosozialer Stressfaktor beeinträchtigt somit nicht nur das subjektive Wohlempfinden und die Lebensqualität, indem er stört und belästigt. Lärm beeinträchtigt auch die Gesundheit im engeren Sinn. Er aktiviert das autonome Nervensystem und das hormonelle System. Die Folge können Veränderungen von Blutdruck, Herzfrequenz und anderen Kreislauftaktoren sein. Der Körper schüttet vermehrt Stresshormone aus, die ihrerseits in Stoffwechselvorgänge des Körpers eingreifen. Die Kreislauf- und Stoffwechselregulierung wird weitgehend unbewusst über das autonome Nervensystem vermittelt. Die autonomen Reaktionen treten deshalb auch im Schlaf und bei Personen auf, die meinen, sich an Lärm gewöhnt zu haben. Zu den möglichen Langzeitfolgen chronischer Lärmbelastung gehören neben den Gehörschäden auch Änderungen bei biologischen Risikofaktoren (zum Beispiel Blutfette, Blutzucker, Gerinnungsfaktoren) und Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie arteriosklerotische Veränderungen („Arterienverkalkung“), Bluthochdruck und bestimmte Herzkrankheiten einschließlich Herzinfarkt. Auf diese soeben kurz dargestellten Zusammenhänge soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Griefahn (1996) gibt Schwellenwerte für lärmbedingte aurale und extra-aurale Wirkungen an (siehe Abb. 21): Ab etwa 30-40 dB(A) kommt es zunächst zu psychischen Reaktionen, ab 65-70 dB(A) zu vegetativen und ab 85 dB(A) zu auralen Wirkungen durch Schall.

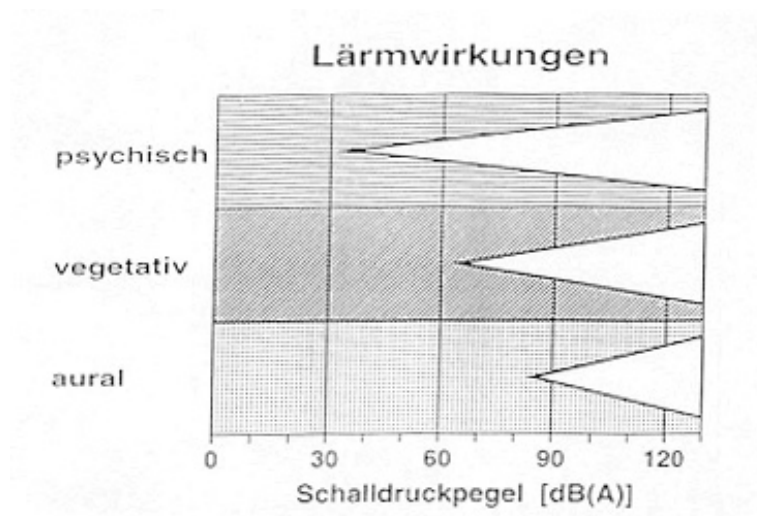


Abb. 21: Auslöseschwellen für Schallwirkungen (Griefahn 1996)

Zu den psychologischen Lärmwirkungen zählen die subjektive Belästigung, die Störung der Kommunikation und auch Leistungsbeeinträchtigungen. Die physiologischen Lärmwirkungen sind zum einen die auf das Gehör begrenzten auralen Wirkungen und zum anderen die Störungen von vegetativen und hormonellen Funktionen wie auch Schlafstörungen. Jedoch ist eine eindeutige Trennung zwischen psychischen und physischen Lärmwirkungen nicht möglich, da psychische Belastung ebenfalls zu physischen Reaktionen führen bzw. diese verstärken können und zum anderen auch Schlafstörungen eine psychische Belastung darstellen (Schuemer, Schreckenberg und Felscher-Suhr 2003).

Das folgend dargestellte Modell veranschaulicht noch einmal zusammenfassend den komplexen Wechselwirkungsprozess der Lärmwirkungen mit zahlreichen Faktoren (siehe Abb. 22)

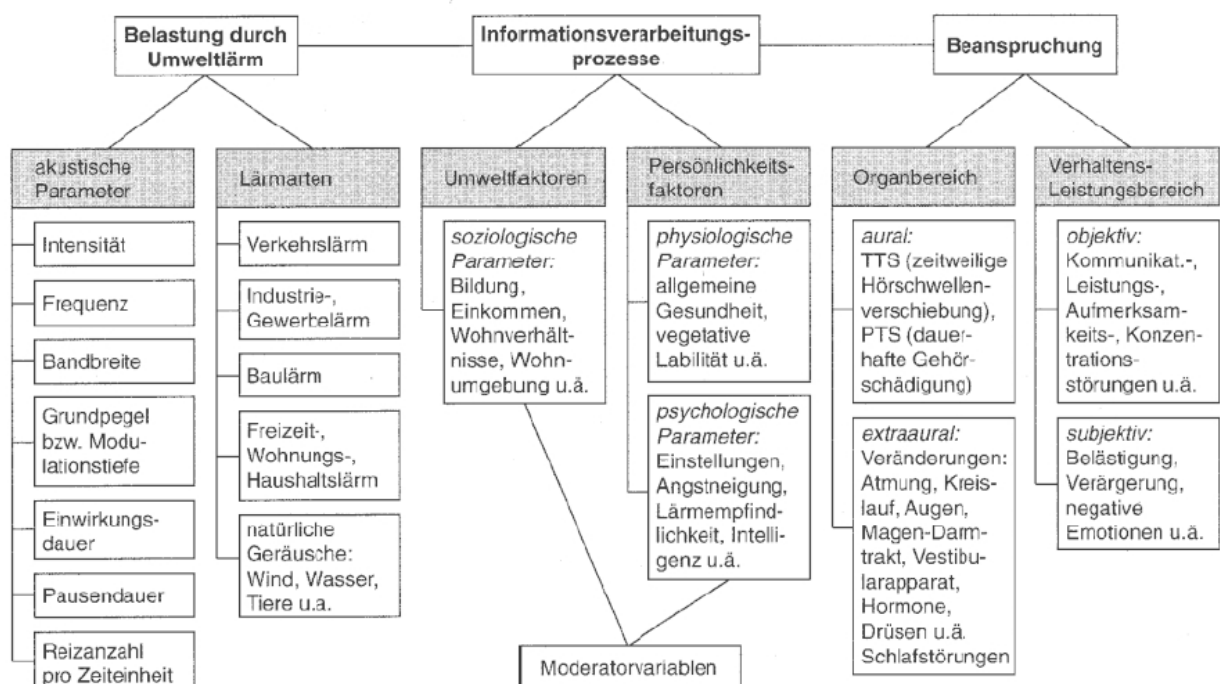


Abb. 22: Beziehung zwischen Belastungsfaktoren, Moderatorvariablen und Beanspruchungsparametern des Umweltlärms (Jansen und Notbohm 1994)

3.6.1 Aurale Wirkung von Schall

Starke Lärmbelastung kann gesundheitliche Folgen haben. Als gesichert ist hier die Lärmschwerhörigkeit zu nennen, die eine direkte Schädigung des Gehörs (aurale Wirkung) darstellt, wenn das Ohr nicht mehr die Möglichkeit hat, sich an einen Schalldruck anzupassen (Adaption). Eine langfristige Schallbelastung mit mittleren Schalldruckpegeln von mehr als 80 dB(A) (bezogen auf eine 40 Stunden Woche) führen zu einer Erhöhung des Risikos für Innenohrschäden in Form von irreversiblen Hörschwellenverschiebungen. Die Abb 23 veranschaulicht Schallpegel, wie sie im täglichen Leben auftreten.

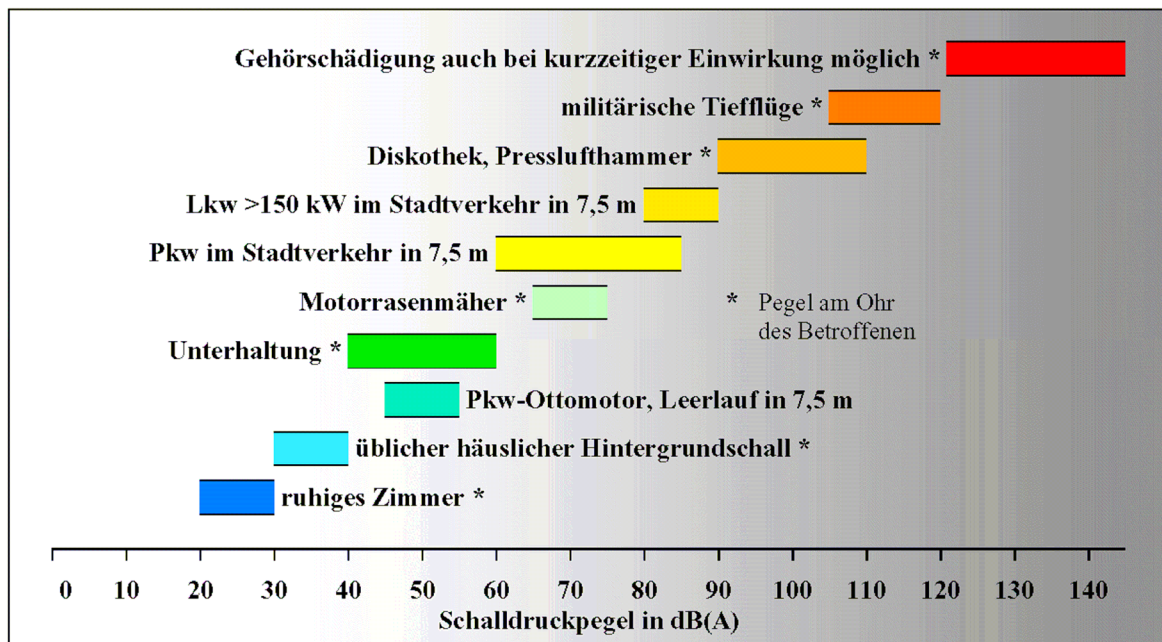


Abb. 23: Typische Schallpegel mit Ankerbeispielen⁸

Hörschäden durch Lärm lassen sich einteilen in akute akustische Traumata (Knall- und Explosionstrauma bedingt durch den Impusllärm, der sich durch einen plötzlichen Anstieg des Schalldruckpegels auszeichnet; der resultierende Schaden steigt mit steigendem Schalldruckpegel, steilerem Anstieg des Schalldruckpegels und zunehmender Länge des Schallereignisses) und chronische akustische Traumata (Walkman, Disko, Arbeitsplatz). Akute akustische Traumata werden durch einmalige Belastung mit kurzem, aber sehr hohem Schallpegel, zum Beispiel bei Schusswaffengebrauch oder durch Feuerwerkskörper, verursacht. Das chronische akustische Trauma ist durch eine dauerhafte Belastung mit hohen Schallpegeln bedingt.

⁸ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

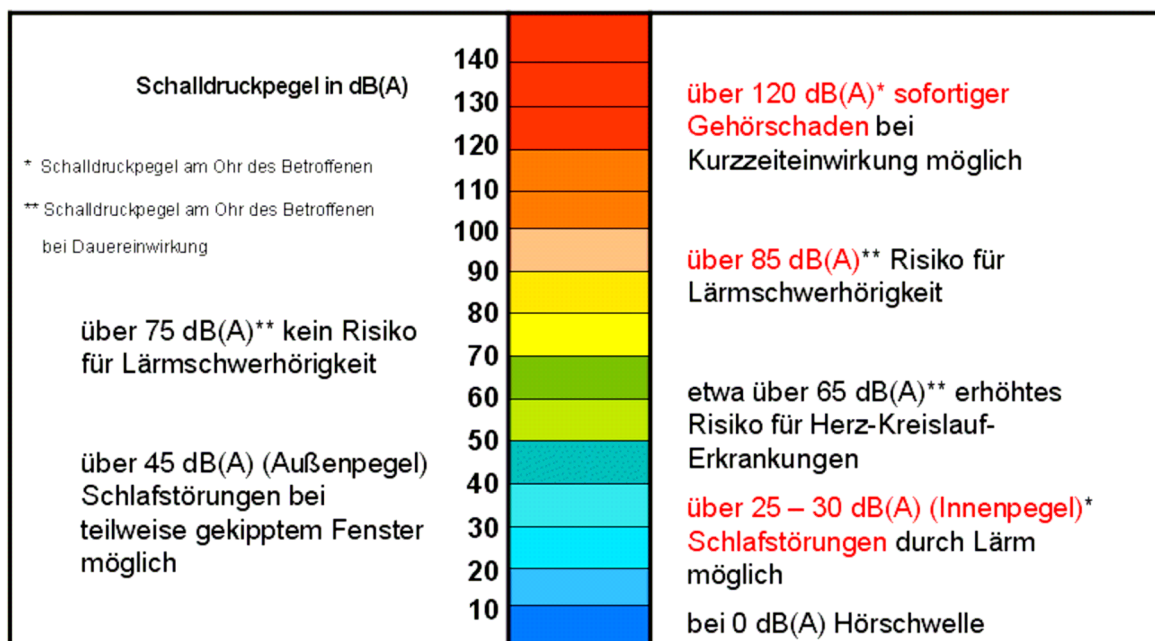


Abb. 24: Pegelgrenzen für aurale Lärmwirkungen⁹

Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Gehörs wird die Hörschwelle herangezogen, das heißt derjenige Schalldruckpegel, bei dem das Gehör Töne gerade noch wahrnimmt. Durch Lärmeinwirkung kann diese Hörschwelle verschoben werden. Zum Teil kann sich das Gehör wieder erholen und die ursprüngliche Hörschwelle wird wieder erreicht. In diesem Fall wird von einer zeitweiligen Hörschwellenverschiebung (TTS = temporary threshold shift) mit Stoffwechselstörung gesprochen. Wenn der Hörverlust aber nach einer längeren Zeitperiode (20-30 Tage) immer noch besteht, wird von einer dauerhaften Hörschwellenverschiebung (PTS = permanent threshold shift) mit einer direkten Schädigung der Sinneszellen ausgegangen.

Bei Maximalpegeln über 80-85 dB(A) beginnen die reversiblen Hörstörungen (TTS), die mit steigendem Schallpegel, Frequenz und Einwirkdauer zunehmen (Spreng, Firsching und Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1991; Ward 1963). Bei andauernder oder häufiger Schallbelastung dieser Intensität kann sich das Hörvermögen anfangs in Lärmpausen noch erholen, nach jahrelanger Lärmbelastung kommt es jedoch zur irreversiblen Schwerhörigkeit. Pegelspitzen über 120 dB(A) können zu einem akuten Lärmtrauma führen. Pegelgrenzen für aurale Lärmwirkungen sind noch einmal in der Abb.24 visualisiert.

Die Hörschwelle wird in einem Audiogramm für mehrere Frequenzen spezifisch bestimmt. Normalhörige haben einen Wert von 0 dB, bei Anstieg der Hörschwelle wird der Hörverlust im Audiogramm durch einen Kurvenverlauf unterhalb der 0 dB-Grenze angezeigt. Mit dem Alter ist ein gewisser Hörverlust zu erwarten, weshalb altersspezifische normative Hörschwellen definiert sind.

In Abb. 25 ist ein Audiogramm eines Normalhörigen (alle Werte sind auf 0 dB) und ein typisches Audiogramm einer Person mit lärmbedingter Hörschwellenverschiebung dargestellt. Typischerweise ist bei chronischer Lärmexposition die Hörschwelle bei 4 kHz am stärksten betroffen. Dies wird, weil diese Frequenz dem 5 gestrichenen c in der Musik

⁹ <http://www.lfu.bayern.de/laerm/fachinformationen/index.htm>

entspricht, auch "c5-Senke" genannt. Nach einem Knalltrauma ist üblicherweise die Hörschwelle bei 6 kHz besonders stark betroffen ("fis5-Senke").

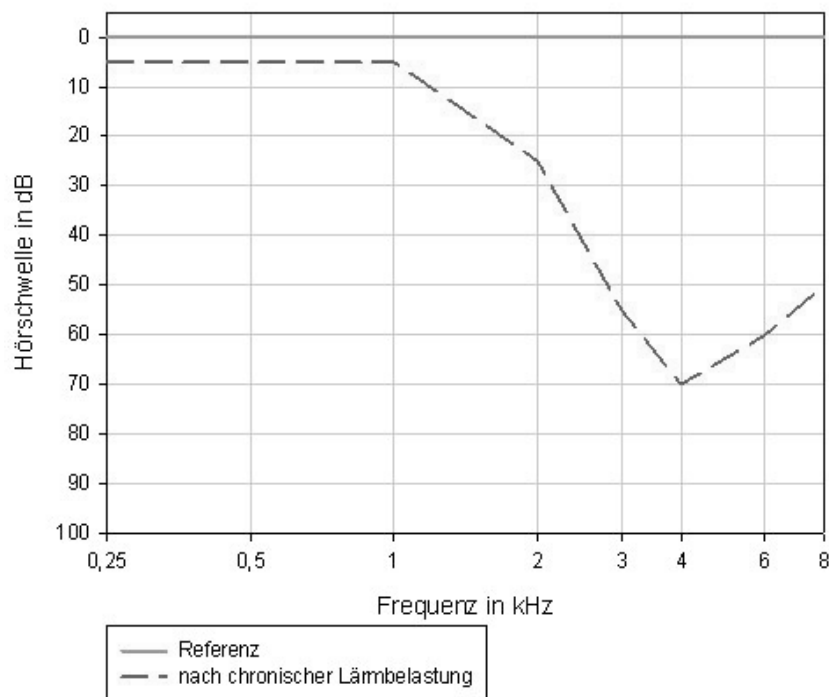


Abb. 25: Typisches Audiogramm einer Person mit Hörschwellenverschiebung nach chronischer Lärmbelastung im Vergleich mit einer Referenzperson ohne Hörverlust

Das Risiko einer Gehörschädigung nimmt mit der Dauer der Belastung und der Höhe des Schalldruckpegels zu. Höhere Schalldruckpegel führen schon nach kürzerer Zeit zu Gehörschäden als niedere Schalldruckpegel. Nach dem Energieäquivalenzprinzip ist bei Erhöhung des Schalldruckpegels um 3 dB nur noch die Hälfte der Zeit notwendig, um dasselbe Schadensrisiko zu erreichen. Das Risiko eines Gehörschadens bei 80 dB(A) für acht Stunden am Tag entspricht somit dem Risiko eines Gehörschadens bei 83 dB(A) für vier Stunden am Tag. Bei Übertragung dieses Energieäquivalenzprinzips auf Freizeitaktivitäten ergeben sich auch Gehörschadensrisiken insbesondere durch häufigen und langjährigen Konsum lauter Musik. Hohe Schalldruckpegel werden in Diskotheken und Konzerten und von tragbaren Musikabspielgeräten erreicht. In einer Untersuchung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt und des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit lagen die Schalldruckpegel in Diskotheken in Bayern im Durchschnitt bei 100 dB(A). Bei Besuch einer Diskothek für vier Stunden/Woche ergibt sich nach dem Energieäquivalenzprinzip ein Gehörschadensrisiko entsprechend einer Belastung von circa 90 dB(A) über 40 Stunden. Die Belastung liegt somit deutlich höher als der oben genannte Wert aus dem Arbeitsschutz von 80 dB(A) für 40 Stunden die Woche.

Im Zusammenhang mit Verkehrslärm treten Schallpegel der erörterten Intensität kaum auf, und so können sie in diesem Bericht über die Auswirkungen von Schienenlärm vernachlässigt werden (Ising und Maschke 1997).

3.6.2 Extra-aurale Wirkung von Schall

Neben dieser direkten Schädigung des Gehörs werden auch andere Folgen von Lärm diskutiert (extra-aurale Wirkungen), wozu ein vermindertes Sprachverständnis, eingeschränkte Leistungsfähigkeit, Belästigungen, Schlafstörungen und Stressreaktionen gehören. Des Weiteren gibt es starke Hinweise darauf, dass erhöhte Lärmbelastung das Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen, insbesondere Bluthochdruck und Herzinfarkt, erhöht.

Bei den extra-auralen Wirkungen spielt nicht nur die Lärmbelastung (beschrieben z.B. durch die Höhe des Schalldruckpegels), sondern auch die Lärmbelästigung, also die subjektive Wahrnehmung und Verarbeitung der Lärmbelastung, eine große Rolle.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen gesundheitsgefährdeten Bereiche durch Schienenlärm, wie sie in Abb. 27 angedeutet sind, näher eingegangen.

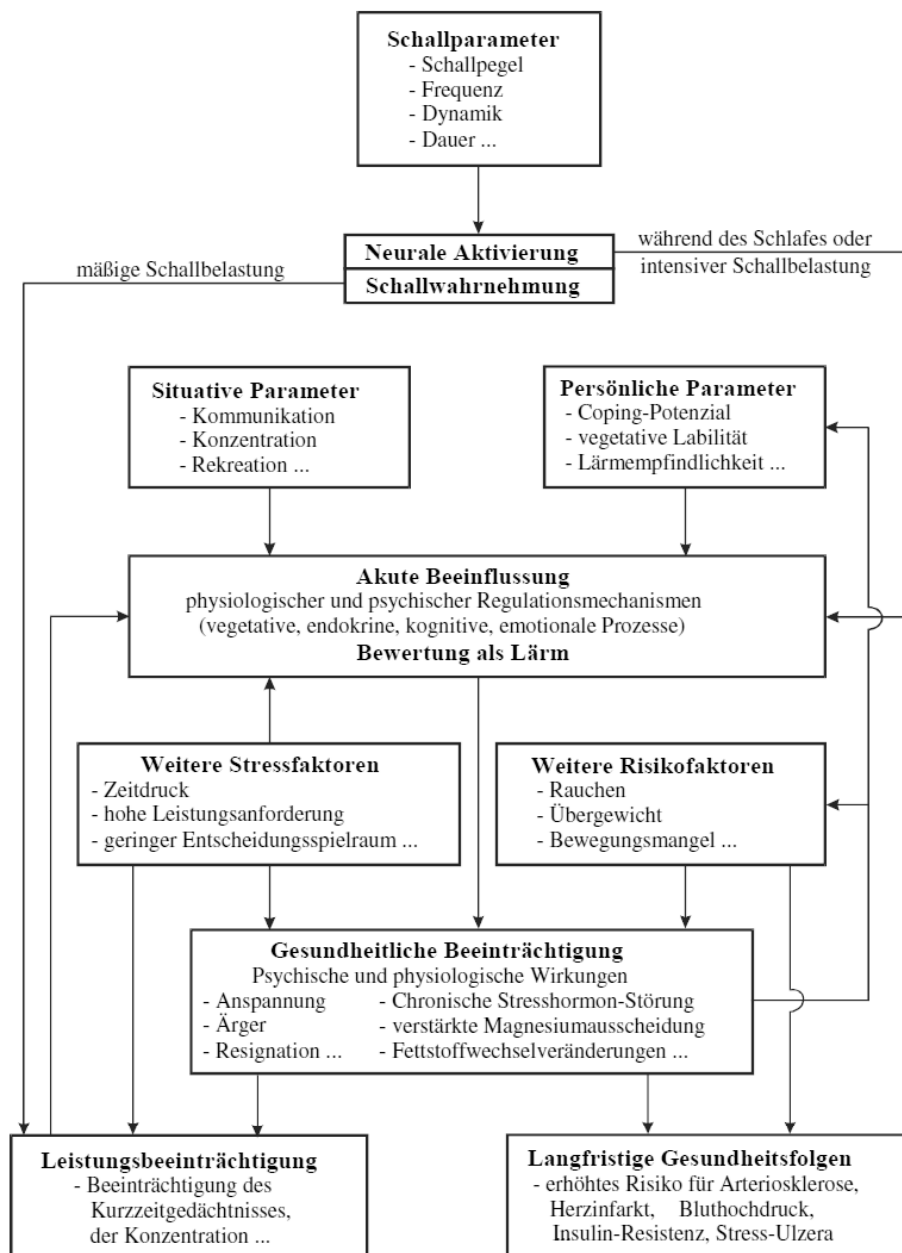


Abb. 27: Komplexer Kreislauf extra-auraler Lärmwirkungen (Ising und Kruppa 2001)

3.6.2.1 Moderatoren

Da bei den extra-auralen Lärmwirkungen nicht allein die akustische Belastung, sondern noch viele weitere Faktoren über den Grad der Belästigung und damit auch Gesundheitsgefährdung bestimmen, kann Lärm nur etwa zu einem Drittel durch physikalisch messbare (Geräusch-)Merkmale beschrieben werden. Lärm ist somit ein psycho-physikalischer Begriff. Die Lärmforschung geht davon aus, dass situative, personale und soziale Faktoren die Lärmwirkung verstärken bzw. abschwächen können und somit die Funktion von Moderatorvariablen einnehmen (Ising u. a. 2001; Ising und Maschke 1997). Es gibt eine ganze Liste von gut und weniger gut untersuchten Parametern.

Die folgende fünf-stufige Unterteilung wurde durch eine inhaltliche Gruppierung der Moderatorvariablen gebildet.

1. Demographische Variablen:

Alter
Geschlecht
Bildung
Sozioökonomischer Status (SOS)
Einkommen
Stadt/Land
Familiengröße
Wohndauer
Familienstand
Hausbesitzer

2. Persönliche Faktoren:

Lärmempfindlichkeit
wahrgenommene Lautheit
Einstellungen gegenüber der Lärmquelle (z.B. als Transportmittel)
Gebrauch des Transportmittels
Qualität der Wohnumgebung / Nachbarschaft (Zufriedenheit)
Hörschwellen
Kontrollwahrnehmung
Angst (Bewertung des Verkehrsmittels als gefährlich)

3. Akustische Faktoren:

Spitzenpegel, Dauerschallpegel
Geschwindigkeit des Zuges
Anzahl der Züge
Expositionsdauer
Zugart (Passagier-, Güter-, Schnellzug)
Frequenzbereich
Lärm-Ruhe-Intervalle
Anstiegszeiten
Distanz zum Gleis
Isolierte Fenster (j/n)
Position des Schlafzimmers
Art des Hauses (Stein/Holz/Fachwerk)

4. Nicht akustische Faktoren:

Tageszeit
Jahreszeit
Beschäftigung während der Schallbelastung,
Umgebungsfaktoren (meteorologische Umstände, Hindernisse wie Gebäude die Schallausbreitung beeinflussen)

Der wichtigste situative Moderator ist der Zeitpunkt der Lärmbelastung. So reagieren Menschen empfindlicher auf die gleiche Schallintensität in der Nacht und in den Übergangszeiten zwischen Tag und Nacht (Gyr und Grandjean 1984; Ollerhead 1976). Des Weiteren besteht ein zirkaseptaner (wöchentlicher) Rhythmus mit dem Wechsel von Arbeit und Erholung. Dies ist damit erklärbar, dass am Wochenende, besonders am Sonntag, Erholung gesucht und somit ein höherer Anspruch an die Umwelt gestellt wird. Ist dieser nicht gewährleistet, steigt die subjektive Belästigung (Schuschke und Maschke 2002). Einen weiteren wichtigen Moderator macht die jeweilige Situation aus, in der der Lärm unmittelbar erlebt wird. So besteht eine stärkere Belastung bei Tätigkeiten, die eine hohe Konzentration benötigen, z.B. Lesen, bei Unterhaltungen und im Schlaf (Ising u. a. 2001). Weiter scheint belegt, dass die Belästigung steigt, wenn Menschen bei der

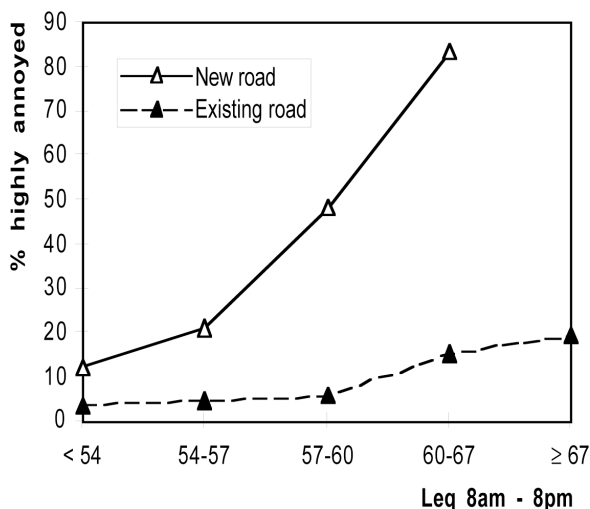
Ausübung einer Tätigkeit durch Lärm gestört werden oder die Ausführung der Tätigkeit unter der Lärmbelastung nicht möglich ist (Ising u. a. 2001).

Personenbezogene Moderatoren sind z.B. die Lärmempfindlichkeit des einzelnen Individuums, wie auch die Einstellung zur Lärmquelle (Ising und Maschke 1997).

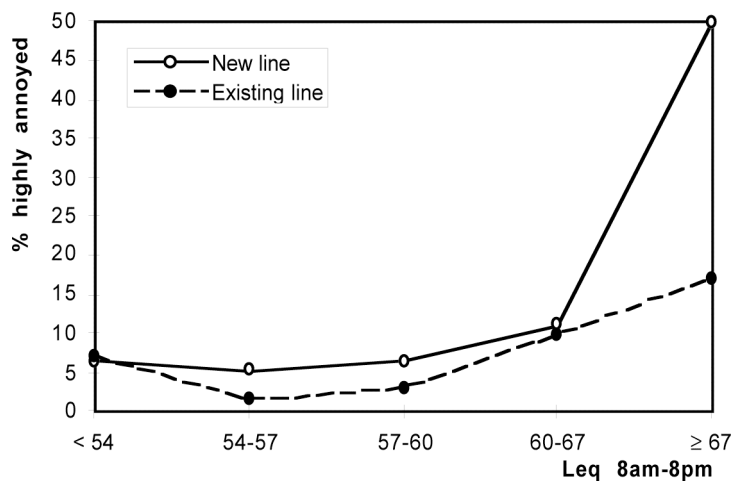
Einen sozialen und sehr bedeutenden Moderator stellt der Einfluss auf die Situation dar. So kann ein Geräusch im Freien oder bei der Arbeit ohne jede Belästigung wahrgenommen werden. Wirkt dieses jedoch in der eigenen Wohnung und ist nicht kontrollierbar, kann dies zu einer ungleich stärkeren Reaktion führen (Schuschke und Maschke 2002). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Babisch u. a. (2001), die feststellen, dass Personen, die die Fenster noch schließen können und damit eine gewisse Kontrolle über den Lärm haben, diesen als weniger belästigend empfinden als diejenigen, die diese Kontrolle nicht mehr haben.

Ein zusätzlicher Moderator kommt der Beeinträchtigung des Verhaltens gleich, wie etwa der vermehrte Aufenthalt in den Innenräumen, um das Befinden oder das akute Leistungsniveau zu verbessern und auch die Verhaltenskonsequenzen, die eine adäquate Schlafruhe gewährleisten sollen, wie etwa das Geschlossenhalten von Fenstern, das Benutzen von Gehörstöpseln oder die Einnahme von Schlafmitteln (Schuschke und Maschke 2002).

Wichtig ist ebenfalls die Geschichte der Lärmexposition; so berichteten Lambert, Champelovier und Vernet (1998), dass bei neu angelegten Straßen oder Bahnstrecken die Belästigung bei gleichen Lärmpegeln höher ist als die Belästigung an schon vorhandenen Strecken. Diesen Effekt nennt er den New-Infrastructure-Effect (Siehe auch Abb. 27).



Die Belästigung von Straßenlärm in Bezug auf den äquivalenten Dauerschallpegel am Tag (8.00 bis 20.00 Uhr) bei alten und neuen Strecken.



Die Belästigung von Schienenlärm in Bezug auf den äquivalenten Dauerschallpegel am Tag (8.00 bis 20.00 Uhr) bei alten und neuen Strecken

Abb. 27: New-Infrastructure-Effect (Lambert, Champelovier und Vernet 1998)

Der beschriebene Effekt legt beispielhaft nahe, dass Lärm (im Sinne der subjektiven Geräuschbelastung durch Schall) und in diesem Zusammenhang insbesondere die individuelle Belästigungsschwelle nicht allein durch die Angabe von physikalischen Werten bestimmt werden kann. Bei konstanten Umgebungsbedingungen steigt jedoch der Grad der Belästigung mit dem Schallpegel an. So müssen bei der Betrachtung von Lärm immer der Schall als physikalische Größe wie auch die Moderatoren Beachtung finden (Ising u. a. 2001).

3.6.2.2 Belästigung

Die Lärmbelästigung ist im Gegensatz zu einer messbaren Schallbelastung eine subjektive Einschätzung. Zwei ähnliche Geräusche können – selbst bei gleichem Schallpegel – sehr unterschiedlich empfunden werden. Ein Wasserfall in einer idyllischen Bergwelt wird allgemein mit Erholung gleichgesetzt, während eine befahrene Autobahn als belästigend wahrgenommen wird.

Wie bereits zuvor erörtert hängt das Ausmaß der Belästigung nur zu etwa einem Drittel von akustischen Eigenschaften des Lärms ab. Weitere wichtige Einflussfaktoren stellen der Informationsgehalt, die Situation, in der das Geräusch auftritt (körperliche Arbeit, konzentrierte intellektuelle Tätigkeit, Schlaf) und individuelle Faktoren (allgemeine Lärmempfindlichkeit, Einstellung gegenüber der Lärmquelle, Kontrolle über die Lärmquelle usw.) dar.

Die am häufigsten untersuchte subjektive Wirkung von Lärm stellt die Belästigung dar (Stansfeld und Matheson 2003), wobei eine übereinstimmende, klar einheitliche Definition des Begriffes bis jetzt nicht gegeben ist. Der englische Begriff „annoyance“ (Belästigung, Störung, Ärger, Verdruss) wird in den Studien häufig mit einer Definition von Lindvall und Radford (1973) festgelegt, welche Belästigung als ein Gefühl der Unzufriedenheit beschreiben, das im Zusammenhang mit einem Stoff oder Umstand steht und von dem ein Individuum oder eine Gruppe von Individuen Benachteiligung erfährt.

Schall, wie auch viele andere Umweltreize, können belästigend wirken. Dies drückt sich dadurch aus, dass betroffene Personen versuchen, die Exposition möglichst zu vermindern oder, falls möglich, das exponierte Gebiet zu verlassen, sprich in Vermeidungsverhalten fliehen. Diese Tatsache deutet an, dass Belästigung zu einer

Verhaltensänderung führen kann und dies wiederum rückwirkend die Belästigung steigert. In diesem Sinne scheint es essentiell, nochmals darauf hinzuweisen, wie wichtig verschiedenste Moderatoren für subjektive Lärmbewertungen sein können (Schuschke und Maschke 2002). In das Belästigungsurteil gehen somit sowohl die schon oben genannten Moderatoren aber auch schallbezogene Variablen wie z.B. Schallpegel, Schallpegelwechsel, Frequenzzusammensetzung, Frequenzhaltigkeit, Impulshaltigkeit und die Anzahl der Ereignisse mit ein (Ising und Maschke 1997).

Laut einer repräsentativen Umfrage des Umweltbundesamtes (siehe Abb. 29) ist der Straßenverkehr die häufigste Ursache von Belästigung in Deutschland. Äußerst oder stark belästigt durch Straßenverkehrslärm fühlen sich 10 %, weitere 20 % fühlen sich mittelmäßig belästigt und 30 % etwas belästigt. Nur 40 % fühlen sich gar nicht durch Straßenverkehrslärm belästigt. Nachbarschaftslärm liegt an zweiter Stelle der Ursachen für Lärmbelästigung. Es folgen Flugverkehr, von dem sich jeder Dritte und Schienenverkehr, von dem sich jeder Fünfte belästigt fühlt.

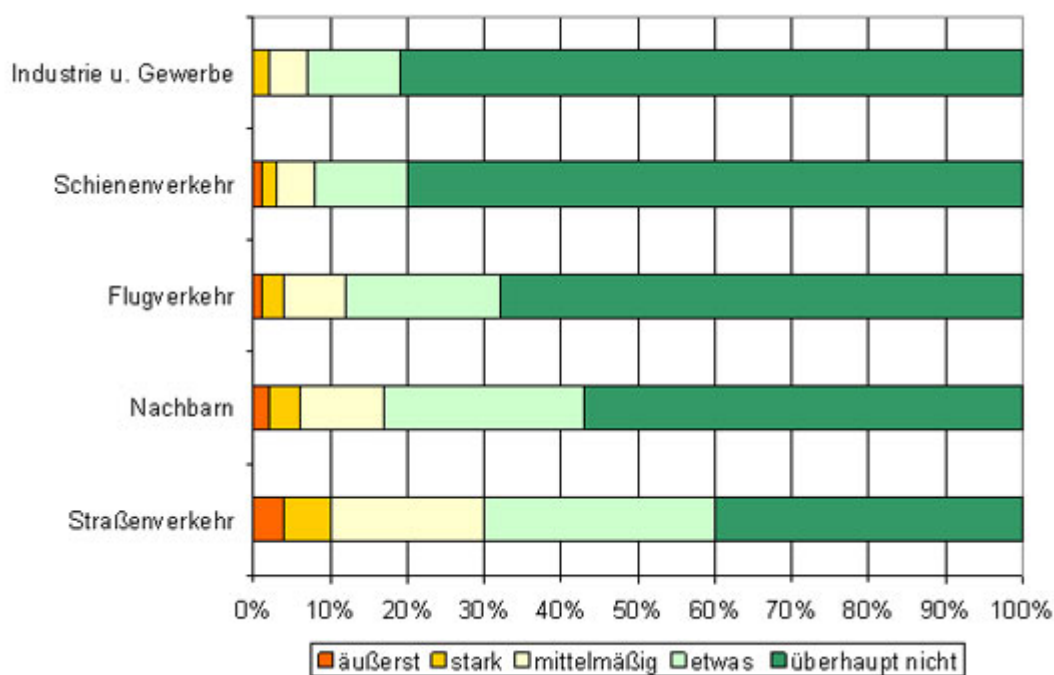
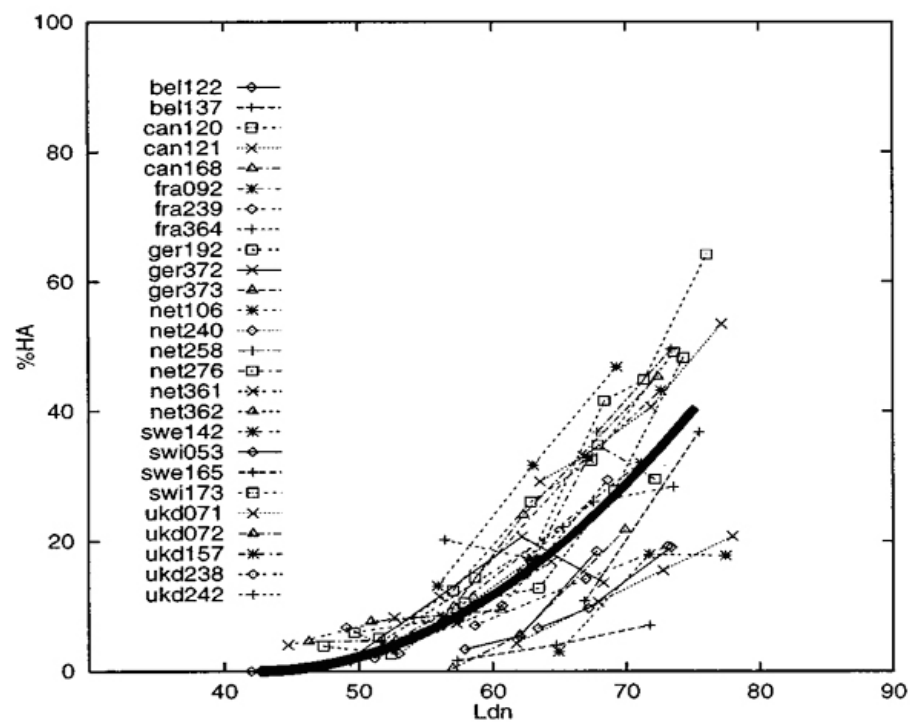
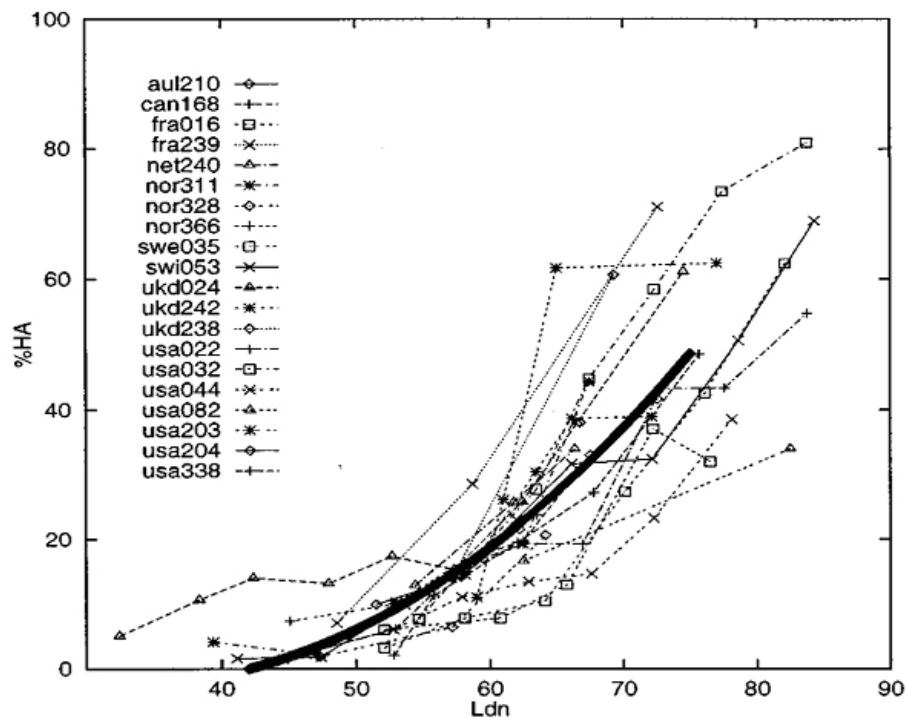


Abb. 29: Lärmbelästigung der Bevölkerung nach Geräuschquellen 2004 (UBA Berlin, 2004)

Für Straßen-, Flug und Schienenlärm wurden zahlreiche Dosis-Wirkungsbeziehungen für den Zusammenhang von Schallexposition und Belästigung nachgewiesen. So fassten z.B. Miedema und Vos (1998) in einer Metaanalyse 55 methodisch vergleichbare Untersuchungen zu dieser Fragestellung zusammen. Sie konnten zeigen, dass bei gleichem Schallpegel Fluglärm zu den höchsten und Schienenlärm zu den niedrigsten Belästigungsraten führt. Der Straßenlärm nimmt eine mittlere Position ein. Des Weiteren ermittelten sie eine Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen dem prozentualen Anteil der stark Belästigten und dem gemittelten Tag-Nacht-Schallpegel (L_{dn}). Diese ist der Abb. 29 zu entnehmen (Miedema und Vos 1998). Der L_{dn} ist ein 24-Stunden-Dauerschallpegel, bei dem der Dauerschallpegel in der Nacht (22.00 bis 6.00 Uhr) einen Zuschlag von 10 dB(A) erhält.



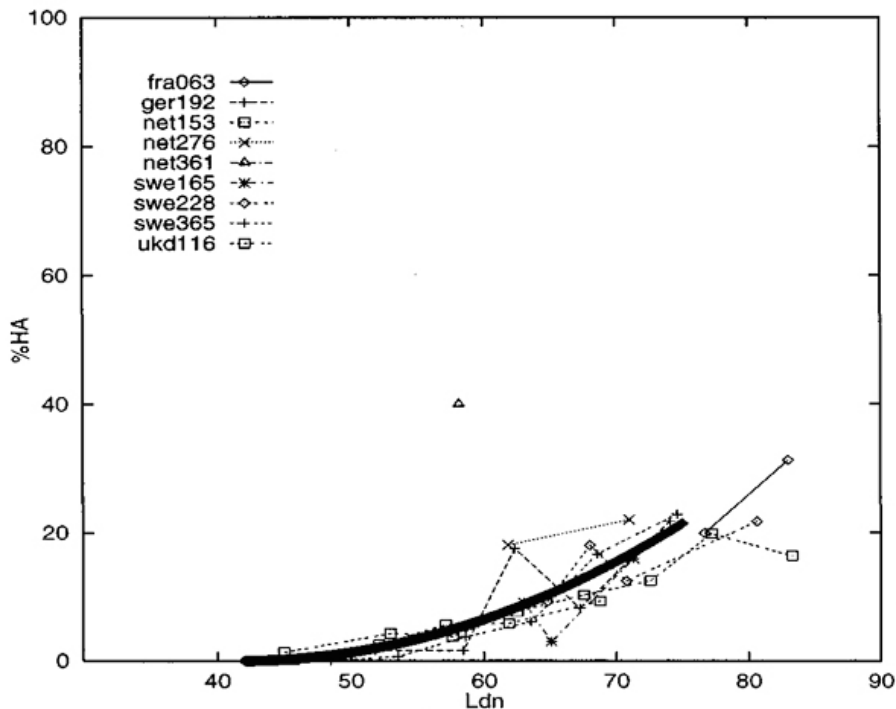


Abb. 29: Highly annoyed people (%) in Abhängigkeit vom L_{dn} , bezogen auf Fluglärm (oben), Straßenlärm (mittig) und Schienenlärm (unten) (Miedema und Vos 1998)

Weiterhin anzumerken sei, dass im Allgemeinen ein Anteil von 10 bis 15 % der Personen, die sich stark belästigt fühlen, als Schwelle für die lärmbedingte Belästigung festgesetzt wurde, da von einem Anteil von 10 bis 15 % besonders empfindlicher Personen in der Bevölkerung auszugehen ist (Griefahn 1985).

Inwieweit Belästigung zu einem gesundheitlichen Risiko führt, ist noch nicht umfassend geklärt. Vorzustellen sei z.B. Belästigung als psychosozialer Stressor, der schließlich zu dauerhaften biologischen Stressreaktionen und damit physiologischen Aktivierungsprozessen führt, die in ernsthaften längerfristigen Erkrankungen münden können (dazu in späteren Abschnitten mehr). In der Definition von Gesundheit der WHO als „ein(em) Zustand des vollständigen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlergehen(s) und nicht nur (des) (...) Fehlen(s) von Krankheit und Gebrechen“ (WHO, 1947), kann Belästigung als eine Einschränkung der Gesundheit angeführt werden. Weiter steht darin geschrieben, dass der Besitz des bestmöglichen Gesundheitszustandes ein Grundrecht jedes Menschen sein muss. Dies wiederum führt zu der impliziten Verpflichtung der Bundesrepublik Deutschland, ihre Bevölkerung vor Belästigung durch Umweltlärm bestmöglich zu schützen. Eine Implementierung erfolgt im Sinne des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes. Der Zweck dieses Gesetzes besteht unter anderem darin, den Menschen vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu bewahren. Weiterhin wird darin festgehalten, dass Belästigung eine schädliche Umwelteinwirkung sei, sofern sie erheblich ist (BImSchG). Die daraus resultierende Frage, ab wann eine Belästigung als erheblich einzustufen sei, beantwortet Ising mit derjenigen Schwelle, ab der sich 25 % der Bevölkerung oder mehr belästigt fühlen. Diese Daten schließt er aus einer Umfrage von durch Verkehrslärm betroffenen Anwohnern, die nach ihrer Vorstellung über Erheblichkeit befragt wurden.

3.6.2.3 Störung der Kommunikation

Kommunikationsstörungen treten dann auf, wenn der gewünschte Schall (Sprache) von dem ungewünschten Schall (z.B. Verkehrslärm) für den Hörer überdeckt wird und der Sprecher die Stimme anheben muss. Die Auswirkungen der Störung sind zum einen vom Schallpegel und der Frequenz abhängig und zum anderen vom Sprachverhalten, dem Informationsgehalt des Textes, der Intelligenz des Hörers und ob ein Sichtkontakt besteht oder nicht (Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt 1985).

Besonders hervorzuheben ist die sprachliche Kommunikation in ihrer essentiellen Notwendigkeit für die Entfaltung der Persönlichkeit und die Auseinandersetzung mit der Umwelt. Lärm kann die Kommunikation erheblich beeinträchtigen und so bei den Betroffenen zur Verärgerung und Einengung der Persönlichkeit führen (Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt 1985). Die Belästigung betroffener Personen steigt, wenn diese sich in einer Tätigkeit gestört fühlen oder sogar am Ausüben dieser Tätigkeit gehindert werden. Beide eben beschriebenen Aspekte können auch durch lärmbedingte Kommunikationsstörungen auftreten, wodurch eben diese Störung als sehr belästigend einzustufen ist (Ising u. a. 2001). Im privaten Bereich steht die Störung des Rundfunk- und Fernsehprogramms sowie die Störung des privaten Gesprächs im Vordergrund (Schuschke und Maschke 2002). Der auftretende Verkehrslärm (z.B. Zuglärm) behindert ein gewünschtes Hörereignis oder nötigt die Betroffenen dazu, diesen aktiv zu bekämpfen; z.B. durch das Anheben der Stimme, genaueres Zuhören, Rückfragen, verstärkte Konzentration, gezwungene Pausen oder Verhaltensmaßnahmen wie das Schließen der Fenster (Ising u. a. 2001). Diese Anstrengungen zur Verringerung der Störung können zur erlebten Belästigung beitragen und auf diese Weise Stressreaktionen auslösen (Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt 1985).

Besonders betroffen sind Kindergärten, Schulen und andere Bildungseinrichtungen, in denen die Informationsvermittlung vorwiegend akustisch erfolgt. In diesen Institutionen hat sprachverdeckender oder sprachdrosselnder Verkehrslärm direkte negative Folgen. Genau aus diesem Grund sollte darauf geachtet werden, dass der Sprechschallpegel, welcher bei ruhiger Sprechweise 50-55 dB(A) in 1m Abstand beträgt, in der Muttersprache 10 dB(A) und bei schwierigen oder fremdsprachigen Texten etwa 20 dB(A) über dem jeweiligen Störschall liegt. Unter dieser Differenz ist die Sprachverständlichkeit kaum beeinträchtigt. Andererseits kann mit einer wesentlichen Beeinträchtigung des Leistungsvermögens gerechnet werden, sobald die ungeteilte Aufmerksamkeit durch die auszuführende Tätigkeit gefordert wird, gleichzeitig aber für diese Aufgabe die Kommunikation, die lärmbedingt behindert wird, notwendig ist. Diese Situation kann zu einer Stressreaktion und einer damit erhöhten Müdigkeit und Angespanntheit sowie zu einer Blutdruck- und Katecholaminreaktion führen (Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt 1985). Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass eine entspannte Konversation (mit etwa 1m Abstand) in Wohnräumen bei einem Störschall von 45 dB(A) und im Freien bei 60 dB(A) möglich ist. Die Abb. 30 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Geräuschpegel und dem Hörer-Sprecher-Abstand. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass mit steigendem Pegel eine Zunahme der Kommunikationsstörung einhergeht (Maschke und Hecht 2001).

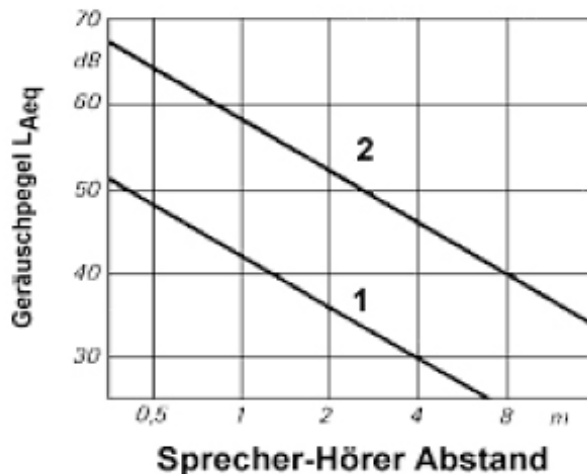


Abb. 30: Zusammenhang zwischen dem gerade noch zulässigen Störgeräuschpegel und dem Sprecher-Hörer-Abstand für eine gute Sprachverständlichkeit und eine entspannte Unterhaltung (Kurve 1) und eine gerade noch akzeptable Sprachverständigung und angehobene Sprechweise (Kurve 2)

Für die Bewertung von Kommunikationsstörungen hat sich der Artikulationsindex oder auch Sprachinterfrequenzpegel durchgesetzt, der eine recht zuverlässige Vorhersage der Sprachverständlichkeit ermöglicht, wobei die Verfahren recht aufwendig sind, da sie auf der Messung von Schallpegel in verschiedenen Frequenzbändern beruhen. Zudem sind sie für stark schwankende Geräusche noch nicht gut angepasst. Für viele Umweltgeräusche insbesondere Verkehrslärm und andere breitbandige Geräusche kann auch der A-bewertete Schallpegel zuverlässige Ergebnisse für die Prognose der Sprachverständlichkeit leisten. Diese Größe hat auch den Vorteil, dass sie für die Vorhersage anderer Wirkungen geeignet ist.

Abschließend sei festgehalten, dass die akustische Kommunikation essentiell für die gesunde Entwicklung eines Menschen ist und folglich für Kinder im Spracherwerbsalter eine besondere Anforderung für den Schutz der ungestörten Kommunikation gelten muss (Schuschke und Maschke 2002). Ähnliches gilt selbstverständlich für Personen mit Hörbehinderung (Ising und Maschke 1997).

3.6.2.4 Beeinträchtigung der Leistung

Die Untersuchungen der lärmbedingten Leistungsstörungen befassen sich entweder mit der direkten Störung der Konzentration durch Lärm oder aber mit der Leistungsminderung als Folge lärmgestörten Schlafs (Bonfond u. a. 2008; Bronzaft und McCarthy 1975; Cohen u. a. 1980). Die Studien untersuchen sehr unterschiedliche qualitative Ausprägungen von Leistung und auch die Operationalisierung der Lärmvariablen ist uneinheitlich. Dennoch liegt eine einhellige Tendenz darin, dass körperliche und/oder mentale Leistungen, die viel Aufmerksamkeit benötigen, unter Zeitdruck stehen oder komplexe Entscheidungen verlangen, stärker durch Lärm gestört sind (schon ab Mittelungspegeln von 45 dB(A)) als diejenigen, die weniger Aufmerksamkeit fordern (Ising u. a. 2001). Ein weiterer Aspekt spiegelt wider, dass intermittierender oder impulsartiger Lärm bei konzentrierter, geistiger Arbeit besonders störend wirkt, da impulsartige Schallspitzen zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Kurzzeitgedächtnisses und damit verbunden zu Leistungseinbußen führen können. Daraus lässt sich schließen, dass die Abruptheit der Schalländerungen ebenso, wenn nicht sogar gravierender, für die Leistungsbeeinträchtigungen verantwortlich sind als die

Pegelhöhe an sich (Klatte, Kilcher und Hellbrück 1995). In Belastungssituationen ist es möglich, die lärmbedingte Leistungsminderung durch erhöhte Konzentration zu kompensieren oder sogar kurzzeitig eine Leistungssteigerung zu erreichen; jedoch folgt dieser vermehrten Anstrengung eine gesteigerte Ermüdbarkeit und eine geringere Belastbarkeit (Der Sachverständigenrat für Umweltfragen 1999).

Laut De Joy (1984) besteht die Vermutung, dass Kinder bei erhöhtem Lärmpegel in Ihrer Fähigkeit zu sprechen und zu lesen beeinträchtigt werden. So beschreiben auch Maschke und Hecht (2001), dass eine verspätete Behandlung von lärmbedingten Sprachstörungen zu einer Lese-Rechtschreib-Schwäche führen kann. Die Bestimmung der Lesefähigkeit bei Fluglärm behandelten unter anderem auch Grenn (1982) in New York und Stansfeld u. a. (2005). Beide Studien ergaben einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Verschlechterung der Lesefähigkeit beziehungsweise des Leseverständnisses bei zunehmendem Fluglärm. Abb. 31 zeigt, dass der Prozentsatz von Schülern, deren Lesefähigkeit unterhalb ihrer Klassenzugehörigkeit lag, mit zunehmender Schallbelastung stieg. Abb. 32 zeigt, dass das Leseverständnis mit steigendem Lärm linear abfällt (Green, Pasternack und Shore 1982).

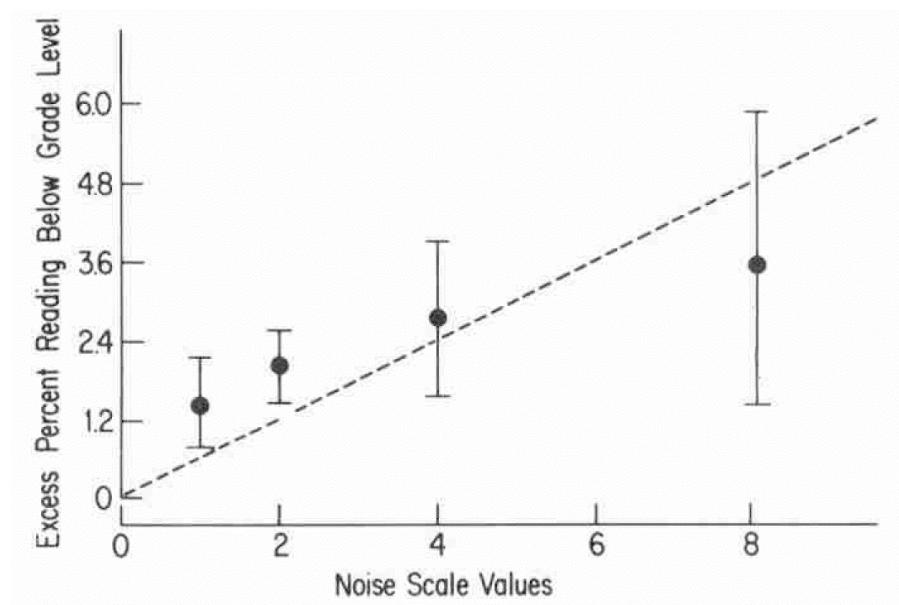


Abb. 31: Prozentsatz von Schülern, deren Lesefähigkeiten unterhalb ihrer Klassenzugehörigkeit lag (Green, Pasternack und Shore 1982)

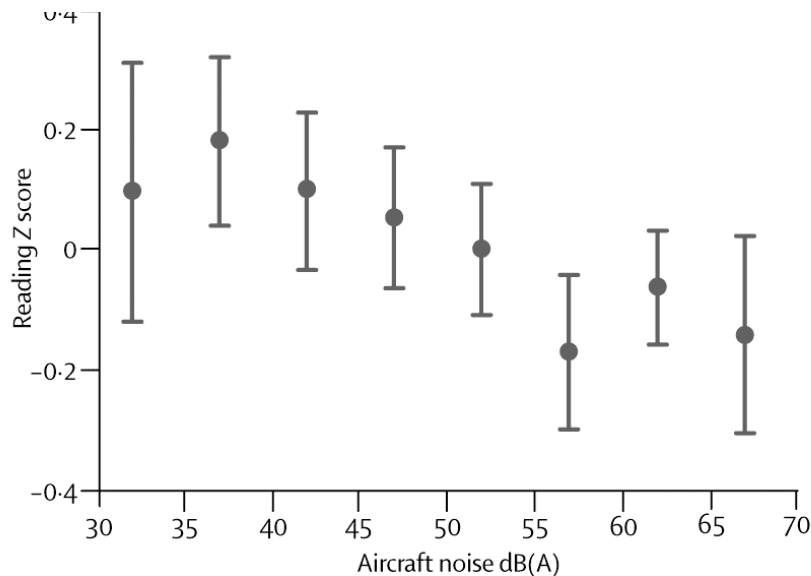


Abb. 32: Zusammenhang zwischen dem Leseverständnis (reading comprehension) und Fluglärm (Stansfeld u. a. 2005)

In Untersuchungen bezüglich der Leistung von Schülern zeigt sich einheitlich eine negative Lärmwirkung hinsichtlich schulischer Ergebnisse (Bronzaft und McCarthy 1975; Cohen u. a. 1980; Green, Pasternack und Shore 1982). So untersuchten Cohen u. a. (1980) bei Schulkindern der dritten und vierten Klasse die Auswirkungen von Fluglärm während des Unterrichts auf den Blutdruck und die mentale Leistung. Die Ergebnisse der Studie ergeben, dass die Kinder aus lauterer Schulen mehr Zeit benötigen für schulische Aufgaben und kognitive Arbeiten früher abbrechen. Besuchten die Kinder schon seit längerer Zeit die lärmbelastete Schule, lassen sich diese leichter von Stimmen ablenken und machen mehr Fehler (Cohen u. a. 1980). Eine Studie (Evans, Bullinger und Hygge 1998) in der Umgebung des alten und des neuen Flughafens von München untersuchte ebenfalls die Leistung von fluglärmexponierten Kindern, bei denen durch die Verlegung des Flughafens der Vergleich mit und ohne erhöhte Schallbelastung durch den Fluglärm gegeben war. Die Kinder am alten Flughafen zeigten schlechtere Leseleistungen wie auch eine reduzierte Erinnerungsleistung des Langzeitgedächtnisses. Die Schüler aus dem Gebiet um den neuen Flughafen (vor der Aufnahme des Flugverkehrs) zeigten keinen Unterschied in allen untersuchten Bereichen verglichen mit den weiter entfernt wohnenden Kindern. Nach der Umstellung des Flugverkehrs zeigten sich jedoch signifikante Unterschiede, deren Werte vergleichbar mit denen der Kinder aus dem Gebiet des alten Flughafens waren. Diese Verschlechterung der Leistungen begann nach Einsetzen des Flugverkehrs und war im zweiten Jahr nach Bestehen des Flughafens deutlich ausgeprägt.

3.6.2.5 Schlafstörungen

Lärmbedingte Schlafstörungen werden von den Betroffenen als besonders belastend empfunden, vor allem wenn diese das Befinden oder gar die Leistung herabsetzen. In chronischer Form sind Schlafstörungen, wie sie z.B. durch nächtlichen Verkehrslärm hervorgerufen werden, als Gesundheitsrisiko einzustufen. Zur Erfassung von Schlafstörungen werden objektive und subjektive Verfahren eingesetzt. Die objektive Methode in der schlafmedizinischen Diagnostik zur Erfassung der biologischen Prozesse stellt die Schlafpolysomnographie dar, die Hirnaktivität (Elektroenzephalogramm, EEG),

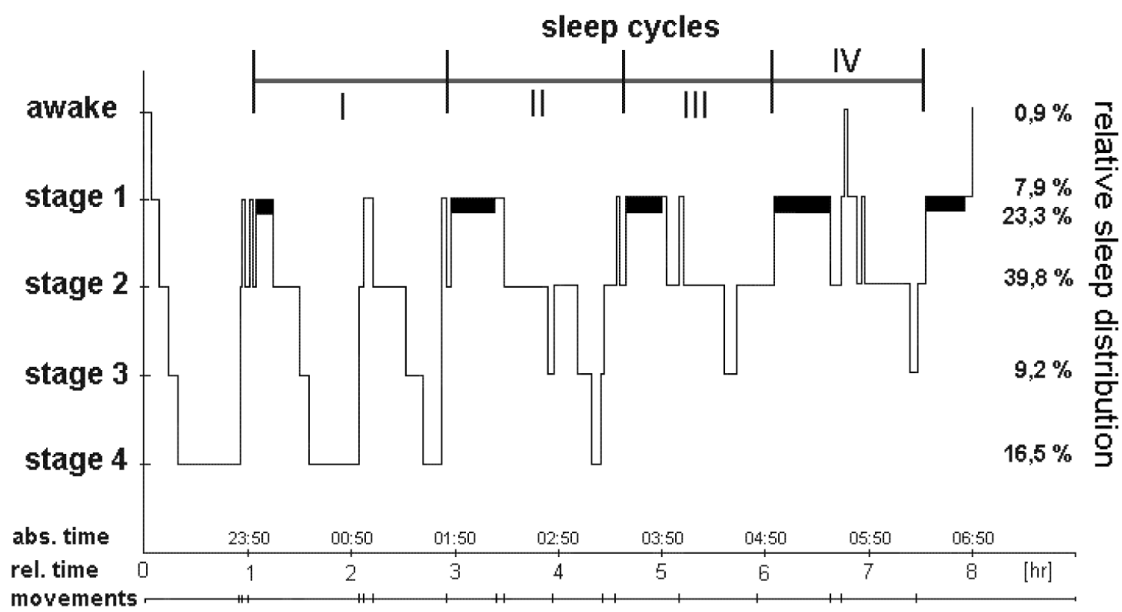
Augenbewegungen (Elektrookulogramm, EOG), Herzaktivität (Elektrokardiogramm, EKG) und Muskeltonus (Elektromyogramm, EMG) aufgezeichnet und als Hypnogramm (Schlafprofil) abträgt (siehe nächster Abschnitt). Damit können auch Wachphasen (Aufwachreaktionen), Schlafstadien und der Anteil der verbrachten Zeit in diesen Stadien eines normalen gesunden Schlags beurteilt werden. In Fragebögen und Interviews dagegen werden die subjektive Schlafqualität, die Müdigkeit, berichtete Einschlafschwierigkeiten und Aufwachreaktionen sowie die Stimmung und das Befinden nach gestörtem Schlaf erfragt. Im Folgenden wird näher auf die Zeitarchitektur des Schlags mit seinen Stadien und Zyklen wie auch auf die Störung des Schlags durch Verkehrslärm eingegangen.

3.6.2.6 Schlaf, Schlafstadien und Schlafstruktur

Schlaf ist kein Zustand genereller motorischer, sensorischer, vegetativer und psychischer Ruhe, sondern ein dynamischer Prozess (Ising und Maschke 1997). Der Schlaf ist für den menschlichen Organismus essentiell, da letzterer während des Schlafens eine körperliche (im Tiefschlaf), wie aber auch eine geistige und emotionale Erholung (im REM-Schlaf) erfährt (Köckemann 2002).

Der Schlaf ist in zwei Schlafphasen und in fünf Schlafstadien eingeteilt. Diese Stadien laufen in einer zeitlichen Reihenfolge während der Schlafzeit ab und können in einem Schlafhypnogramm abgebildet werden.

Die erste Schlafphase besteht aus den Schlafstadien 1-4 (Non-REM Schlafstadien). Der Schlaf beginnt mit dem Übergang vom Wachzustand in das erste Stadium und wechselt dann nach wenigen Minuten in das zweite Stadium. Wird der Schläfer oder die Schläferin nicht gestört, gelangt er/sie nach einer kurzen Verweildauer ins dritte Stadium und schließlich in den Tiefschlaf (Stadium 4). Dabei nimmt die Weckschwelle mit jedem Stadium zu. Die zweite Schlafphase wird REM-Schlaf (Rapid Eye Movements) oder auch Traumschlaf genannt. Der Name leitet sich von den heftigen Augenbewegungen ab (Henn 1996).



(Stage 1-4 = Non-REM 1-4; der Balken entspricht dem REM-Schlaf)

Abb. 33: Typisches Schlafhypnogramm unter Ruhebedingungen

Wie in der Abb. 33 des Schlafhypnogramms bei einem jungen ungestörten Schläfer zu erkennen ist (der Proband schlief bei einem nächtlichen Mittelungspegel von $L_{eq,innen} < 30$ dB(A) im Schlaflabor des Institutes für Technische Akustik (Technische Universität, Berlin), kommt es im nächtlichen Schlafrhythmus zuerst zu einer Schlafvertiefung (Stadien 1-4), gefolgt von einer schnellen Schlafverflachung, welcher anknüpfend der REM-Schlaf folgt. Diesen Schlafzyklus durchwandert der Schlafende in einer achtstündigen Nacht etwa 4-5mal. Die Verweildauer in den tiefen Schlafstadien nimmt mit der Schlafzeit ab, die des REM-Schlafes nimmt zu. Diese unterschiedlichen Stadienzeiten sind alterstypisch; so haben Säuglinge einen REM-Schlafanteil von bis zu 60 %, ein gesunder Erwachsener mittleren Alters dagegen verbringt 40-50 % der Gesamtschlafzeit im Stadium 2, 10-20 % in den Stadien 3 und 4 und ca. 20-25 % im REM-Schlaf (Ising und Maschke 1997).

Während der Tiefschlafphase (Stadien 3-4) erfolgt die körperliche Erholung. Der Traumschlaf (REM-Phase) ist zum einen für die psychische Erholung, zum anderen für den Wechsel der aufgenommenen Gedächtnisleistung vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis verantwortlich (Köckemann 2002).

Durch einen guten, ungestörten Schlaf wird Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit gefördert. Schlaf ist dann erholsam, wenn die drei Komponenten Wachsein, Non-REM-Schlaf und REM-Schlaf ausgewogen sind. Besteht ein Ungleichgewicht, wird der Schlaf gestört. Dies kann zur gesundheitlichen Beeinträchtigung führen, vor allem wenn dieses Ungleichgewicht länger bestehen bleibt (Hecht 1993).

3.6.2.7 Verkehrslärm bedingte Schlafstörungen

Schlafstörungen sind jegliche objektiv messbaren wie aber auch subjektiv empfundenen Abweichungen vom normalen Schlafablauf (Griefahn 1985). Oft genannte Störungen sind das erschwerte Einschlafen sowie zwischenzeitliches oder verfrühtes Aufwachen und somit eine Verkürzung der Gesamtschlafzeit (Schuemer, Schreckenbergs und Felscher-Suhr 2003). Da die benötigte Schlafdauer individuell sehr unterschiedlich (2-12 Stunden) sein kann, jedoch bei dem Einzelnen relativ stabil ist und zumeist über dem tatsächlichen Bedarf liegt, wird zwischen obligatem und fakultativem Schlaf unterschieden. Aus diesem Grund ist die Bedeutung von lärminduzierten Schlafstörungen, die die Schlafdauer nur unwesentlich verkürzen, nicht klar. Sicher ist jedoch, dass es dabei zur subjektiven Störung des Schlaferlebens kommt. Ebenfalls durch Lärm ausgelöst, kann es zu einer strukturellen Schlafstörung kommen. Des Weiteren wird beschrieben, dass unter Lärmexposition, vor allem während des Schlafens, die Stresshormonausschüttung (Cortisol, Noradrenalin und Adrenalin) gesteigert sein kann (Spreng 2002).

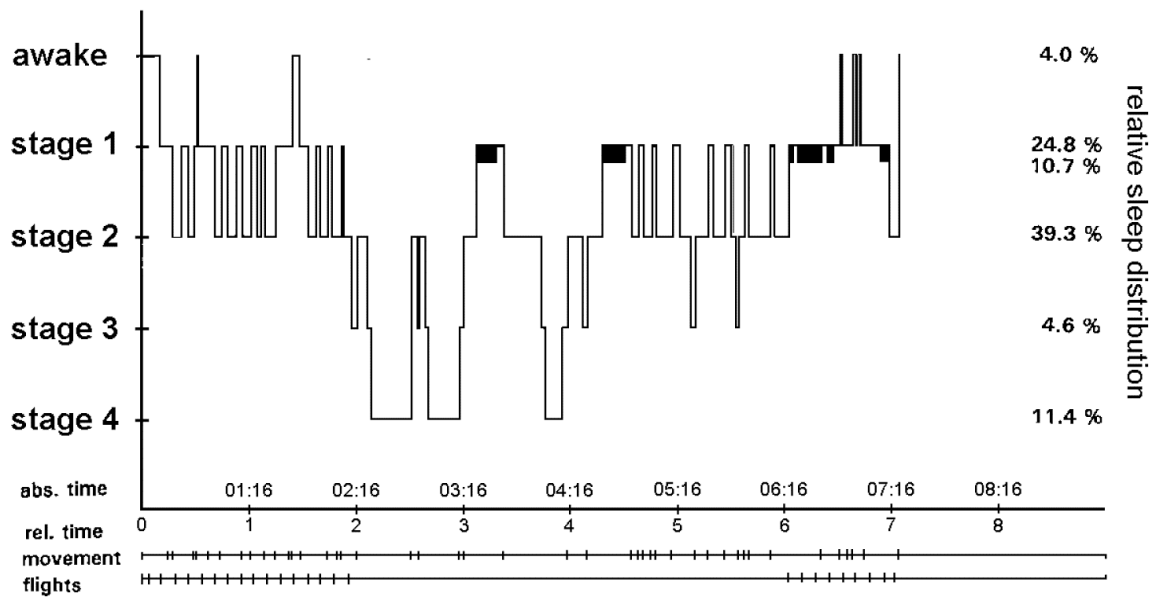


Abb. 34: Typisches Schlafzyklogramm bei nächtlichem, intermittierendem Lärm

Das Schlafhypnogramm in Abb. 34 zeigt eine deutliche Zerstörung der Zeitarchitektur der Schlafstruktur (im Sinne ihrer rhythmischen Ausgewogenheit), verglichen mit einem Schlafhypnogramm in Ruhe (Abb. 33). Der Proband schlief bei 26 von 32 elektroakustisch simulierten Überflügen im Schlaflabor des Institutes für technische Akustik (Technische Universität Berlin). Es besteht eine Reduktion des Tiefschlafes (Stadien 3-4) wie auch eine Reduktion des Traumschlafes (REM) und eine starke Störung der Zeitarchitektur der Schlafzyklen (Ising und Maschke 1997). Die schallbedingte Aktivierung kann bis hin zum Erwachen gehen, wobei abgesehen von physikalischen Besonderheiten der Störschalle (insbesondere Diskontinuität) deren Informationsgehalt für den Schläfer bedeutsam ist.

Diese Schlafstörungen können durch endogene (Hörfähigkeit, Alter, psychische und physische Verfassung, Regulationsfähigkeit, Einstellung zu Lärm, Persönlichkeitsmerkmale, Geschlecht und Lärmempfindlichkeit u.v.m.) und exogene Faktoren (z.B. Verkehrslärm) verursacht werden. Die exogenen Schlafstörungen lassen sich anhand ihres zeitlichen Auftretens in primäre und sekundäre Reaktionen unterteilen (Griefahn 1985)

Im Folgenden werden die **Primärreaktionen**, welche während des Schlafes auf den Organismus wirken, aufgezählt:

- Kurzfristige EEG Änderung (Nullreaktionen)
- Verflachung der momentanen Schlaftiefe (Stadienwechsel) bis hin zu Aufwachreaktionen
- Veränderung der Schlafstadienverteilung
- Verlängerung der Latenzzeiten (insbesondere der Einschlafphase)
- Zunahme (Dauer) der Zeiten hoher Muskelspannung (und/oder auch Körperbewegungen)
- Verkürzung der Gesamtschlafzeit

Vegetative Reaktionen:

- Änderung der Atmungsfrequenz
- Änderung der peripheren Durchblutung
- Steigerung des Sympathikustonus,
- Änderung der Hormonausschüttung

Zu den **Sekundärreaktionen** zählen reversible Beeinträchtigungen des Allgemeinzustandes nach dem Erwachen:

- Psychische und physische Verfassung
- Schlaferleben
- Wohlbefinden
- Leistung
- Konzentration

Der Schlaf wird durch Verkehrslärm auch schon bei geringeren Pegeln gestört im Vergleich mit z.B. lärmbedingten Stressreaktionen bei einem wachen Menschen. Griefahn wie auch andere Autoren beschreiben, dass erinnerbare Aufwachreaktionen unphysiologisch (im Sinne von irregulär) sind und bei längerem Einwirken zu einem Gesundheitsrisiko werden können (Griefahn 1990; Jansen, Linnemeier und Nitzsche 1995). Jedoch ist nicht auszuschließen, dass Lärmereignisse in der Nacht auch ohne bewusstes Erwachen durch eine erhebliche Störung der Schlafstruktur bereits unter der Aufwachschwelle zu einer langfristigen Gesundheitsbeeinträchtigung führen können (Maschke und Pleines 1996). Da jedoch die Beeinträchtigung der Gesundheit durch Lärmstörungen im Schlaf erst nach Jahren oder Jahrzehnten in Erscheinung tritt und die lärmbelasteten Personen in dieser Zeit vielen zusätzlichen Stressoren ausgesetzt sind, erweist es sich schwierig, die bloße Lärmwirkung isoliert in einem Experiment zu erfassen. Mit Hilfe von Labor- oder Feldstudien wurden daher hauptsächlich die Primär- oder Sekundärreaktionen bedingt durch Lärmstörungen im Schlaf untersucht (Aasvang, Engdahl und Rothschild 1981; Bonnefond u. a. 2008; Carter 1996).

Die WHO (2009) in ihren *Night Noise Guidelines* gibt als Richtwert zu Vermeidung von Schlafstörungen für den nächtlichen äquivalenten Dauerschallpegel in Innenräumen 30 dB(A) an. Bei dem Richtwert muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch diesen nicht nur eine durchschnittliche Person, sondern auch eine lärmempfindliche Person geschützt werden soll (Berglund, Lindvall und Schwela 1999).

Maschke und Pleines (1996) stellen eine Auflistung von Schwellen (meint Schallpegel, bei denen erstmals lärmbedingte Veränderungen der einzelnen Primär- und Sekundärreaktionen im Vergleich mit Kontrollgruppen beobachtet wurden) für den äquivalenten Dauerschallpegel als auch den Maximalpegel zur Verfügung, die aus einer Übersicht über Ergebnisse experimenteller Studien gewinnt, die seit 1980 in deutscher und englischer Sprache veröffentlicht wurden. Die beiden Pegelmaße kennzeichnen unterschiedliche Störungsmechanismen, die als „Überbeanspruchung (L_{eq}) bzw. als „Übersteuerung (Dysregulation) (L_{max})“ bezeichnet werden können. Die Auflistung zeigt, dass Schwellen für verkehrslärmbedingte Schlafbeeinträchtigungen bei einem L_{eq} zwischen 35 und 66 dB(A) liegen; für den L_{max} im Bereich zwischen 45 und 75 dB(A). Als Schwelle für erinnerbare Aufwachreaktionen wird der Wert $L_{max} = 55$ dB(A) genannt.

Tab. 3: Schwellen für Sofortreaktionen bei Verkehrslärm (Maschke, Druba und Pleines 1997)

Parameter	kontinuierlicher Lärm	intermittierender Lärm
Gesamtschlafdauer	ab $L_{Aeq} = 45$ dB(A) verkürzt	bei $L_{Amax} = 45$ dB(A) (50 Ereignisse) verkürzt
Schlafstadienlatenz	Einschlaflatenz ab $L_{Aeq} = 45$ dB(A) verlängert, Tiefschlaflatenz ab $L_{Aeq} = 36$ dB(A) verlängert, Tendenz zur Verlängerung der Traumschlaflatenz	Einschlaflatenz keine Daten, Tiefschlaflatenz bei $L_{Amax} = 45$ dB(A) (50 Ereignissen) verlängert, Tendenz zur Verkürzung der Traumschlaflatenz
Arousalreaktionen und Schlafstadienwechsel	-	ab $L_{Amax} = 45$ dB(A) induziert
Aufwachreaktionen	oberhalb von $L_{Aeq} = 60$ dB(A) erhöht	ab $L_{Amax} = 45$ dB(A) induziert
Dauer der Wachphasen	oberhalb von $L_{Aeq} = 66$ dB(A) verlängert	ab $L_{Amax} = 65$ dB(A) (15 Ereignisse) verlängert
Dauer des Leichtschlafs	oberhalb von $L_{Aeq} = 66$ dB(A) verlängert	bei $L_{Amax} = 75$ dB(A) (16 Ereignisse) verlängert
Dauer des Tiefschlafs	ab $L_{Aeq} = 36$ dB(A) verkürzt	bei $L_{Amax} = 45$ dB(A) (50 Ereignisse) verkürzt
Dauer des REM-Schlafs	oberhalb von $L_{Aeq} = 36$ dB(A) verkürzt	bei $L_{Amax} = 55$ dB(A) (50 Ereignisse) verkürzt
Herzrhythmusstörungen	-	Häufigkeit kann durch Ereignisse mit $L_{Amax} > 50$ dB(A) erhöht werden
Herzfrequenz	-	ab Modulationstiefe von 7 dB(A) erhöht
Körperbewegungen	oberhalb von $L_{Aeq} = 35$ dB(A) vermehrt	bei $L_{Amax} = 45$ dB(A) vermehrt und induziert
subjektive Schlafqualität	ab $L_{Aeq} = 36$ dB(A) verschlechtert	bei $L_{Amax} = 50$ dB(A) (64 Ereignisse) bereits um 25 % verschlechtert
erinnerbares Erwachen	-	ab $L_{Amax} = 55$ dB(A) erhöht, nimmt mit L_{Amax} und Ereignisanzahl zu
Leistung	oberhalb von $L_{Aeq} = 45$ dB(A) verschlechtert	bei $L_{Amax} = 45$ dB(A) (16 Ereignisse) verschlechtert

Induziert: Reaktion in einem Zeitfenster nach dem Lärmereignis (das Zeitfenster variiert in den einzelnen Untersuchungen zwischen 30 und 90 Sekunden)

- keine (ausreichenden) Daten

3.6.2.8 Endokrine und autonome Störungen

Unerwartete plötzliche Schallereignisse lösen eine Schreckreaktion mit initialem Schreckreflex und nachfolgender Orientierungsreaktion aus, mit Hilfe dessen der aufgenommene Sinnesreiz lokalisiert und eingeschätzt werden kann. Diese Orientierungsreaktion unterliegt einer Habituation. Überschreiten diese Schallereignisse allerdings einen Maximalpegel von ca. 90 dB(A), so wird nach dem Stresskonzept eine Defensivreaktion ausgelöst, die sich individuell verhaltensbedingt in einem Kampf-Flucht-Verhalten oder einer Niederlagereaktion äußert. Die beschriebenen Reaktionen sind in dem Modell von Henry (1992) (siehe Abb. 35) genetisch programmiert. Henry und Stephens (1977) entwickelten ein psychophysiologisches Stressmodell, aus dem entsprechend der mentalen Kontrollierbarkeit belastender Situationen zwei unterschiedliche physiologische Reaktionstypen hervorgehen können.

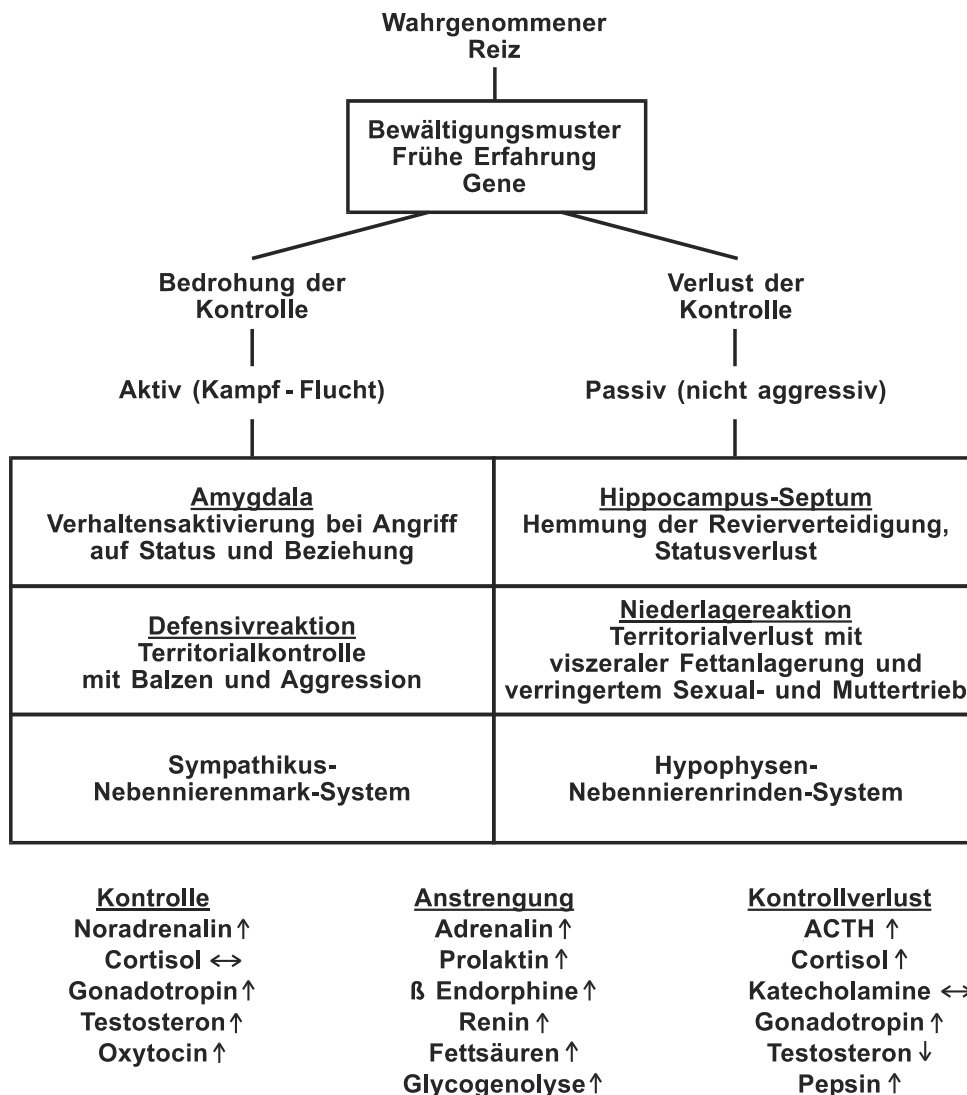


Abb. 35: Psychophysiologisches Stressmodell nach Henry (1992)

Bei erfolgreicher Kontrolle von Stress wird primär Noradrenalin, bei Nichtkontrolle dominierend Adrenalin freigesetzt. Der Verlust der Kontrolle endet in einer Niederlagereaktion, die mit einer Erhöhung von ACTH und Cortisol einhergeht. Die Defensivreaktion wird provoziert, wenn der Organismus herausgefordert ist, aber die Kontrolle behält. Mit zunehmender subjektiver Wahrnehmung von Kontrollverlust und Hilflosigkeit erfolgt die Aktivierung des Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Systems, das Gonadotropin-System wird deaktiviert. Es erfolgt eine Verschiebung von aktiver zu passiver und nichtaggressiver Bewältigung. Bezogen auf die Lärmbelastung unterschiedlicher Lautstärke, Dauer und Dynamik kann analog hierzu bei wachen Personen zwischen drei Typen psychophysiologischer Stressreaktionen unterschieden werden (siehe Abb. 36).

LÄRM-STRESS-MODELL

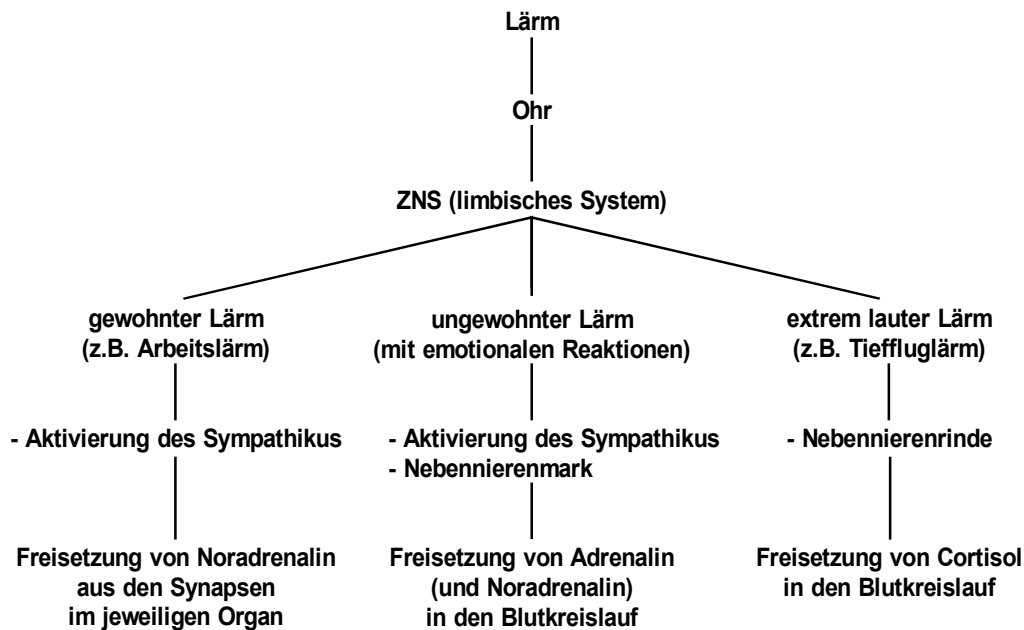


Abb. 36: Das Lärm-Stress-Modell: Reaktionsalternativen bei unterschiedlich intensiver Lärmbelastung und Habituation an den Lärm (Ising u. a. 1990)

1. Bei gewohnter Lärmbelastung [z.B. Arbeitslärm mit Pegeln über 90 dB(A)] steht die Freisetzung von Noradrenalin aus den Synapsen des sympathischen Nervensystems im Vordergrund, das zum Teil auch in die Blutbahn freigesetzt wird. Insgesamt ist diese Reaktion mit einer Erhöhung der zentralen Aktivierung verbunden.
2. Bei Einwirkung ungewohnten Lärms, der zusätzlich unter Umständen eine Gefahr signalisiert oder subjektiv eine Bedrohung darstellt, wird primär eine Orientierungsreaktion ausgelöst. Anknüpfend entsteht durch Sympathikusaktivierung ein Reaktionsmuster, das auf die Beseitigung der Reaktionsursachen gerichtet ist (Kampf-/Flucht-Reaktion). Dabei wird aus dem Nebennierenmark insbesondere Adrenalin ins Blut freigesetzt. Es gibt Hinweise, dass Adrenalin synaptisch aufgenommen werden kann (Majewski, Rand und Tung 1981), wodurch es auch nach wieder Absinken der Plasmakonzentration noch über mehrere Stunden die Effektivität alpha-adrenerger Stimulation erhöhen kann (Blankenstijn u. a. 1988).
3. Bei extremer Lärmbelastung mit Pegeln über 120 dB(A), besonders bei unerwarteten Lärmereignissen mit schnellem Pegelanstieg, wird gewöhnlich eine Niederlagereaktion ausgelöst, bei der subjektiv die Kontrolle über die Situation fehlt. Im Vordergrund steht hierbei die Freisetzung von Cortisol aus der Nebennierenrinde. Über die Cortisolfreisetzung wird über Prozesse mit größerem Zeitbedarf der Wirkungsgrad von Aktivierungsprozessen verbessert. Glucocorticoide wirken positiv inotrop am Herzen, verbessern die Wirkung der Katecholamine in der Gefäßperipherie und haben zentralnervös aktivierende Effekte.

Lärm kann sowohl hormonelle als auch vegetative Reaktionen auslösen. Der organismische Mechanismus, der den Pfad des Lärms als psychosozialen Stressor bis hin zu diesen Aktivierungsprozessen steuert, wurde bereits in Abschnitt 3.6.2 besprochen, so dass in diesem Abschnitt nun genauer die einzelnen dabei ablaufenden Regulationsprozesse des Körpers beleuchtet werden.

Eines der wichtigsten Regulationsorgane (bzw. Organketten) ist dabei das Hypophysen-Hypothalamus-Nebennierenrinden-System, welches vor allem für die Cortisol-Ausschüttung verantwortlich ist. Die Cortisolsekretion folgt einem stabilen zirkadianen Rhythmus mit sekretorischen Episoden (siehe Abb. 37).

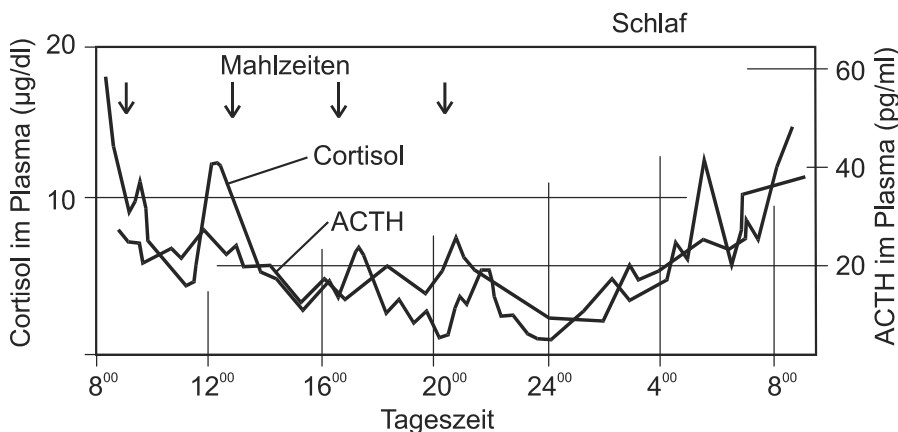


Abb. 37: Einfluss der Zirkadianrhythmik auf die ACTH- und Cortisolsekretion (Voigt 1996)

In den Morgenstunden steigt diese an und sinkt zum Abend. Unter Ruhebedingungen wird Cortisol hauptsächlich in den ersten sechs Stunden zu Tagesbeginn ausgeschüttet, danach ist das System für 18 Stunden beinahe inaktiv, lediglich zur Mittagszeit kommt es zu einer weiteren Cortisolsekretion. Der morgendliche Anstieg des Blutcortisolspiegels ist eng mit dem Erwachen verbunden. Dieser zirkadiane Rhythmus ist sehr stabil und verändert sich durch äußere Umstände nur sehr langsam. Dies führt dazu, dass sich nach einem Tag-Nacht-Wechsel erst nach mehreren Tagen ein neuer 24-Stunden-Rhythmus aufgebaut hat. Dieses Phänomen ist auch als Jetlag bekannt (Voigt 1996).

Abgesehen von dieser zirkadianen Cortisolsekretion kann es bei körperlicher Arbeit, bei psychischen Belastungen und bei vielen Erkrankungen zu einer stimulierten und somit vermehrten Cortisol-Ausschüttung kommen (Voigt 1996). Dieser Cortisolanstieg wurde auch bei Lärm beobachtet. Der negative Einfluss von erhöhten Cortisolspiegeln auf die Gesundheit ist schon seit längerem bekannt. So wirkt Cortisol unter anderem auf den Stoffwechsel, in dem es die Glukoneogenese fördert, den Glukosetransport und die Glukoseverwertung jedoch hemmt. Diese Mechanismen führen zu einem erhöhten Blutzuckerspiegel und haben somit eine diabetogene Wirkung. Weitere mögliche pathogene Folgen sind die katabole Wirkung durch Förderung des Knochen- und des Muskelabbaus, die Hemmung von Immunprozessen durch eine Verringerung des Thymusgewebes und desjenigen der Lymphknoten, außerdem die Verlängerung der Heilphasen (Absenkung der zirkulierenden eosinophilen und basophilen Leukozyten und der Lymphozyten) und eine erhöhte Hypertoniegefahr (durch Steigerung der Empfindlichkeit von Adenozeptoren und anderen vasokonstriktiven Substanzen) (Voigt 1996). Weiterhin findet sich eine Immunsuppression (durch die Verminderung der zellulären Immunität und Blockade der Freisetzung, sowie des Effektes der meisten Lymphokine) und auch ein erhöhtes Risiko für Magengeschwüre durch die Steigerung der Magensaftsekretion. Oft werden ein hoher Cortisolspiegel und die darauf folgenden

negativen Konsequenzen trotz der prinzipiell negativen Rückkopplung der Hypophysen-Hypothalamus-Nebennieren-Achse beobachtet. Dies liegt möglicherweise an einer Verschiebung des Arbeitsschwerpunktes des Systems durch die dauerhafte Stresseinwirkung oder aber an einer ständigen Überaktivierung (bei Lärm z.B. durch den massiven amygdalären Erregungsstrom (Ising und Maschke 1997)). Diese Regulationssysteme reagieren zwischen 24 und 4 Uhr besonders stark auf exogene Reize (z.B. Lärm), so dass zu dieser Zeit mit schlechteren Rückkoppelungseigenschaften und somit mit massiven Schwankungen in der Cortisolfreisetzung zu rechnen ist (Spreng 1997). Dem zufolge konnten auch beim schlafenden Menschen bereits bei deutlich geringeren Lärmpegeln verglichen mit wachen Menschen akute und chronische Stresshormonerhöhungen nachgewiesen werden (Ising und Maschke 1997).

Weiterhin kommt es durch Lärm zu einer akuten sympathikotonen Erregung des autonomen Nervensystems (Schuemer, Schreckenbergs und Felscher-Suhr 2003). Diese Aktivierung des Sympathikus (siehe Abb. 38) führt unter anderem zu einer Steigerung der Herzfrequenz, zur Vasokonstriktion peripherer Blutgefäße und demzufolge zu einer leichten Erhöhung des Blutdruckes, zur Erweiterung der Pupillen, der vermehrten Ausschüttung von Stresshormonen (Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol), so wie zu erhöhten Konzentrationen von freien Fettsäuren und Glukose (Seller 1996).

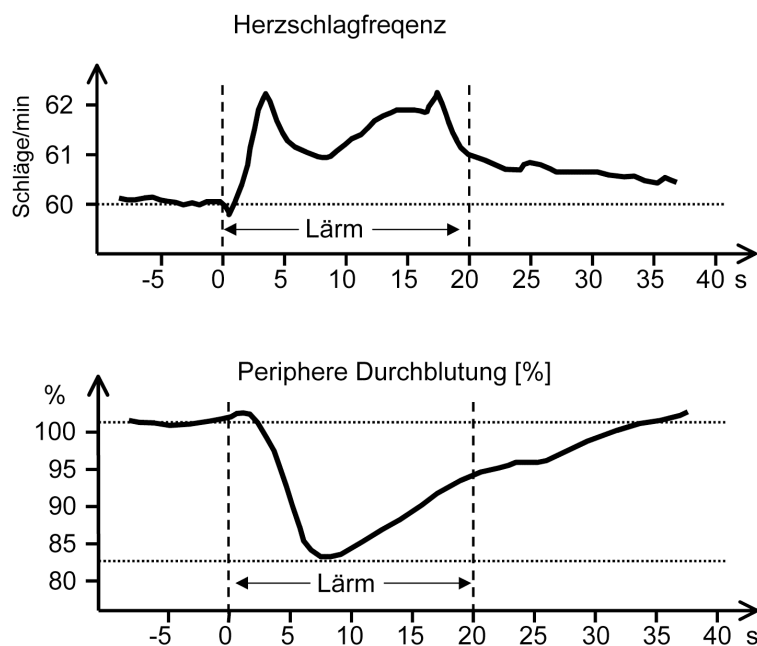


Abb. 38: Mittlerer Verlauf der kardiovaskulären Reaktionen auf die Einwirkung von rosa Rauschen, Straßenverkehrs- und Impulsgeräuschen (Dauer je 19 Sekunden, L_{eq} : 62-80 dB(A)) (Griefahn und Di Nisi 1992)

Diese Reaktionen können durch unterschiedliche Moderatoren beeinflusst werden. So steigt das Ausmaß der kardiovaskulären Reaktionen mit steigendem Schallpegel; dies ist in der Abb. 39 verdeutlicht (Griefahn und Di Nisi 1992). Des Weiteren sinkt mit zunehmendem Alter die lärminduzierte Gefäßverengung. Der Grund hierfür liegt dabei mehr an der abnehmenden Elastizität der Gefäßwände infolge fortschreitender sklerotischer Prozesse als an einer abnehmenden Lärmempfindlichkeit im Alter (Schuemer, Schreckenbergs und Felscher-Suhr 2003). Wie schon im Abschnitt 3.6.2.1 (Moderatoren) genannt, ist auch hier die Lärmempfindlichkeit des einzelnen Individuums für die kardiale und vaskuläre Reaktion entscheidend (Griefahn und Di Nisi 1992).

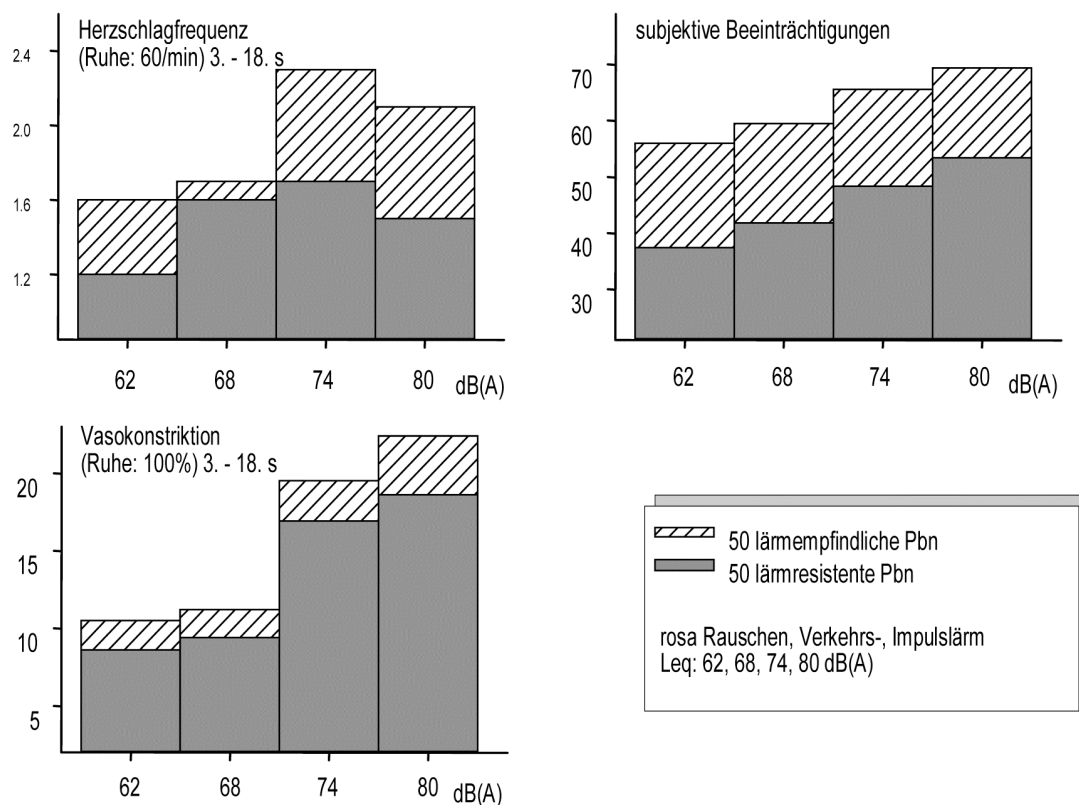


Abb. 39: Mittlerer Verlauf der kardiovaskulären Reaktionen bei Personen unterschiedlicher Lärmempfindlichkeit auf die Einwirkung kurz andauernder Geräusche (Dauer je 19 sec., L_{eq} : 62-80 dB(A) (Griefahn und Di Nisi 1992)

Diese zuvor aufgeführten Faktoren stellen nur einen Teil der möglichen Beeinflussungen der organismischen Lärmreaktionen dar (weitere Reaktionen siehe nachfolgende Abschnitte).

Zum Schluss sei noch erwähnt, dass all diese Reaktionen direkte Folgen der Lärmwirkungen sind und nicht emotional vermittelt werden; Emotionen können zusätzlich jedoch die gleichen Effekte hervorrufen. Dies führt dazu, dass bei unangenehm empfundenen Geräuschen die primäre physiologische Reizreaktion noch zusätzlich durch die emotionale Reaktion verstärkt werden kann. Des Weiteren unterliegen diese autonomen Reaktionen einer nur sehr geringen Gewöhnung, so dass selbst langjährig lärmexponierte Personen ohne Habituation im gleichen Maße auf Geräusche reagieren wie Personen, die nur gelegentlich jenen Geräuschen ausgesetzt sind. Diese Erkenntnis führt zu der Annahme, dass eine langjährige Lärmexposition pathogen wirken und zu chronischen, multifaktoriellen Krankheiten führen kann (Schuemer, Schreckenber und Felscher-Suhr 2003).

3.6.2.9 Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Lärm verursacht Stress. Diese Tatsache ist durch laborexperimentelle Untersuchungen eindeutig nachgewiesen (siehe auch z.B. Kapitel 5.1.4 und 5.1.7). Über den Weg ausgelöster Stressreaktionen kann jahrelange Lärmbelastung zu akuten und vor allem chronischen Veränderungen der Stresshormonregulation führen. Der biologische Stressmechanismus dient dem Überleben in (lebens-)bedrohlichen Situationen, jedoch werden bei lärmbedingten Stressreaktionen in der Regel die vom Körper bereitgestellten

Energiereserven nicht in der vorgesehenen Weise eingesetzt und/oder abgebaut. Dadurch werden Stoffwechselvorgänge und die Steuerung lebenswichtiger Körperfunktionen nachhaltig beeinflusst, sogar insoweit, dass schwerwiegende kardiovaskuläre Erkrankungen in Folge nachstehend aufgelisteter Risikofaktoren resultieren können (Babisch 2002):

- Blutdruck
- Herztätigkeit
- Blutfette (Cholesterin, Triglyzeride, Freie Fettsäuren)
- Blutzuckerkonzentration und hämostatische Faktoren (z.B. Fibrinogen), die die Fließeigenschaften des Blutes beeinflussen (Plasma-Viskosität)

Da es sich bei den genannten Faktoren um klassische endogene Risikofaktoren für Herz-Kreislauf-Erkrankungen handelt, kann Lärm eindeutig als exogener Faktor für die Entwicklung von Bluthochdruck und ischämischen Herzkrankheiten einschließlich Arteriosklerose und Herzinfarkt eingestuft werden.

Dieser Zusammenhang wird weiterhin dadurch verstärkt, dass lärmbedingte autonome Störungen nicht gewöhnungsfähig sind. Da jedoch die akuten Reaktionen unspezifisch sind und auch durch viele andere Ereignisse ausgelöst werden können, ist es schwierig den Anteil von Lärm an den Erkrankungen festzustellen (Schuemer, Schreckenbergs und Felscher-Suhr 2003). Es ist davon auszugehen, dass Lärm zusammen mit anderen Faktoren die Manifestation von kardiovaskulären Erkrankungen beschleunigt (Babisch 2000). Diese Kausalbeziehung hat Babisch in der Abb. 40 verdeutlicht. Das Wirkungsschema verdeutlicht, dass Schall das neuroendokrine System über zentralnervöse Prozesse entweder direkt - wie beim Arbeitslärm oder auch bei relativ geringer Umweltlärmpiegeln (z.B. nachts im Schlaf) - oder indirekt über das emotional-subjektive Erleben (z.B. Störung, Belästigung) beeinflusst. Wie bereits zuvor erörtert, können Störungen oder eine Überaktivierung der genannten Systeme das Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen steigern. Diese Beziehung ist jedoch schwer in Studien nachzuweisen, da sich kardiovaskuläre Erkrankungen erst nach Jahrzehnten manifestieren und von multifaktorieller Genese sind (Schuemer, Schreckenbergs und Felscher-Suhr 2003).

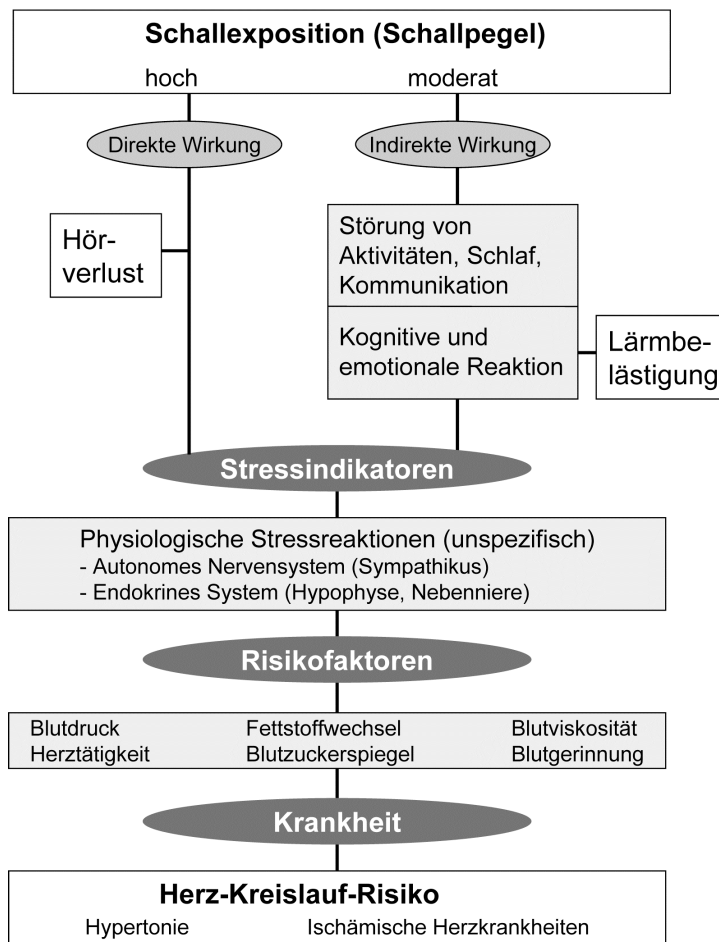


Abb. 40: Modell einer kausalen Beziehung zwischen der chronischen Einwirkung von Lärm und der Manifestation von Herz-Kreislauferkrankungen (Babisch 2002)

Es gibt Hinweise aus epidemiologischen Studien, dass eine hohe Belastung durch Straßenverkehrslärm das Auftreten eines Herzinfarktes begünstigt. In solchen Untersuchungen wird die Lärmbelastung im Außenbereich häufig auf Basis von Verkehrszähl-daten berechnet. Dieses führt zu einer besseren Abschätzung der durchschnittlichen langfristigen Lärmbelastung als eine Messung über einen begrenzten Zeitraum, weil der gewählte Messzeitraum unter Umständen nicht repräsentativ ist. Eine kurzzeitige Messung ist vor allem aufgrund von Schwankungen der Verkehrsstärke nicht repräsentativ.

Bisher liegen mehrere bedeutende Studien aus England und Berlin vor, in denen der Zusammenhang zwischen Straßenverkehrslärm und dem Auftreten von Herzinfarkt untersucht wurde. Diese Studien weisen insgesamt darauf hin, dass mit zunehmender Belastung durch Straßenverkehrslärm das Risiko eines Herzinfarktes steigt. In einer Meta-Analyse des Umweltbundesamtes zeigte sich ein Anstieg des Risikos für Herzinfarkt mit zunehmendem Straßenlärm. In dieser kategorischen Analyse ergab sich jedoch keine statistische Signifikanz. Dies könnte auch darin begründet liegen, dass nur eine geringe Risikoerhöhung zu erwarten ist und somit eine sehr große Stichprobe erforderlich ist, um diese statistische Signifikanz zu erreichen. Andererseits ergeben sich höhere und zum Teil auch signifikante Ergebnisse, wenn lediglich Personen betrachtet werden, die schon viele Jahre lang Lärm ausgesetzt sind. Dies wiederum würde für einen Zusammenhang sprechen.

Dazu kommt, dass durch Berechnungen zwar der Lärm im Außenbereich gut quantifizierbar ist, die Abschätzung der tatsächlichen individuellen Lärmexposition (auch im Innenbereich und am konkreten Immissionsort des Schalls bei der individuellen Person) aber schwierig ist. Diese Ungenauigkeit in der Expositionsabschätzung macht es nochmals schwerer, einen statistisch signifikanten Effekt zu bestimmen.

4. Methoden

Der methodische Abschnitt der Studie setzt sich zum einen aus Begründung und Zielsetzung sowie übergeordneten Fragestellungen und zum anderen aus einer Beschreibung des Recherche- und des Auswahlverfahrens der ein- und ausgeschlossenen Studien im Review zusammen. Abschließend wird ein individuell moderiertes Bewertungssystem auf der Ebene von vier Evidenzstufen vorgestellt, das einer internen qualitativen Bewertung dienen soll und somit eine hierarchische Kategorisierung der Aussagesicherheit der gefundenen Befunde unterstützt.

4.1 Begründung und Zielsetzung der Arbeit

Die Arbeit entstand im Auftrag des Regionalverbands Südlicher Oberrhein. Das DB-Projekt Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe – Basel umfasst den durchgehenden viergleisigen Ausbau der bestehenden Rheintalbahn mit dem Ziel der Kapazitätserweiterung und ist Bestandteil der transeuropäischen Güterverkehrstransversalen Rotterdam – Genau (TEN – Korridor 24). Die Gebietskörperschaften entlang der geplanten Trasse am Oberrhein sind durch die Planung der Deutschen Bahn AG, ein drittes und viertes, z.T. ausschließlich dem Güterverkehr dienendes Gleis zu bauen, von der Problematik des Schienenlärms betroffen. Es gibt im Rahmen der anstehenden Planfeststellungsverfahren der entsprechenden Bauabschnitte eine intensive politische Diskussion über den Lärmschutz entlang der Trasse sowie über die tatsächlich zu erwartende Lärmbelastung und damit einhergehend über die Trassenführung. Die politischen Gremien des Regionalverbands Südlicher Oberrhein und vieler Gemeinden haben mit zahlreichen Beschlüssen die Bundesregierung aufgefordert, die für die Planung von neuen Schienenwegen einschlägigen Gesetze und Rechtsverordnungen aus Gründen des Gesundheitsschutzes zu novellieren. Dabei stand immer wieder die Rechtfertigung des sogenannten Schienenbonus gem. Anlage 2 zur 16.BImSchV im Mittelpunkt. Im Kontext dieser Diskussion bat der Regionalverband Südlicher Oberrhein das Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene am Universitätsklinikum Freiburg eine aktuelle Übersichtsarbeit über den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu den gesundheitlichen Schäden durch Schienenlärm zu verfassen. Da innerhalb der politischen Debatte insbesondere der Schienenbonus von 5 dB(A) für Schienenverkehr im Vergleich mit anderen Lärmarten von Bedeutung ist, umfasste der Auftrag auch eine wissenschaftliche Beurteilung der Rechtfertigung des Schienenlärmbonus auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnis.

4.2 Fragestellungen

Die Fragestellungen der Arbeit leiten sich aus dem Projekthintergrund mit einer daraus explizit hervorgehenden Beurteilung der Haltbarkeit des Schienenbonus ab.

a) Hauptfragestellung:

- Beeinträchtigt Schienenlärm die Gesundheit?
- Welche Kurz- und Langzeiteffekte von Schienenlärm auf das gesamte somatische, psychische und soziale Befinden können berichtet werden?
- Welche beeinträchtigten Aspekte der Gesundheit können differenziert werden?
- Ist der im Bundesimmissionsschutzgesetz verankerte Schienenbonus aus heutiger Sicht wissenschaftlich gerechtfertigt?

b) Nebenfragestellungen:

- Sind Analogieschlüsse von anderen Verkehrslärmquellen (Flug- und Straßenverkehrslärm) auf den Schienenlärm zulässig?
- Können explizite Aussagen über die Lärmwirkungen bei Kindern gemacht werden?

4.3 Wissenschaftliches Vorgehen

Im Folgenden wird das wissenschaftliche Vorgehen der Recherche dokumentiert, um die Systematik der eingesetzten Suchstrategien transparent zu machen.

Den Einstieg bildet ein mehrstufiges Phasen-Modell zur Anleitung des Aufbaus eines empirisch integrativen Reviews nach Cooper (1989). Er unterscheidet fünf Phasen, die jeweils eine primäre Funktion im gesamten Entwicklungsverlauf des Literaturüberblicks erfüllen und chronologisch aufeinander aufbauen (siehe Abb. 41)

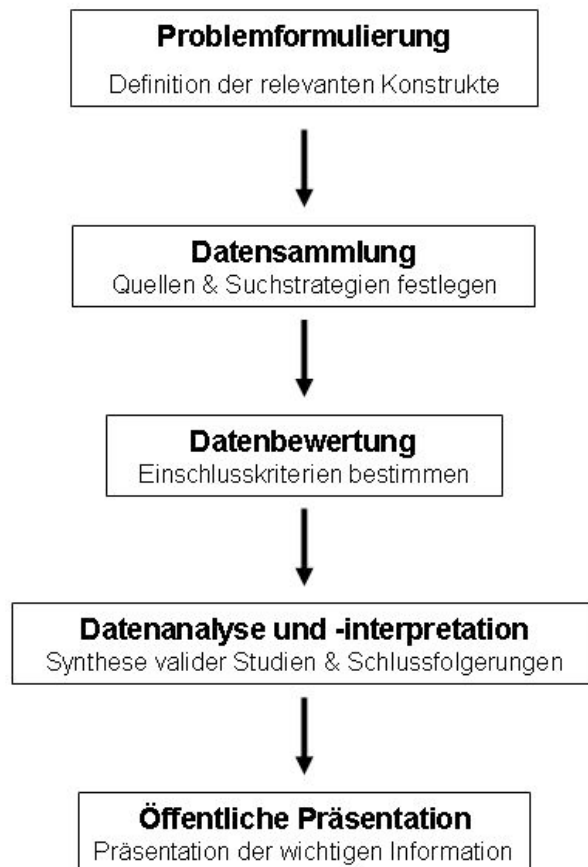


Abb. 41: Phasen eines Forschungsreviews (in Anlehnung an Cooper, 1989, S. 15)

In dieser Arbeit lassen sich die Phasen eins bis drei im Methodenteil, die restlichen zwei Phasen im Abschnitt 5 (Ergebnisse) wieder finden.

4.3.1 Problemformulierung

Die Hauptfragestellung der Arbeit beschäftigt sich mit der Beziehung zwischen Schienenlärm und seinen gesundheitlichen Korrelaten, wobei das Konstrukt der Gesundheit unter einer ganzheitlichen Perspektive betrachtet werden soll, die nicht nur objektiv erfassbare Parameter, sondern vielmehr auch subjektive Faktoren der Gesundheit beleuchtet, bzw. Faktoren, die auf die Befindlichkeit Einfluss haben können (z.B. das oft untersuchte Konstrukt Belästigung). Daraus folgend sollen all jene Studien als relevant erachtet werden, die sich dem oben genannten Zusammenhang in jedweder Art widmen, unter der Prämisse ausschließlich *empirische* Primärstudien ins Review einzubeziehen.

4.3.2 Datensammlung

Der Radius des abgedeckten Suchbereiches für die relevanten Studien erstreckte sich auf mehrere Informationsquellen. Darunter fielen die wichtigsten sozialwissenschaftlichen, allgemeinwissenschaftlichen und medizinischen Fachdatenbanken [PsycInfo (eingeschlossen Academic Search Premier und CINAHL), Psynindex, Medline, Web of Science, PubMed bzw. PubMedCentral, sowie die umfassende Datenbank des Niederländischen Herausgebers Elsevier (Science Direct)]. Weiterhin umfasste die Suche mehrere Publikationsquellen für Dissertationen (DissOnline, DINI, Base, FreiDok, ND LTD), eine Online-Handsuche in vier ausgewählten themenspezifischen Zeitschriften (Noise & Health, Journal of Environmental Psychology, Environment & Behavior, Journal of the Acoustical Society of America) sowie den direkten Kontakt zu Autoren und Literaturverweisen aus bereits identifizierten Arbeiten. Darüber hinaus wurden sämtliche im Internet auffindbare Kongress-Proceedings gesichtet sowie andere zentrale Online-Ressourcen wie das ‚Umweltbundesamt Berlin‘ oder auch die ‚Vereinigung gegen Schienenlärm‘ nach relevanten Veröffentlichungen und hilfreichen Links durchkämmt.

Die unverzichtbare Grundlage einer als zuverlässig zu bezeichnenden Literaturrecherche ist der Katalog normierter Schlagwörter. In den meisten Datenbanken steht dafür der von der American Psychological Association (APA) herausgegebene „Thesaurus of Psychological Index Terms“ zur Verfügung, der geeignete und viel zitierte Deskriptoren für die eingegebenen Suchbegriffe anbietet.

Mit Hilfe dieses Instruments können aussagekräftige Synonyme und zahlreiche verwandte Begriffe für die aus der Hauptfragestellung herausgefilterten Suchtermini bestimmt werden. Für das Suchkonzept „*Schienenlärm*“ ergaben sich mit Hilfe dieses Werkzeuges und den Schlagwörtern aus einer ersten eher unkonkreten Datenbank-Recherche die folgenden Suchbegriffe:

- **railway noise (effects)**
- **track noise**
- **train noise**
- **transportation noise**
- **community noise**
- **traffic noise**
- **noise effects**
- **non auditory effects of noise**
- **environmental noise**
- **noise**

Für den zweiten wesentlichen Suchbegriff „Gesundheit“ des fokussierten Zusammenhangspaares der Arbeit fand ebenfalls eine inhaltliche Ausrichtung an theoretischen Modellen zur Lärmwirkungsforschung (siehe Abb. 26) statt, die wiederkehrend übereinstimmend verschiedene zentrale Aspekte von Gesundheit zusammentragen und an denen sich die Recherche orientierte. Nachfolgend sind **diese** mit samt ihrer *Synonyme* durch den Thesaurus der Datenbanken aufgereiht:

- **Health** (*global health, mental health, mental stress, mental distress, mental disorder**)
- **Psychological health** (*psychological stress, psychological distress, psychological disorder**)
- **Wellbeing**
- **Disease***
- **Annoyance**
- **Performance** (*cognitive performance*)
- **Cardiovascular disorders** (*cardiovascular effect*, cardiovascular reaction*, cardiovascular reactivity, cardiovascular disease*, cardiovascular system**)
- **Hypertension**
- **Ischaemic heart disease** (*heart disorder*s, coronary prone behaviour*)
- **Myocardial infarctions**
- **Endocrine disorders** (*endocrine effect*, endocrine reaction*, endocrine reactivity, endocrine system**)
- **Sleep** (*sleep disorder*, sleep interruption, sleep apnoea, sleep disturbance**)

In einem nächsten Schritt wurden die Haupttermini und ihre Synonyme mit dem Operator „OR“ verknüpft, um zu gewährleisten, dass ein möglichst weites Feld an (empirischer) Literatur um den jeweiligen Primärbegriff der verschiedenen Gesundheitsfaktoren abgedeckt wird. Die auf diese Weise gefundenen Treffermengen eines jeweiligen Gesundheitsbereiches wurden daraufhin mit jedem einzelnen Suchbegriff für Schienenlärm inklusive seiner Thesaurus-Synonyme mit dem Operator „AND“ kombiniert, um dadurch die für die erhobenen Fragestellungen wesentlichen Schnittmengen zu finden. Im Folgenden soll auf jede einbezogene Quelle der Literaturrecherche kurz näher eingegangen werden.

4.3.2.1 PsycInfo

PsycInfo ist ein Dienst der APA (American Psychological Association) und mit über 1,5 Millionen Literaturangaben des Zeitraums ab 1887 die umfangreichste elektronische Online-Informationsressource der APA. Die Datenbank deckt die Bereiche Psychologie, Soziologie, Pädagogik und Medizin ab.

Wie zuvor bereits erläutert, wurden zu Beginn die Basis-Suchkonzepte mit ihren jeweiligen Thesaurus Verknüpfungen (verkettet durch den Operator „OR“) als Block in das Feld „keywords“ (Schlagwörter) eingegeben. Dabei ergaben sich insbesondere für die verschiedenen Synonyme der „Gesundheit“ riesige Treffermengen (z.B. mental health: **12560**) Exemplarisch seien die Treffermengen des im Fokus stehenden Suchkonzepts aufgeführt:

<i>Railway noise:</i>	4
<i>Track noise:</i>	1
<i>Train noise:</i>	12
<i>Transportation noise:</i>	8
<i>Community noise:</i>	15
<i>Traffic noise:</i>	83
<i>Noise effects:</i>	2237
<i>Non auditory effects of noise:</i>	4
<i>Environmental noise:</i>	135
<i>Noise:</i>	1467

Die anschließende bereits weiter oben beschriebene Verknüpfung der Treffermengen für Schienenlärm mit jeweils einem Cluster für die Gesundheitsvariablen durch den Operator „AND“ ergab zumeist Treffermengen im dreistelligen Bereich, die schlussendlich durch manuelle Inspektion der Titel und Abstracts auf ihre Relevanz für diesen Literaturüberblick hin untersucht wurden. Diese Beurteilung ergab nach einer ersten Sichtung **175** Arbeiten in der Datenbank PsycInfo.

4.3.2.2 Psyndex

Die deutschsprachige Datenbank Psyndex deckt inhaltlich die gesamte Psychologie, einschließlich psychologisch relevanter Aspekte aus Nachbardisziplinen wie Psychiatrie, Soziologie, Erziehung, Philosophie, Sport, Kriminologie, Linguistik und angewandte Ökonomie ab. Sie umfasst mehr als 140.000 Literaturnachweise. Beispielfhaft seien wiederum die zentralen Termini aufgeführt:

<i>Railway noise:</i>	12
<i>Track noise:</i>	0
<i>Train noise:</i>	0
<i>Transportation noise:</i>	5
<i>Community noise:</i>	3
<i>Traffic noise:</i>	84
<i>Noise effects:</i>	483
<i>Non auditory effects of noise:</i>	0
<i>Environmental noise:</i>	22
<i>Noise:</i>	877

Die Suche in Psyndex ergab letztendlich **86** Artikel.

4.3.2.3 Web of Science

Das Web of Science des „Institute for Scientific Information“ (ISI) dokumentiert Veröffentlichungen aus allen Gebieten der Naturwissenschaft und Technik. Die

Datenbank bietet den Science Citation Index (SCI) ab 1997 mit Nachweisen der weltweit publizierten naturwissenschaftlichen und technischen Literatur.

In der Arbeit mit dieser Datenbank boten sich zunächst 211 Artikel an, wobei nach Durchsicht von Titel und Abstract nur **61** Treffer für das Review geeignet schienen.

4.3.2.4 PubMed bzw. PubMedCentral inklusive Medline

PubMed enthält die Datenbank Medline, die die Bereiche Medizin, Zahnmedizin, vorklinische Fächer, Gesundheitswesen, Krankenpflege und Tiermedizin, aber auch Randbereiche wie Biologie, Biochemie, Psychologie oder Sportmedizin umfasst. Für Medline werden mehr als 5.200 biomedizinische Zeitschriften ausgewertet. Zusätzlich bietet PubMed den Zugang zu neuen, noch nicht vollständig bearbeiteten Medline-Zitaten. Darüber hinaus werden "Links" zu verwandten Artikeln und zu Artikeln im Volltext angeboten. PubMedCentral umfasst ein Digitales Textarchiv der U.S. National Institutes of Health (NIH) zu biomedizinischen und biowissenschaftlichen Zeitschriften. Aus dieser Quelle konnten **42** Arbeiten für die nähere Auswahl gewonnen werden.

Medline weist, zum Teil mit kurzen Zusammenfassungen, medizinische Fachpublikationen aus ca. 3.900 Zeitschriften ab 1966 nach. Berücksichtigt wird der Gesamtbereich der Medizin, einschließlich Krankenpflege, Dental- und Veterinärmedizin und Randbereichen wie z.B. Biologie, Biochemie und Psychologie.

In der medizinischen Datenbank Medline kamen mit der oben beschriebenen Suchstrategie nach Durchsicht der Titel und - sofern notwendig - auch Abstracts der erzielten Treffermengen **30** Artikel in die engere Auswahl. Davon stimmten **9** Studien mit den erforderlichen Einschlusskriterien überein.

4.3.2.5 Science Direct

Science Direct ist ein fachübergreifendes Verlagsportal, das eine Vielzahl von heterogenen Primärquellen unter einer Oberfläche anbietet. Dazu gehören elektronische Zeitschriften, Bücher und Buchreihen, sowie Nachschlagewerke des Verlages Elsevier, bei welchem es sich um einen der führenden Wissenschafts- & Fachbuchverlage handelt, der hochwertige Informationen aus den Bereichen Medizin und Gesundheit zur Verfügung stellt. Nach der genaueren Durchsicht der erzielten Hits in dieser Datenbank kamen **55** Artikel in die nähere Auswahl.

4.3.2.6 Dissertationen

Die folgend aufgelisteten Quellen wurden für die direkte Suche nach veröffentlichten Dissertationen im deutsch- sowie im englischsprachigen Raum herangezogen (siehe auch Tab. 4). Nach einer kurzen Beschreibung der einzelnen Quellen ist eine Tabelle mit den jeweiligen Trefferlisten aufgeführt, wobei die aufgeführten Trefferzahlen den Ergebnissen nach Eingabe der *Suchbegriffe* entsprechen. Nach Durchsicht des Materials konnten jedoch keine zusätzlichen Studien zum Thema Schienenlärm und Gesundheit gewonnen werden, da die erzielten Treffer entweder nicht den untersuchten Zusammenhang betrafen, sich nicht direkt mit Schienenlärm sondern anderen Verkehrslärmarten beschäftigten oder aber keine empirischen Arbeiten darstellten.

*DissOnline*¹⁰ (*Dissertation online*): Auf der Internet Seite von DissOnline kann direkt nach Online-Dissertationen und –Habilitationen recherchiert werden. Es werden Angebote für Autoren, Bibliotheken, wissenschaftliche Einrichtungen und Verlage bereitgestellt.

¹⁰ www.dissonline.de

DINI¹¹ (*Deutsche Initiative für Netzwerkinformationen*): DINI repräsentiert eine Informationsinfrastruktur im Internet, durch das wissenschaftliche Publikationen der Hochschulen und anderer Forschungseinrichtungen regional und überregional vernetzt werden.

BASE¹² (*Bielefeld Academic Search Engine*): Zahlreiche Universitäten besitzen Dokumentenserver, die frei zugängliche Publikationen z.B. Dissertationen, Diplomarbeiten und Forschungsberichte enthalten. BASE bietet die Möglichkeit, in den bibliographischen Daten der wichtigsten Dokumentenserver in Deutschland und im Ausland zu recherchieren und basiert auf der Technologie des Karlsruher Virtuellen Katalogs, die an der Universitätsbibliothek Karlsruhe entwickelt wurde. BASE ist die multidisziplinäre Suchmaschine der Universität Bielefeld für wissenschaftliche Internet-Quellen, die von der Universitätsbibliothek Bielefeld basierend auf der Technologie der norwegischen Firma FAST Search & Transfer entwickelt wurde.

FreiDok¹³ (*Freiburger Dokumenten Server*): Der Freiburger Dokumentenserver ist ein Dienst der Universitätsbibliothek Freiburg, mit dem wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht werden können. Dazu zählen neben Dissertationen und Habilitationen auch Aufsätze, Proceedings, Research Papers, Reports usw.

NDLTD¹⁴ (*Networked Digital Library of Theses and Dissertations*): NDLTD ist eine internationale Organisation, die sich der Adaption, dem Gebrauch, der Verbreitung und Archivierung von elektronischen Fassungen üblicher ausgedruckter Versionen von Dissertationen widmet.

Tab. 4: Numerische Angabe der Artikel aus Dissertationsquellen

	DissOnline	DINI	BASE	FreiDok	NDLTD
Railway noise	14	0	36	0	0
Track noise	5	0	2	1	0
Train noise	7	0	11	0	0
Transportation noise	6	0	34	0	0
Community noise	10	0	44	0	0
Traffic noise	30	0	376	3	0
Noise effects	0	0	320	0	0
Non auditory effects of noise	0	0	1	0	0
Environmental noise	72	0	399	0	0
Summe	144	0	1223	4	0

¹¹ www.dini.de

¹² www.base.ub.uni-bielefeld.de

¹³ www.freidok.uni-freiburg.de

¹⁴ www.ndltd.org

4.3.2.7 Handsuche

Die Handsuche in vier ausgewählten themenspezifischen Zeitschriften implizierte die exakte Durcharbeitung der einzelnen Jahrgänge mit Titel und Abstracts anstelle der Schnellsuche durch Eingeben eines Suchbegriffs in die entsprechende Suchfunktion. Dabei sollte stichprobenartig überprüft werden, ob in weniger bekannten Zeitschriften mit einem niedrigerem Impact Faktor durchaus noch Arbeiten zu finden sind, welche durch die Datenbanken nicht erfasst werden. Die folgenden vier Zeitschriften wurden in die Handsuche aufgenommen:

- *Noise and Health*: [Vol. 1 (1998) – Vol. 11 (2009)]:
5 (4 = Überschneidungen, 1 = keine Empirie)
- *Journal of Environmental Psychology*: [Vol. 1 (1989) – Vol. 29 (2009)]:
3 (2 = Überschneidungen, 1 = kein Schienenlärm)
- *Environment and Behaviour*: [Vol. 1 (1969) – Vol. 41 (2009)]:
3 (2 = Überschneidungen, 1 = keine Empirie)
- *Journal of the Acoustical Society of America*: [Vol. 1 (1930) – Vol. 126 (2009)]:
0

4.3.2.8 Direkter Kontakt zu Autoren

Der schriftliche Kontakt zu Dr. Christian Maschke (TU Berlin) und Prof. Dr. Hartmut Ising (Umweltbundesamt Berlin) vom Interdisziplinären Forschungsverbund Lärm und Gesundheit in Berlin stellte sich als überaus hilfreich heraus, da sie einige wesentliche Literaturangaben für einen allgemeinen und weiten Überblick über das Feld der Lärmwirkungsforschung nicht nur empfahlen, sondern auch zur Verfügung stellten. Auch andere Autoren wie R. Rylander (2), P. Lercher (2), E. Öhrström (5) und T. Yano (2) stellten nicht unmittelbar frei verfügbare Artikel auf Anfrage bereit. Diese Hilfestellungen ersparten langwierige und aufwendige Such-, Bestell- und Wartezeiten (z.B. bei Subito). Darüber hinaus fand im Rahmen des Projekts eine wissenschaftliche Beiratssitzung mit ausgewählten Experten auf dem Gebiet der Lärmwirkungsforschung statt, die ihre fachliche Kompetenz zur Unterstützung bei aufkommenden Fragen, Schwierigkeiten und prinzipiellen Möglichkeiten der qualitativen Aussagekraft der Studie unter Vorbehalt einer unzureichenden und unter anderem obsoleten Datenmateriallage einbrachten. Im Folgenden werden allerdings nur diese Arbeiten noch einmal gesondert aufgeführt, die sich nicht unter den angegebenen Treffermengen der Datenbanken befanden.

4.3.2.9 Kongressbeiträge

Die Online-Suche nach themenspezifischen Proceedings erstreckte sich über die nachfolgenden Kongressforen:

- *Inter-noise*
- *Forum Acusticum*
- *International Workshop on Railway Noise*
- *International Congress on Sound and Vibration*
- *Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics*
- *Workshop on Railway and Tracked Transit System Noise*
- *International Congress on Noise as a Public Health Problem*

4.3.2.10 Sonstige Quellen

Eine weitere Literaturquelle umfasste eine Zufallssuche über die internationale Suchmaschine Google und sämtliche dabei aufgegriffene Internetseiten zu Schienenlärm,

um mögliche bisher noch nicht abgedeckte Publikationen und Links auszumachen. Darunter summierten sich schließlich die folgend aufgereihten Links:

- *Bundesvereinigung gegen Schienenlärm*¹⁵
- *Umweltbundesamt (UBA)*¹⁶
- *Bayrisches Landesamt für Umwelt (LFU)*¹⁷

Jene Quellen erbrachten aber eher allgemeine theoretische Fachinformationen zum fokussierten Themenkomplex. Es resultierten keine zusätzlichen Treffer für den empirischen Teil der Arbeit.

4.3.2.11 Literaturverweise

Nach einer umfassenden Durchsicht der Literaturverzeichnisse bereits vorhandener Volltexte auf noch nicht erfasste Beiträge ergaben sich keine neuen Quellen.

4.3.3 Datenbewertung

Nach einer ersten Durcharbeitung der Titel und - wenn notwendig – der Abstracts der erzielten Treffer in den genannten Quellen, wurden alle potentiell relevanten Arbeiten einer zweiten genaueren Relevanzbeurteilung unterzogen. In diesem zweiten Schritt wurde jedes Abstract der gefundenen Ergebnisse detailliert durchgelesen und dahingehend überprüft, ob die Arbeit den festgelegten Einschlusskriterien, die in der dritten Phase nach Coopers Modell bestimmt werden, entspricht.

Es wurden drei Einschlusskriterien (im Folgenden *kursiv* dargestellt) für die weitere Filtrierung der vorerst sondierten **471** (exklusive der Treffer aus den Quellen zu Dissertationen) Arbeiten festgelegt. Dabei wurden die gefundenen Artikel entlang der Hierarchie von oben abwärts dahingehend sortiert, ob sie den genannten Einschlusskriterien genüge leisteten. Das in der Rangordnung primäre Kriterium entspricht dem Hauptuntersuchungsgegenstand des *Schienenlärms* (1). War dieses in jedweder Form in der Arbeit vertreten, rutschte der Artikel eine Stufe weiter und wurde dann im nächsten Schritt ausgeschlossen, falls sich die Arbeit nicht mit dem *Zusammenhang zwischen Schienenlärm und Gesundheit* (2) beschäftigte. Im Weiteren musste es sich um eine *empirische Arbeit* (3) handeln.

4.3.3.1 Ausschluss von Studien

Die im ersten Sondierungsdurchgang aus den oben aufgeführten Quellen gefilterten 471 Studien wurden im nächsten Schritt hinsichtlich der Übereinstimmung mit den drei Einschlusskriterien überprüft. Dazu wurden die Abstracts und wenn nötig die gesamten Volltexte sorgfältig durchgearbeitet. In diesem Prozess konnten 346 Studien aus den folgenden Gründen ausgeschlossen werden (Unter b bis e sind die ausgeschlossenen Studien konkret mit Referenz und Titel aufgeführt, da diese Arbeiten prinzipiell für die Studie und ihren Wirkungs-/Leserkreis relevant wären):

a) Inkongruenz mit den drei Einschlusskriterien

¹⁵ www.schienenlaerm.de

¹⁶ www.umweltbundesamt.de

¹⁷ www.lfu.bayern.de

Tab. 5: Fremdsprachen (Japanisch, Russisch, Italienisch, Französisch) (b)

Autor (Jahr)	Titel
Sone u. a. (1973)	Effects of High Speed Train Noise on the Community along a Railway
Machida (1989).	Study on the Sence Survey on Shinkansen Super-express Line Noises
Tamura (1989)	Community Response to Outdoor Noise at the Sites Exposed to Shinkansen or suburban Railway Noise
Yokoshima u. a. (1999)	Study on Factors Constituting Annoyance Due to Shinkansen Railway Vibration
Yokoo & Mitani (1982)	The effects of chronic exposure to train noise on the mental efficiency of elementary school children
Yokoo & Sebayashi (1981)	Effects of chronic exposure to railway noises in thinking process of school children
Sato (1990)	Two surveys on the effect of vibration on traffic noise annoyance
Osada u. a. (1972)	Effects of train and jet aircraft noise on sleep
Ohkubo, Miyazaki & Osada (1976)	Response of finger pulse amplitude to intermittent noise
Koszarny, Szata & Gorynski u. a. (1979)	Exposure to railway noise and ist effects on the population
Stolbun u. a. (1989)	Effect of transportation noise on the status of the cardiovascular system of the population
Kabalova, Soldatkina & Zaitseva (1985)	Function of the central and peripheral nervous-systems in exposure to transportation noise of varying intensity
Goldman, Dorman, Goncharov, Borisveich & Perekrest (1973)	Working conditions and state of health of operators of railway roadbed equipment
Zaslavskii (1970)	The effect of industrial noise on the auditory organs in conductors and railway car inspectors
Zaslavskii (1972)	Evaluation of the decrease in auditory function in railroad workers according to tonal audiographic data
Volkov u. a. (1972)	Public evaluation of railroad transport noise
Kamenskii (1985)	Effects of noise and vibration on members of locomotive crews of modern electric locomotives
Pierangeli & Ghirlanda (1955)	Occupational deafness in railway workers
Ota, Yokoshima & Tamura (2007)	Comparison of Dose-Response Relationships Among Different Traffic Noises - Social Survey on Residential Areas Exposed to Combined Noises
Vallet (1982)	Sleep disturbance caused by noise

Tab. 6: Fehlende Verfügbarkeit (inkl. Subito → im deutschen Leihverkehr nicht erhältlich) (c)

Autor (Jahr)	Titel
Garnsworthy (1977)	A Study of Question Order and Wording Experiments (M.Sc. Dissertation)
de Jong & Peeters (1983)	Railway Noise in the Living Environment
de Jong & Tukker (1983)	Annoyance by Railroad Traffic Noise
de Jong, Opmeer & Miedema (1994)	Annoyance by Environmental Pollution in the Netherlands
Heimerl & Holzmann (1978)	Ermittlung der Belästigung durch Verkehrslärm in Abhängigkeit von Verkehrsmittel und Verkehrsdichte in einem Ballungsgebiet. (Straßen- und Eisenbahnverkehr)
Lambert u. a. (1994)	Community reactions to high speed train noise in France
Miedema (1987)	Annoyance From Combined Noise Sources
Moehler u. a. (1986)	Vergleich Der Lästigkeit Von Schienen- Und Straßenverkehrslärm. (Comparison of the Annoyance Due to Railway and Road Traffic Noise)
Peeters (1981)	Annoyance Due to Railway Noise in Residential Areas
Peeters et al (1984)	Railroad Noise Annoyance in Residential Areas
Richardson (1996)	A Study of Factors Causing Railway Noise Annoyance (M.Sc. Dissertation)
Rylander, Björkman & Sörensen (1993)	Dose-Response Relationships for Environmental Noises
Schuemer & Schuemer-Kohrs (1983)	The Influence of Some Non-Acoustical Factors on Reactions to Road and Railway Noise
Schuemer & Zei-chart (1989a)	Strukturanalysen Zur Reaktion Auf Verkehrslärm: Teil I: Untersuchungsansatz. (Structural Models for the Reactions on Road and Railway Traffic Noise: Part I: Study Methods)
Schuemer & Zei-chart (1989b)	Strukturanalysen zur Reaktion auf Verkehrslärm: Teil II: Ergebnisse. (Structural Models for the Reactions on Road and Railway Traffic Noise: Part II: Results)
Schuemer u. a. (1981)	Reactions to Road and Railway Traffic Noise in Urban and Rural Areas
Schuemer u. a. (1988)	Structural Models for the Effects of Road and Railway Noise
Tamura (1994)	Comparison of community response to outdoor noise in the areas along Shinkansen and ordinary railroad
Ota u. a. (2006)	A study on evaluation methods of combination traffic noises, part 2: Community response to road traffic and conventional railway noises
Yano, Murakami, Kawai & Sato (1998)	Comparison of responses to road traffic and railway noises

Tab. 7: Körperliche Schäden (Hörschädigung) als untersuchte abhängige Variable (d)

Autor (Jahr)	Titel
Clark & Popelka (1989)	Hearing levels of railroad trainmen
Carter, Macsween, Bulteau, Gray & Ferris (1979)	Environmental noise and pure tone thresholds
Kryter (1990)	Hearing levels of railroad trainmen

Tab. 8: Nicht fokussierte Zielgruppen (Bahnarbeiter anstatt Anwohner) (e)

Autor (Jahr)	Titel
Menotti (1967)	Epidemiological study on ischaemic heart disease in the railroad employees in Rom
Johanning (1991)	Back disorders and health problems among subway train operators exposed to whole-body vibration
Henderson & Saunders (1998)	Aquisition of noise-induced hearing loss by railway workers
Virokannas, Anttonen & Niskanen (1994)	Health risk assessment of noise, hand-arm vibration and cold in railway track maintenance

Nach dem Ausschlussverfahren blieben schließlich **136** potentiell relevante Arbeiten übrig, deren Volltexte daraufhin zu beschaffen versucht wurden. Von diesen **136** Untersuchungen standen letztendlich **119** in Volltextform zur Verfügung. 17 Studien konnten nicht ausfindig gemacht werden. Bei den Primärstudien ist davon auszugehen, dass hier die Daten desselben Experimentes oder derselben Laborstudie hin und wieder in mehreren Publikationen hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte publiziert wurden. Ohne Unterstützung der Studienautoren ist es jedoch nur schwer zu unterscheiden, ob es sich bei zwei ähnlichen Studiensettings um dasselbe oder ein sehr ähnliches Nachfolgeexperiment handelt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass der vorliegende Datensatz Redundanzen enthält. Abschließend ist der Recherche-Prozess in einem Flussdiagramm der ein- und ausgeschlossenen Studien veranschaulicht (siehe Abb. 42).

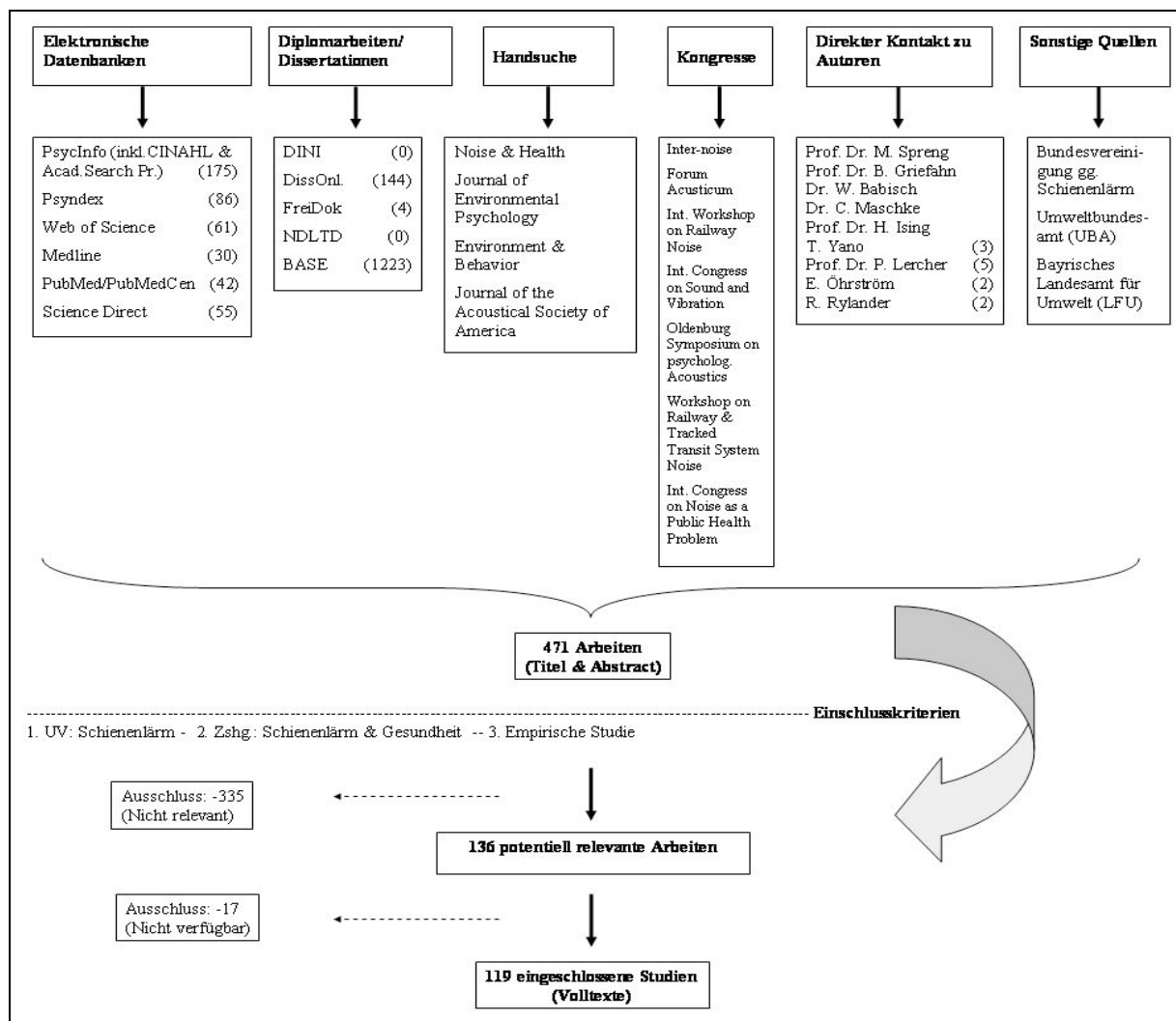


Abb. 42: Flussdiagramm der ein- und ausgeschlossenen Studien

4.3.3.2 Internes Bewertungssystem

Aufgrund der Heterogenität des Datenmaterials und der teilweise minderwertigen Qualität und auch lückenhaften Berichterstattung in den eingeschlossenen Studien konnte mit dem vorliegenden Studienmaterial keine quantitative Synthese oder auch statistische Metaanalyse gerechnet werden, um die Ergebnisse und den aktuellen Forschungsstand in kondensierter Form zu präsentieren. Die anfängliche Idee der iterativen Entwicklung eines Qualitätsratings, welches die methodische Güte der Primärstudien und damit den qualitativen Gehalt der berichteten Ergebnisse durch Vergabe von gewichteten Punktwerten für ausgewählter Gütekriterien widerspiegelt, wurde aufgrund der geringen Varianz methodischer Feinheiten oder –falls vorhanden– dessen fehlende Berichterstattung in den veröffentlichten Studien ebenfalls verworfen.

Um die Aussagekraft der Forschungsbefunde dennoch bewerten und einschätzen zu können und die allgemeinen Trends in den Ergebnissen zu den Auswirkungen von Schienenlärm auf die Gesundheit zusammenfassend zu verdichten, wurde intern ein Bewertungssystem mit vier Evidenzstufen entwickelt, das sich an allgemeinen Modellen zur Evidenzbewertung von wissenschaftlichen Studien orientiert. Diese Evidenzstufen werden im Folgenden mit kurzen Ankerbeschreibungen aufgeführt:

Evidenzlevel:

➤ **Stufe 1 (+ + +)**

Sekundärstatistischer Nachweis

➤ **Stufe 2 (+ +)**

Eindeutige Befunde der Primärstudien

➤ **Stufe 3 (+ + /-)**

Widersprüchliche Befunde der Primärstudien mit Tendenz in eine Richtung, schwache Tendenz in eine Richtung

➤ **Stufe 4 (+ /-)**

geringe Evidenz: zu wenige Studien, widersprüchliche Befunde

Die einzelnen Ergebnisblöcke entlang der abhängigen Konstrukte wurden diesen Evidenzstufen zugeordnet, um eine allgemeine Einschätzung der berichteten Ergebnisse in ihrer Qualität und Eindeutigkeit zu ermöglichen.

5. Ergebnisse

Im Ergebnisteil schließt sich an eine generelle Einführung und Beschreibung des gesamten Datenpools die Besprechung der einzelnen gesundheitlichen Aspekte in Bezug auf Schienenlärm und seine möglichen Folgeerscheinungen.

5.1 Deskription der Studien

Der Review über die Auswirkungen von Schienenlärm auf die Gesundheit bezieht sich auf eine narrative Darstellung und möglichst sinnvolle Gruppierung des gesammelten Datenpools von derzeit 136 (weniger 17 nicht erreichbaren) Primärarbeiten. Eine quantitative Zusammenführung und Auswertung der Studien ist aus mehreren im Folgenden erläuterten Gründen nicht umsetzbar (für eine ausführlichere Begründung sei auf den Abschnitt 6.2 verwiesen). Tab. 9 fasst alle in den Literaturüberblick integrierten Studien mit Angabe der relevanten Angaben zu Referenz, Studienjahr, Design, Fragestellung, Untersuchungsgegenstand, Quelle und grobem Ergebnisexzerpt zusammen.

Eine quantitative, meta-statistische Zusammenführung der Studien ist aus mehreren anschließend aufgereihten Gründen nicht möglich:

- Vielzahl heterogener Ergebnisvariablen (einschließlich unklarer oder differierender Definition dieser)
- Verwendung unterschiedlicher (und oft nicht standardisierter) Messinstrumente sowohl für die erfasste Geräuschbelastung (UV) als auch für erhobene Konstrukte (z.B. Lärmbelästigung (AV))
- Unvollständige Ergebnisdarstellung (z.B. fehlende Signifikanzwerte, Operationalisierung der Konstrukte)

Der gesamte Datenpool reicht von Studien aus dem Jahr 1964 von Izumiyama (1964) bis hin zu aktuellen Arbeiten aus dem Jahr 2008/2009. Insgesamt verortet die Lärmwirkungsforschung ihre Anfänge in den 70er Jahren mit zahlreichen Studien zu lärminduzierten Reaktionen (wie z.B. über die breite Erhebung des individuellen Belästigungsempfindens) in Japan, Frankreich, England und Kanada. Mit der großen britischen Studie im Jahr 1975 von Fields (Fields 1977; Fields und Walker 1982b) begann eine neue Runde der Schienenlärmstudien in den Niederlanden, Deutschland, Dänemark und Schweden, wobei es sich hauptsächlich um epidemiologische Fragebogenstudien handelte. Durch die zunehmende Etablierung der Arbeitskreise um die Lärmwirkungsforschung in Europa und darüber hinaus und einer theoretischen Verankerung des Lärmkonzepts in einem stresstheoretischen Ansatz fand eine zunehmende Verlagerung des wissenschaftlichen Fokus statt. Dieser bewegte sich weg von dem zunächst in großen, ökonomisch geplanten Fragebogenerhebungen lärmbelasteter Anwohnergebiete bis dahin zentralen Konstrukt der Belästigung hin zu objektiver operationalisierbaren gesundheitsbeeinträchtigenden Untersuchungsgegenständen. Fortan wurde Lärm in seinem theoretischen Verständnis und dem Einbezug in komplexe Modelle über dessen mögliche Folgeerscheinungen als Stress erzeugender Umweltreiz ‚behandelt‘ und verstanden, während bis zu diesem Umbruch vorrangig das subjektiv psychische Phänomen der Belästigung im Brennpunkt stand. Im weiteren Verlauf der wachsenden Lärmwirkungsforschung verschob sich der Fokus aber auch auf manifeste, mögliche gesundheitliche Konsequenzen durch den Umweltstimulus Lärm. Dazu zählten unter anderem Schlaf und physiologische Parameter (Herzrate, veränderte neurophysiologische Maße), die vorrangig in experimentellen Schlaflaborstudien mit dem Polysomnogramm (beispielhaft sei hier vor allem auf die Arbeitsgruppe um

Griefahn, Marks und Basner verwiesen) untersucht wurden, wie auch durch Lärm induzierte (und damit eventuell über die Beeinflussung der Rekreationsfunktion des Schlafes verursachte) Leistungseinbußen bei Kindern und Erwachsenen.

Lärm in seiner Wirkung auf die Gesundheit wurde in diesem Rahmen besonders bezüglich der drei Hauptverkehrsquellen Straßen-, Schienen- und Fluglärm untersucht, nicht zuletzt aufgrund der sich stetig in Richtung exponentiellem Zuwachs wandelnden globalen Verdichtung der Infrastruktur und dem Versuch einer zunehmend verbesserten Mobilität durch den rapide fortschreitenden Ausbau und die Technisierung der Fahrzeuggesellschaft. Kurz gefasst kann festgehalten werden, dass Schienenfahrzeuge zunehmend schneller (mit höheren Spitzengeschwindigkeiten), länger, in größerer Anzahl und in hochfrequenterem Modus unterwegs sind. Diese Entwicklung trägt maßgeblich zu einer steigenden Geräuschbelastung der betroffenen sozialen Umwelt bei. Die identifizierten Studien berichten daher über die im Folgenden aufgeführten Fälle hinsichtlich verschiedener abhängiger Variablen:

- Wirkung einer singulären Schallquelle (in diesem Falle Schienenlärm) mit oder ohne Referenz zu anderen Verkehrslärmquellen (Straßen- und Fluglärm)
- Dominanz einer Lärmquelle bei simultaner geringerer, gleicher oder stärkerer Belastung durch eine weitere Quelle
- Summenindex der (nicht weiter differenzierten) totalen Geräuschbelastung

Der anschließende Ergebnisteil gliedert sich in Blöcke entlang der untersuchten abhängigen Variablen, wobei jeder Abschnitt die aktuelle Datenlage zu den Zusammenhängen zwischen Schienenlärm und dessen potentiellen gesundheitlichen Auswirkungen erläutert. Dies geschieht in Bezug auf folgende Dimensionen:

- Belästigung (engl. annoyance)
- Gestörtheit bei (täglichen) Aktivitäten (engl. disturbance)
- Schlaf
- Leistung
- Kinder
- Physiologische Parameter (inkl. endokriner Parameter)

Die Abschnitte *Belästigung* und *Gestörtheit bei täglichen Aktivitäten* lassen sich nicht immer vollkommen trennen, da es in den Studien oftmals nicht nur zu einer unklaren und schwammigen theoretischen Begriffsbestimmung der beiden Konstrukte kommt, sondern auch zu einer Konfundierung in der Operationalisierung der zwei Aspekte. Es gibt Untersuchungen, in denen direkt nach der (allgemeinen) Belästigung gefragt wird, andere hingegen fragen nach der Belästigung *aufgrund/durch* die Störung bei bestimmten alltäglichen Aktivitäten. Wieder andere Arbeiten erheben lediglich die Gestörtheit von Tätigkeiten unabhängig von der unmittelbaren Erfragung der Belästigung, die daraus hervorgeht. So wird die allgemeine bzw. totale, direkt erfragte Belästigung wie auch die Belästigung aufgrund der Störung bei bestimmten Aktivitäten unter dem Abschnitt *Belästigung* zu finden sein. In der Sequenz der *Gestörtheit bei täglichen Aktivitäten* fallen so dann lediglich diejenigen Arbeiten, die *nur* nach der Gestörtheitsreaktion, nicht aber jene, die direkt nach der Belästigung oder der Belästigung durch die Störung von Aktivitäten fragen.

Falls eine Studie Ergebnisse zu mehreren Konstrukten zusammenträgt, wird diese Arbeit in den unterschiedlichen Abschnitten getrennt (mehrfach) aufgeführt, um die Resultate in den jeweiligen inhaltlich passenden Unterblöcken zu präsentieren.

Tab. 9: Übersicht über alle gesammelten Studien zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Schienenlärm

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- Größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Aasvang u. a.	2008	S	1349	Lärmpegel	Schlafstörung (Einschlafschwierigkeit, Aufwachreaktion, subjektive Schlafqualität)	5-Punkte-Skala	Leq/Lmax,Nacht (23-7h) (innen/außen)
Aasvang, Engdahl & Rothschild	2007	S	307	Lärmpegel	Belästigung, <u>Schlafqualität</u> (Einschlafschwierigkeit, Gründe für Aufwachreaktion)	5-Punkte-Skala, dichotome Fragen	Lmax: Schlafzimmer (23.9-42.8dB), außen (23.9-44.5dB)
Anrlin	1988	L S St	5808	Lärmpegel, Zugfrequenz	Belästigung, Störung bei Aktivität, Gesprächsstörung, Schlafunterbrechung, Aufwachreaktion	Skala (Fokus auf „höchst belästigt“): 5 Belästigungskategorien (1-5, 6-10, 11-20, 21-30, >30% höchst belästigt)	Lmax (70/80/90dB) , Zugfrequenz über 24h bei konstantem Pegel (80dB)
Anrlin & Rylander	1979	S St	30-190	Unterbrechung von Ruhe/Schlaf, Sprache, Aufwachreaktion, Vibration, Lärmquelle	Belästigung	Skala (Fokus auf „sehr belästigt“): 2 Belästigungskategorien: niedrige (1-5% sehr belästigt) & hohe (8-16% sehr belästigt) Belästigung	–
Ali	2005	S	714	Entfernung zwischen Quelle & Receiver, Geschwindigkeit des Zuges, Größe des Receiver, Länge des Zuges, Barriere, Lärmpegel	Belästigung, Störung von Aktivität, psychische/ physiologische Reaktion, Einstellung gegenüber legaler Regulierung, Vorschläge zur Lärmreduktion	5-Punkte-Skala	Leq,dn: 82.7 (10km/h) - 93.7dB (100km/h)
Andersen, Kühl & Relster	1983	S	615	Lärmpegel, Zugfrequenz	Belästigung, Verhaltensänderung, Toleranz gegenüber Zugverkehr, Gesundheitsstatus, Schlafschwierigkeit	Fragen, 4-Punkte-Skala: 3 Belästigungskategorien (stark belästigt, stark/etwas belästigt, belästigt)	Leq,24h (43-71dB), Lmax (78-102dB) außen 2) 30-40 Züge pro 24h, 80-100 Züge, 260-320 Züge

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Barregard, Ohrström	Bonde & 2008	S	1953	Lärmquelle, Lärmexposition	Hypertonie	subjektive Hypertonie, von einem Arzt diagnostizierte Hypertonie, Gebrauch anhypertoner Medikamente	L _{Aeq,24h} (4 Kategorien: 45-50, 51-55, 56-60, 61-70dBA) draußen
Basner, Eimenhorst, Maas, Müller, Quehl & Vejvoda	2008	L St S	72	Lärmexposition	Belästigung, Schlaf, Atembewegung, physiologische Reaktion, subjektive Schlafqualität	physiologische Parameter (Fingerpuls, Cortisol, Noradrenalin), 5-Punkte-Skala	Anzahl der Lärmereignisse (40, 80, 120), 5 Pegelstufen (45-65dBA), 3 Lärmquellen (einzeln, doppelt, dreifach, kombiniert exponiert)
Bonnefond u. a.	2008	S	38	Lärmexposition, Alter, Tag/Schichtarbeiter, Tageszeit der Befragung	Leistungseinschätzung, subjektive Schlafqualität, Unbehagen durch Lärm, Leistung, Schläfrigkeit, Wohlbefinden (Vergnügen, Motivation, Angst, Müdigkeit)	subjektive Maße, Stroop & Aufmerksamkeit	Leq: Ruhe (35dBA), moderat (40 dBA), laut (50 dBA)
Bronzaft & McCarthy	1975	S	212	Lärmpegel, Zugfrequenz, Lärmexposition	Lesefähigkeit, Lärmeinstellung	Wortschatz, Textverständnis, allgemeine Lesefähigkeit; 10 Items (Lärm)	Leq 9-15h (59dB), Lmax (89dB) im Klassenraum
Chan & Lam	2008	S	231	Gebrauchsfrequenz, Informationsbias	Lärmelastigung, Einstellung (Zufriedenheit mit Lärmverringerungsmaßnahmen), subjektive Adaption	7-Punkte-Skala	–
De Coensel, Botteldooren, Berglund, Nilsson, De Muer & Lercher	2007	S St	100	Zugart, Abstand der Lärmaufnahme zur Quelle, Geschwindigkeit	Belästigung	Subjektive Lärmeinschätzung durch eine Zahl, Fragen (z.B. zu welchem Ausmaß wärst du belästigt durch dieses Geräusch?)	Leq (45s)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
De Jong	1979a	S	671	Zugart mit unterschiedlicher Ladung, unterschiedliche Zuggeräusche	Belästigung	2 Fragen (7 Punkte Skala)	Leq, Lmax, Zeit, Anzahl der Lärmergebnisse, 9 Messpunkte um/in Anwohnerhäusern
Di Nisi & Muzet	1989	L S	96	Lärmquelle, Lärmpegel, Zyklus der Frau, Typ A/B-Verhalten	Herzrate, Fingerpuls, Körperbewegung	physiologische Parameter (EKG, Plethymographie, Radarsystem)	Bortners Skala (1-24 Skala für 14 Items), Lmax (L=90dBA, S=80,5dBA über S=17s, L=22s)
Di Nisi, Muzet & Weber	1987	L S St U	80	Lärmempfindlichkeit, Geschlecht, Lärmmodus, Tageszeit	Herzrate, Fingerpuls, Atembewegung, Körperbewegung	physiologische Parameter (EKG, Plethymographie, Radarsystem)	LEM (Skala 1-12), Lmax (S=76,6dBA, L=86dBA, St=81dBA/71dBA, U=74,5dBA über 10-21,4s)
Evans, Lercher, Meis, Ising & Koffler	2001	S St	115	Lärmpegel	psychophysiologischer Stress, Motivation, Stresssymptome	physiologische Parameter (Nor-Adrenalin, Cortisol, Blutdruck, Herzrhythmus, Reaktivität), Lesen, Stressinduktion, 3-Punkte-Skala	Ldn,niedrig: unter 50dBA (34-50dBA, Lmax=57dBA), Ldn, laut: über 60dBA (52-71dBA, Lmax=74dBA)
Fastl, Kuwano & Namba	1996	S	16	Lärmpegel, Lärmquelle	subjektive Einschätzung der Lautstärke (Geräuschquelle, prominentestes Geräusch, Overall)	Länge der Linie (unmittelbar empfundene Lautstärke), 7 Kategorien ("sehr leise" bis "sehr laut"), Schätzung mittels einer positiven Zahl, Markierung einer horizontalen Linie (150mm, "sehr leise" bis "sehr laut")	L Aeq, 15min / Laeq, 100ms
Fields	1979	S	1453	Lärmpegel, Anzahl der Züge, Art der Züge	Belästigung (Reaktionen, Gefühle, Einstellungen)	10-Punkte-Skala	Lmax (Zugvorbeifahrt), Leq, 24h, Ldn

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Graham, Janssen, Vos & Miedema	2009	S St	36	Lärmpegel	physiologische Lärmempfinden	Reaktion, physiologische Parameter Ohrstöpsel, physiologische Parameter (Aufwachreaktion, Atmung, Herzrhythmus), Sensitivitätsskala: nicht (0) – extrem (10)	LSPT (Lärmpegel innen), D (Differenz innen/außen), Loutdoor, SPT, Loutdoor,max, Lindoor,max
Griefahn u. a.	2008	L S St	24	Lärmquelle, Lärmpegel, Dynamik des Lärmanstiegs, Schlafphase vor dem Stimulus, Zeitpunkt der Nacht	autonomer/kardialer Arousal, Aufwachreaktion	physiologische Parameter (u. a. Herzrate)	Leq, Lmax
Griefahn, Damaschke, Künemund & Marks	2004	L S St	32	Lärmquelle, Lärmpegel	subjektives Befinden, Stimmung, subjektive/objektive Schlafqualität, Müdigkeit, Leistung, Unterdrückung intendierter Handlungen	Schlafqualitätsindex, physiologische Parameter, Aufmerksamkeit, kognitive Fähigkeit	Leq (39,44, 50dBA)
Griefahn & Marks	2006	L S St	24	Lärmquelle, Lärmereignis, Anzahl der Lärmnächte	subjektive (Einschlafschwierigkeit, Ruhe, Tiefe, Dauer, Erholung, Körperbewegung, Müdigkeit) & objektive Schlafqualität (Einschlafzeit, Dauer, Aufwachreaktion, Weckbarkeit, Effizienzindex)	10-Punkte-Skala, Müdigkeitsskala, physiologische Parameter	Leq (39/44/50dBA), Lmax (50-62, 56-68, 62-74dBA)
Griefahn, Marks & Basner	2006	L S St	24	Lärmpegel, Lärmquelle, Anzahl der Lärmnächte	Schlafstruktur (Einschlafzeit, Dauer, Periodenzeit, Aufwachreaktion, Weckbarkeit, Effizienz-/Störungsindex, Wachzeit), subjektive Schlafqualität (Einschlafschwierigkeit, Ruhe, Tiefe, Dauer, Erholung, Körperbewegung), Leistung	physiologische Parameter, 10-Punkte-Skala, Test	Leq,Nacht,23-7h (39/44/50dBA), Lmax (50-62/56-68/62-74dBA)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n) Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Griefahn, Marks & Robens						
	2006	L S St 32	Lärmquelle, Anzahl der Nächte	subjektive (Einschlaf- schwierigkeit, Ruhe, Tiefe, Dauer, Erholung, Körper- bewegung, Müdigkeit) & objektive Schlafqualität (Ein- schlafzeit, Periodenzeit, Aufwachreaktion, Weckbar- keit, Dauer, Effizienzindex, Phasen, REM), Leistung	10-Punkte-Skala, Müdigkeitsskala, physiologische Parameter, Test	Leq (39/44/50dBA), Lmax (50-62, 56-68, 62-74dBA), permanenter Hintergrundlärm (32dBA)
Griefahn, Marks & Robens	2008	S St 24	Lärmquelle, Lärmereignis, Lärmsperre	subjektive (Einschlaf- schwierigkeit, Ruhe, Tiefe, Dauer, Erholung, Körper- bewegung, Müdigkeit) & objektive Schlafqualität (Ein- schlafzeit, Dauer, Weckbar- keit, Dauer, Phasen, Effi- zienz, Störungsindex)	10-Punkte-Skala, Müdigkeitsskala, physiologische Parameter	Leq (45dBA: 10-1h, 5-8h, 38dBA: 1- 2h, 4-5h, 34dBA: 2-4h), Lmax (56- 68dBA)
Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Mochler & Meh- nert	2000	S St 1977	Lärmquelle, Tageszeit	Belästigung, subjektive Schlafstörung (Spannung, Müdigkeit, Bettgeizzeit, Qualität, Aufwachreaktion, Fensterposition, physische/ mentaler/ emotionaler Stress, Alkoholkonsum), Schlafverhalten, Leistung	5-Punkte-Skala, physiologische Parameter, Reaktion	–
Hall, Dixit & Taylor	1980	L S St 1217	Lärmquelle, Lärmpegel	Belästigung	bipolare 9-Punkte-Skala, unipolare 7 Punkte Skala	Leq, 24h

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Hambrick-Dixon	1988	S	102	Schulzentrum (Lehrerkompetenz, Curriculum, Entfernung), Frequenz der Züge, Lärmpegel, Fensterstellung	visuelle Daueraufmerksamkeit	visuelles Entdecken eines Targets unter verschiedenen komplexen Distraktioptionen, Antworten verbal/taktil	Lmax (90-108dBA)
Heft	1979	S U	94	Stadtgebiet (qualitativ), Lärmpegel/Aktivitätenlevel, fokale Eigenschaften der Wohnung	Aufmerksamkeit (visuell, zufälliges Lernen, auditorisch)	visuelle Suchaufgabe (Target unter Distraktoren finden, Geschwindigkeit, Fehlerrate, zufälliges Lernen), Matching einer Figur unter vielen, die einer Standardfigur gleicht, während auditorischer Stimulation	Interviewerrating (7-Punkte-Skala: Frequenz, Intensität verschiedener durch Eltern benannter Sounds aus dem Haus (Aktivitäten: TV, Radio, Anwendungen, äußere Quellen), Lärmpegel
Heininen-Guzejev, Vuorinen, Kaprio, Heikkilä, Mussalo-Rauhamaa & Koskenvuo	2000	L S St	1495	Lärmquelle, Lärmempfindlichkeit, Lärmexposition	Lärmbericht, Belästigung	10 Items, Fragen	Leq (Pegel von 50-64dBA)
Howarth & Griffin	1990	S	30	Belästigungsmodus	Belästigung, Präferenz der Reduktion der Belästigungsquelle	Skala, Frage: "Welcher der beiden simultanen Stimuli soll reduziert werden?"	Leq (59/64/69/74/79/84dBA), VDv (0.07/0.10/0.14/0.20/0.28/0.40 - 1.75ms)
Howarth & Griffin	1990	S	24	Lärmausmaß, Vibrationsausmaß	Belästigung	subjektive Bewertung (Orientierung an einem Referenzwert 100)	Leq (6Stufen, je 24s)
Hygge	1992	L S St	417	Lärmquelle, Lernfähigkeit, Lärmexposition	schwierige Gedächtnisaufgaben, leichte Widererkennungsaufgaben	-	Leq (66dBA), Lmax (76dBA), Lmax [St] (72dBA)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Izumi						Lab: unipolare 10-Punkte-Skala, Feld: kategorische 6-Punkte-Skala	Lab: Ldn Feld: Leq, 24h (4 Stufen von 45-65dBA), 30min Sessions mit 8 Zugvorbeifahrten
Izumiya	1988	S St	211	Lärmausmaß, Setting	Belastigung (to-tal/quellenspezifisch)		
	1964	S	8	Lärmpegel, Lautstärke der Stimme	Verständlichkeit	Artikulationsindex (durchschnittliche % der Antworten zu 100 Silben) = Silbendeutlichkeitsindex	Lärm: Phon (40-80), Stimme: 40-80dBA
Joncour, Cailhau, Gautier, Champelvoier & Lambert	2000	L S St U	700	Lärmquelle, Tageszeit, Expositionssituation	Belastigung (global, Störung bei Aktivität, Verhaltensmuster)	10-Punkte-Skala, Frage: „Welche Belastigungsnote würdest du S/St in den letzten 12 Monaten zu den verschiedenen Tageszeiten geben?“ (höchst belästigt = 5-10)	Leq (kontinuierlich)
Kaku, Hiroe, Kuwano & Namba	2004	S St	12	Lärmquelle, Lärmpegel, Lärmtyp, Dauer, Tageszeit	Belastigung, Ausschalten des CD-Rekorders, Armbe- wegungen	5-Punkte-Skala: "Wie stark war ihr Schlaf von dem Geräusch letzte Nacht gestört?" ("gar nicht belästigt" bis "Schlaf war extrem gestört", physiologische Parameter (alle 60s)	Hauptstraßenverkehr (27dBA in 20-25m Entfernung), Schnellstraße (10dBA in 100m Entfernung), Schienenlärm (in 20-25m Entfernung), Leq, 1h = gleichgesetzt für alle Quellen (27.5/35/42.5dBA), L _{max} für Zugvorbeifahrten um 14-21dBA höher als Leq, 1h
Kim, Lim, Hong, Jung & Lee	2007	L S St	377	Lärmmessung, Lärmquelle	Belastigung	10-Punkte-Skala	–
Klæboe, Hårvik & Madshus	2003	S St	1427	Vibration	subjektive Belastigung, Gestörtheit (Quelle, Art, Schlaf, Aufwachen, Tageszeit, Aktivitäten, Ängste bezüglich Hausschäden, genereller Affekt)	dichotome Fragen	vW, 95 (Vibrationsgeschwindigkeit)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Klatte, Meis, Sukowski & Schick	2007	S U	89	Lärmquelle, Länge der Zahlenlisten	Sprachverständnis, phonologisches Kurzzeitgedächtnis, Satzverständnis, phonologische Bewusstheit, Zahlenreihen erinnern	Bilder, die ähnlich klingende Namen repräsentieren, Bild benennen, 2 Nichtwörter, sagen, ob sie gleich/verschieden sind, Ausführen von verbalen Instruktionen, Welches 3er-Wort unterscheidet sich vom anderen im ersten oder letzten Sound, Zahlenreihen wiederholen	Lärm 2s bevor Start, 3s nach Beendigung der verbalen Instruktion, Leq (57dBA/59dBA/36dBA)
Knall & Schümer	1983	S St	1080	Lärmquelle, Region, Lärmpegel	generelle Belästigung, generelle Gestörtheit, <u>Gestörtheit bei Aktivitäten</u> (Erholung innen/außen, Kommunikation, Schlaf, vegetative/somatische Beschwerden), Verhaltensänderungen	–	Leq, Tag, Leq,Nacht (50/70dBA)
Kuhnt u. a.	2008	S St	24	Lärmpegel, Lärmquelle, Aufgabenschwierigkeit während Lärmexposition	Belästigung	verbale 5-Punkte-Skala (je Skaleneinheit 10 Untereinheiten, Range 0-50)	Leq (34/46/64dBA), Grammatical Reasoning Test, S: 23-81dBA, St: 43-75dBA
Kurra, Morimoto & Maekawa	1999	L S St	64	Lärmquelle, Anzahl Lärmereignis, Lärmpegel	allgemeine totale Belästigung	7-Punkte Skala („gar nicht“ vs. „sehr stark belästigt“), RAQ (Reading and Questions), LAQ, OAQ (Overall Annoyance), HAQ (Home environment questions)	Leq (6 Level, 30-55dBA) innen, Anzahl (8/12/16 Ereignisse über 30min)
Kurra, Morimoto & Maekawa	1999	L S St	64	Lärmquelle, Anzahl Lärmereignis, Lärmpegel	Belästigung während Lesen, Hören, heim projizierte Belästigung	RAQ, LAQ (Rede hören vom Tape)	Leq (6 Level, 30-55dBA), Anzahl (8/12/16 über 30min)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Kuwano, Namba & Okamoto				E1: 15 Sounds (10s), E2/3: 57 Kombinationen, E3: Vorstellung: Sitzen in Zugabteil, Zuhören Konver- sation benachbarter Passa- giere	E1: subjektive Belästigung, E2: subjektive Belästigung der Sounds als Ganzes, E3: Urteil über Belästigung	E1/2: 7 Kategorien ("sehr leise" bis "sehr belästigend"), E2/3: 5 Kategorien ("nicht gestört" bis "sehr gestört")	E1: LAeq (55/60/65/70/75dB), E2/3: LAeq N (45-70dB) + C (25- 65dB) [kombiniert]
Lam & Au	2004	S 32		Messzeitpunkt, Lärmpegel	Belästigung	verbale 7-Punkte-Skala	Prä (6 Monate vor Öffnung der Bahnlinie), Post (3 Monate danach), Follow-Up (1 Jahr danach), Leq: St (prä=39-70dBA, post=41-70dBA, FU=45-71dBA), S (post+FU=31- 53dBA)
Lam, Chan, Chan, Au & Hui	2009	S 597		Lärmquelle, Anzahl	Belästigung	Fragen, numerische 7-Punkte-Skala	Leq (max. 75dBA)
Lambert, Champelovier & Vernet	1993	S 40		Lärmpegel, Anzahl Lärmer- eignis	Umwelt/Lebensstil, Einstel- lungen, Lärmwahrnehmung, Verhalten, Akzeptanz, Lärmperzeption	Interview	Leq, tags (8-20h) (meist unter 55dBA), Hintergrundlärm (26-36 dBA)
Lambert, Champelovier & Vernet	1996	S 260		Lärmpegel, Anzahl/Zeitanteil Lärmereignis	totale Belästigung, gestörte Aktivität, Verhaltensände- rung, Akzeptanz	–	Leq, 24h
Lambert, Champelovier & Vernet	1998	S 3078		Lärmpegel, Quelle, neue vs. bestehende Infrastruktur	Belästigung	–	Leq, Tag
Lercher, Evans & Meis	2003	S 123		Lärmpegel	kognitive Prozesse, Auf- merksamkeit, intentionale Erinnerung, zufällige Erinne- rung	visuelle Suchaufgabe, Geschichte lesen, geometrische Puzzles, Beläs- tigungsmessung, freier Recall	Ldn, 24h, hoch (>60dBA, Lmax=74dBA), Ldn, niedrig (<50dBA, Lmax=57dBA), Hintergrundgeräusch (<35dBA)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Lercher, Evans, Meis & Kofler	2002	L S St	1403	Lärmpegel	psychische (Lebensqualität, Schlafstörung), Verhalten im Klassenraum	KINDL (22 Items): 0-4 Antwortskala, Standard Index of Behavior (11items)	Ldn (31-81dBA, 95% innerhalb 40-55dBA)
Leue, Schütte & Griefahn	2004	S St	72	Lärmempfindlichkeit, Lärmpegel, Lärmquelle	Belästigung während imaginer Aktivität	"DoLE" (0-105=hoch)	Leq (40-82dBA)
Liepert, Moehler, Schrekenberg, Schuemer & Fastl	2005	S St	3452	Vorbeifahrfähigkeit, Lärmpegel	Belästigung, Störungen von Aktivität, psychovegetative Störung	Lärmbelastigung-/Lautheitsskalen	Feld: Vorbeifahrfähigkeit, 24h (niedrig: <240 Züge, mittel: 240-360 Züge, hoch: <360 Züge), Leq24h=45-75dBA für St/S; Labor: hoch (13 Züge/1350 PKW, Leq=55.5dBA), niedrig (5 Züge/600 PKW, Leq=52.1dBA)
Liepert, Möhler, Schuemer & Griefahn	1999	S St	1977	dominante Lärmquelle, Lärmexposition, Verkehrsdichte	Schlafstörung, Belästigung	physiologisch: Aktimeter, Interview	Leq, Tag (St: 42-78dBA, S: 45-68dBA), Leq, Nacht (St: 40-68dBA, S: 50-70dBA), Dichte (190-260Züge)
Lim, Kim, Hong & Lee	2006	S	724	Lärmexposition	Belästigung	selbstberichtete Lärmbelastigung, 11-Punkte-Skala (0=gar nicht belästigt, 10=extrem belästigt)	Leq(dn), Tag(7-22h)/Nacht(22-7h): 52-76dBA
Ma & Yano	2004	S St	60	Lärmpegel, Lärmquelle, Nation, Aufgabenstellung	Gestörtheit	verbale 5-Punkte-Skala	Leq 6min (55/65/75dBA), non-auditorische Aufgabe
Marks & Griefahn	2004	L S St	24	Lärmquelle, Lärmpegel	Schlafstörung, Leistung	physiologische Parameter (EEG, EOG, EMG, ECG), Fragen, Switch Task	Leq, Nacht (23-7h)=39/44/50dBA, Hintergrundlärm=32 dBA

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Marks & Griefahn					<u>objektive Schlafparameter</u> (Einschlafen, Dauer, Perio- denzeit, Wachzeit, Phasen, Zyklus), <u>subjektive Schlaf- qualität</u> (Einschlaf- schwierigkeit, Körper- bewegung, Ruhe, Tiefe, Länge, Erholung), Leistung	physiologische Parameter (PSG: EEG, EMG, EOG), Summenindex aus 6x10-Punkte-Skala), Switch Task	Leq,Nacht (23-7h): 40,44,50dBA, Hintergrund (32dBA)
Marks & Griefahn	2005	S	32	Lärmexposition			
Marks & Griefahn	2007	S St	163	Lärmexposition, Lärmquelle	Lärmempfindlichkeit (Woh- nen, Schlafen, Arbeit), subjektive Lautheit, Lästig- keit	Fragen, NoiSeQ (Noise Sensitivity Questionnaire), 2 standardisierte Fragen	Leq (11 Belastungsstufen): 35- 80dBA
Marks & Griefahn	2007	L S St	24	Lärmquelle, Lärmexposition	<u>objektive Schlafparameter</u> (Einschlafen, Periodenzeit, Weckbarkeit, Dauer, Effi- zienzindex, Phasen), <u>subjek- tive Schlafqualität</u> (Ein- schlafschwierigkeiten, Tiefe, Erholung, Körper-bewegung, Ruhe), Belästigung, Leis- tung	physiologische Parameter (PSG: EEG, EOG, EMG), Summenindex aus 6 10-Punkte-Subskalen), Lärm- belästigungsskala (0-10), Switch Task (Reaktionszeit/Fehlerraten)	L,Aeq,Nacht (23-7h), (32dBA Hin- tergrund, 39/44/50dBA)
Marks, Griefahn & Basner	2007	L S St	24	Lärmquelle, Lärmdauer	Schlafstruktur (Einschlafzeit, Schlafzeit bis Aufwachreak- tion, Anzahl Aufwachreakti- on)	physiologische Parameter (PSG: EEG, EOG, EMG)	Leq,Nacht (23-7h): 39/44/50dBA, Mittel: 44,2/44,4/43,0dBA), 32dBA Hintergrund
Marks, Griefahn, Künemund & Basner	2007	S St	16	Lärmquelle, Lärmexposition	<u>Schlafstruktur</u> (Schlaf-tiefe, Aufwachreaktion)	physiologische Parameter (PSG: EEG, EOG, EMG)	Lmax (45-65/51-71/58-77dBA)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Maurin	1979	L S St U	1256	Lärmquelle, Lärmexposition	unerwünschte dingte Effekte umweltbe-	offene Fragen: Klassifizieren der umweltbedingten Effekte nach Natur (Lärm, Vibration, atmosphärische Verschmutzung, visuelle Aspekte, Sicherheit), Ursprung	-
Maruyama	1964	S	51	Lärmpegel, Lärmexposition,	mentale Berechnungen, Gestörtheitsreaktion (Vokali- sierungsaufgabe, Lärm), Gestörtheit	12 einfache Additions-/ Subtrakti- onsaufgaben (visuell präsentiert, orale Antwort), Elektrodenmessung (Reflex, Ausmaß, Veränderung der Wellen, Verzögerung, Länge, An- zahl)	L (65/70/75/80phon)
Maruyama	1964	S	6	Lärmpegel, Lärmexposition	laute Vokalisation (+Stimmumfang), Gestört- heit, Reaktion	Vorlesen von 18 einfachen Rechen- aufgaben (wobei immer eine "3"/"4" in der Aufgabe enthalten war, Lautheit dieser Zahl wurde gemes- sen)	L (60/65/70/75/80phon)
Meyer-Baron	2000	S	250	Schallpegel, Lärmempfind- lichkeit, Bewertung, Kon- trollwahrnehmung, individu- elle Bewältigungsversuche	Gestörtheitsurteile (am Tag, Kommunikation, Entspan- nung/Konzentration, Aktivität draußen, Belästigung)	Fragen, Interview	Leq, Tag (52-77dBA)
Miedema & Van den Berg	1988	S St	685	Lärmpegel, Situation	Belästigung (allgemein, quellenbezogen)	Interview, Fragen, 5-Punkte-Skala	Leq, 24h, Letm
Miedema & Vos	1998	L S St	63969	Lärmexposition	Belästigung	Anteil Belästigte (stark/mittel/schwach), Übertragung der Originalskalen in Skala von 0- 100 (72=stark belästigt, 50=mittel, 28=leicht	L, Aeq

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Miedema & Vos							
	1999	L 15000- S 42000 St		Lärmpegel	Belästigung	5-Punkte-Skala (Kategorien über- setzt in Skalen von 0-100 (ge- ring/mittel/hoch)	L _{Aeq} (45-75dBA)
Miedema & Vos	2007	L 22771 S St		Lärmexposition	selbstberichtete Schlafstö- rungen	Anteil (stark/mittel/schwach)	L _{Aeq} , Nacht
Moehler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000	S 1977 St		Lärmexposition, Lärmquelle	Schlafstörungen (Qualität, Körperbewegung), Leistung	Interviewantworten, physiologisch: Aktimeter, Reaktionstest	L _{Aeq} , Nacht (22-6h), Tag(6-22h), Verkehrsdichte (hoch/niedrig)
Möhler	1985	S 1500 St		Geräuschbelastung, Lärm- quelle	Belästigung, Fensterstelle- wohnheit, Störungen (Kor- munikation, Ruhe, Erholung, Schlaf)	Fragen	Leq, Tag/Nacht (40-70dBA)
Möhler	1987	S ca. St 1300		Lärmpegel	Fensterstellmaßnahmen	–	Mittelungspegel
Möhler, Hegner, Schuemer & Schuemer-Kohrs	1996	S 81 St		Lärmpegel, Schienenschlei- fen	Belästigung (total, Tag, Nacht), <u>Störung bei Aktivität</u> (Telefon, Kommunikation innen/draußen, Erholung, Schlaf, Gehen)	11-Punkte Skala	Leq, Nacht(22-6h)/Tag(6-22h)
Möhler & Knall	1983	S 150 St		Lärmquelle, Lärmpegel	Belästigung, Reaktion, Gesundheit, Schlaf	Interview, Fragen	Leq, 24h/Tag(6-22h)/Nacht(22-6h)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Möhler & Liepert	2006	S St	2079	Lärmquelle, Verkehrsdichte	Belästigung	Interviewantworten, Fragen (5-/10-Punkte-Skala)	Leq
Möhler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000	S St	1600	Lärmquelle, Verkehrsdichte	Belästigung, objektive Schlafstörung, subjektive Schlafstörung, sensorische Reaktion	Interviewantworten, Fragen (5-/10-Punkte-Skala), physiologisch: Aktivimeter, Fragen, Wahlrektionstest	Leq (24h, Tag, Nacht)
Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberger, Mehnert & Griefahn	2000	S St	1977	Lärmquelle, Verkehrsdichte	Belästigung, objektive Schlafstörung (Tiefe, Erholung, Bewegung, Aufwandschwierigkeit, aktuelle Müdigkeit), sensorische Reaktion	Interviewantworten, Fragen (5-/10-Punkte-Skala), physiologisch: Aktivimeter am Handgelenk (Beschleunigungsaufnehmer), Wahlrektionstest	Leq, Nacht (St=40-70dBA, S=50-75dBA), Leq, Tag (St=43-78dBA, S=45-73dBA), Vorbeifahrtstest
Möhler, Schuemer, Knall & Schuemer-Kohrs	1986	S St	1651	Lärmpegel, Lärmquelle	Störung (Reaktion, Kommunikation, vegetativ/somatisch, allgemein, Tag/Nacht), Belästigungs-/Ärgerempfinden (meist quellenspezifisch erfasst)	Fragen, Einzelskala, Summenscore	Leq, 24h
Morihara, Sato & Yano	2004	S St	1741	Ausmaß an Lärmexposition, Distanz von Lärmquelle	Belästigung	selbstberichtete Belästigung (4-Punkte-Skala)	Leq, 24h (St=50-76dBA, S=30-80dBA), Distanzen: Durchschnitt 43m bei Schiene (90% innerhalb 94m), 10m bei Straße (90% innerhalb 18m)
Nagatsuka	1964	S	122	Lärmexposition, Altersgruppe, Schwierigkeitsgrad	mentale Rechenaufgaben	Fehlerrate, keine Antwort	74phon

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Niemann u. a.	2006	L S St U	8539	Lärmquelle, Altersgruppe, 16 medikamentös diagnostizierte Krankheiten, Belästigung	OR (Odds Ratio)	5-Punkte-Skala, Gesamtindex	(kein Lärmpegel)
Ohkubo	1964	S	60	Lärmexposition, Altersgruppe, Geschlecht	Fixierung komplexer/ weniger komplexer Figuren	Fixierungszeit (Welche Figur wird als erstes fixiert?), verlorene Zeit (gar keine Fixierung der Bilder)	74phon
Öhrström	1997	S	3216	Expositionsmodus (Lärm/Lärm+Vibration), Anzahl Zug, Abstand zum Gleis	Umgebungsbelästigung (Lärm, Staub, Abgase, Vibration), Schlaf/ Schlafstörungen, Gesundheit, Wohlbefinden, Belästigung, Aktivitätenstörung	5-Punkte-Skala	Leq, Lmax, Vibration (2mm/s), ohne Vibration (<1mm/s), <25 Züge bis 150 Zügen/24h; 10-300m bis zum Gleis
Öhrström	1997	S	512	Anzahl Lärmereignis, Lärmpegel, Vibration, 5 Gebiete	Belästigung, Schlaf, Schlafstörungen, Wohlbefinden, Gesundheit	5-Punkte-Skalen	Lmax, Leq, Lärmereignisse (1990= 59/Tag (25 Güter, 34 Passagier), 1996= 90 lokale Passagierzüge im Norden, 63/Tag im Süden (25 Güter, 38 Passagier)
Öhrström	2007	L S St	1953	Lärmexposition	Belästigung	5-Punkte-Skala, Belästigung	LAeq,24h (45dBA-70dBA), Leq,Tag (6-18h), Leq,Abend (18-22h), Leq,Nacht (22-6h), Lmax, Ldn
Öhrström, Skanberg & Barregard	2007	S St	1953	Lärmquelle, Lärmpegel	Belästigung	verbale 5-Punkte-Skala (0-4), belästigt=2-4 (moderat, sehr, extrem)	Leq,24h (45-70dBA), Leq,dn, Lmax
Öhrström, Rylander & Björkman	1980	L S St	40	Lärmquelle, Lärmempfindlichkeit	Belästigung	verbale 4-Punkte-Skala, graphische 11-Punkte-Skala (0-10)	Lmax 70/80dBA, Hintergrund 36dBA, Leq (über die 25min Sitzungen)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Öhrström, Gunnarson & Ögren	2007	S St	24	Lärmquelle, Lärmpegel	Belastigung, Sprachwahrnehmung	verbale 5-Punkte-Skala, numerische 11-Punkte-Skala, deskriptive qualitative Beschreibung mit vorgegebenen Adjektiven	4 Lärmsituationen (S/St: Leq, 10min=53dBA, S+St: Leq=53/56dBA, Radioprogramm: Sprecher mit Leq=60dBA während der 10min.
Öhrström, Ögren, Jerson & Gidolf-Gunnarsson	2008	S St	18	Lärmquelle, Lärmpegel, Anzahl Lärmereignis/Nacht	<u>Schlafstörungen</u> (Einschlafschwierigkeit, Aufwachreaktion, Qualität, Bewegung, Müdigkeit) Belastigung	verbale 5-Punkte-Skala, numerische 10-Punkte-Skala, 2 Fragen	Leq, 23-7h (31dBA), Lmax (54dBA), 44 Zugvorbeifahrten
Öhrström & Skanberg	1996	S	3216	Vibration, Lärmexposition	Belastigung, Aktivitätenstörung, Wohlbefinden, Schlafstörungen	selbstberichteter Fragebogen	Vibration: hoch (>2mm/s), niedrig (<1mm/s), keine; LAeq, Lmax
Öhrström, Skanberg, Barregard, Svensson & Angerheim	2005	S St	1953	Lärmpegel, Lärmquelle	Belastigung, Wohlbefinden, psychophysiologische Symptome, Anti-/Bluthochdruck, Medikamente, Aktivitätsstörung (u.a. Kommunikation, Radio/TV), Schlafstörung (Fenster-öffnen, Einschlafen, Aufwachen, Qualität)	5-Punkte-Skalen, Häufigkeit (nie=0, manchmal=1, oft=2), Störungsmaß (nicht sehr störend=2, eher störend=3, sehr störend=4), Summenscore Häufigkeit/Ausmaß (0-6), gestört≥4	Leq, 24h (Leq24h,tot), Ldn
Paulsen & Kastka	1995	S U	16	Lärmexposition, Lärmquelle, Lärmmodus	Stimuluswahrnehmung, Intensität/Ausmaß der Belastigung (0-9)	direkte Fragen, 10-Punkte-Skala	Leq, Vibration (r.m.s.)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Planungsbüro Obermeyer							
						Hauptuntersuchung: 100 Fragen, 300 Einzelitems, 10 Interviewfragen, offener Fragetyp (z. B. Gibt es Lebensbedingungen, die Sie stören, die man ändern sollte? Welche?), dichotom (z. B. Finden Sie den Eisenbahnlärm tagsüber insgesamt noch erträglich?), fünfstufige Antwortskala (am häufigsten); Audiometrie Hauptvariablen: Gestörtheit, Ruhe/Erholung, Ruhemaßnahme, Kommunikation, vegetativ/somatisch, Schlaf, Spontanenennung; subjektiver Gesundheitszustand, Arztbesuch/Medikament, funktionale Beschwerde	mittlerer Gebiets-, A-bewerteter Mittelungspegel L_{am} (dBA): Tag, 6-22h (S: 56-70, St: 57-72, gemischt: 59-71), Nacht, 22-6h (S: 50-69, St: 50-68, gemischt: 55-68), 24h, Summenhäufigkeitspegel: $L_{1..99}$; oberer/unterer Bereich (ca. 70/50dBA, Verkehrsanteil Gesamtgeräusch, Schwankungen, objektive Größen (versch. Pegel)
Quehl & Basner	2008	L S St	72	Lärminduktion	Einzelbelästigung, subjektive Schlafstörung (Menge, Qualität, Aufwachhäufigkeit)	5-Punkte-Skala (1="nicht" bis 5="sehr belästigt"), "Welche Verkehrslärmarten wurden wahrgenommen?", "Durch welche Verkehrslärmarten fühlen Sie sich in der vergangenen Nacht stärker/am stärksten belästigt?" Leq,max (45/50/55/60/65dBA)	
Robertson, Bingham & McIlwraith	2002	S	8	objektiv: 4 Kategorien: Vorrichtung (offen/geschlossen), keine (offen/geschlossen) subjektiv: normale Position, Ohr nah am Fenster (1cm), Ohr am Fenster	subjektive/objektive Lautstärke	subjektiv: "gleich laut", "wenig lauter", "signifikant lauter" im Vergleich mit Normalposition	dBA
Rylander, Björkman & Åhrlin	1977	S St	464	Lärmpegel, Geschwindigkeit, dBAmax, Fahrzeugart/24h, Gebiet	Aktivitätenstörung (Konversation, Zuhören Radio/TV, Schlaf), Belästigung	generelle Belästigung: wenig belästigt	L _{Aeq}

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Sandrock, Griefahn, Kaczmarek, Hafke, Presi & Gjestland	2008	S St	82	E1: Lärmquelle, Lärmpegel E2: Aufgabenschwierigkeit, Lärmempfindlichkeit (Schlaf, Arbeit, Kommunikation, Besitz, Freizeit)	E1: psychoakustische Belästigung (Lautheit, Schärfe, Fluktuationsstärke, Derbheit, E2: Belästigung (bei gestörten Aktivitäten)	E1: Fragen E2: 5-Punkte-Skala mit 10 Abstufungen ("In Bezug auf die zu bearbeitende Aufgabe, wie sehr hat der gegenwärtige Lärm dich gestört?"), GRT (logisches Denken, Arbeitsgedächtnis), MPT (mathematische Aufgabe), NoiSeq	E1: Hintergrund Straße ±3dBA, 5±2s Abstand (Leq=43,6, Lmax=48,7), +Bus/Tram/Truck, LpAmax (Truck=90,2, Bus=84,7, Tram=80,8), angeglichen auf 74,5dBA, 7 Stufen (-9/-6/-3/0/3/6/9dBA); E2: Lmax (Tram 68,6, Bus 67,2, Leq beide=55dBA)
Saremi u. a.	2008	S	38	Lärmexposition, Zugart	Aufwachen	Polysomnogramm	Lärmexposition (35/40/50 dBA), Zugart (Güter/Personen/Diesel)
Sato, Yano, Morihara & Masden	2004	S	2569	Lärmpegel	Belästigung, Aktivitätsstörung	verbale 4-/5-Punkte-Skala, numerische 11-Punkte-Skala, 4 Deskriptoren	Leq, 24h
Schapkin, Falkenstein, Marks & Griefahn	2006	S	22	Lärminduktion	Leistung, Schlafstörung, psychologischer Zustand	Leistung: Aufmerksamkeitsstest, Go/NoGo-Aufgabe (200 Stimuli), Psychische (morgens): 6 Parameter/10-Punkte-Skala, 1 Faktor, Schlafstörungsindex (SDI) 0-60	3 Sets [äquivalent/ (Maximumsspanne)]: 40/(50-62), 44/(56-68), 50/(62-74) dBA
Schapkin & Griefahn	2004	S	23	Lärmpegel	Leistung (Reaktionszeit, ereigniskorreliertes Hirnpotential)	Go/No-Go-Aufgabe, physiologische Parameter (EEG)	Lmax (62/68/74dBA)
Schreckenbergs & Guski	2005	S St	1110	Lärmpegel, Tageszeit, individuelle Verkehrs- (Außenpegel), Lärmquelle	Wohn-/Lebensgewohnheit, subjektive Beeinträchtigung im Haushalt; Teilsample: Schlafqualität, Beeinträchtigung Erhebungsmethodik, besondere Vorkommnisse	offene Frage: „Zu welchen Tages-/Uhrzeiten, werden Sie im Allgemeinen durch ... besonders beeinträchtigt?“, Frage zur stündlichen Lärmbelastung: innerhalb letzten 12 Monate, 5-Punkte-Skala (1=„überhaupt nicht“ bis 5=„äußerst gestört“)	LAeq, Lmax, L1, L95 (L, Tag, Pegelklasse Leq, tag (7-8 Stufen à 5dB Klassenbreite), L, Abend, LAeq, 24h, Ldn)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Schreckenber, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Griefhahn & Moehler	1999	S St	492- 592	Lärmquelle, Tageszeit	Lärmpegel, Belästigung, <u>Gestörtheit</u> (Kommunikation <u>innen</u> , ge- Entspannung <u>außen</u> , ge- samt)	5-Punkte-Skala (1="nicht" 5="stark belästigt/gestört")	bis Lm
Schreckenber, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Möhler & Liepert	2001	S St	1387	Lärmquelle, Fensterstellung, Tageszeit, Jahreszeit	Kommunikations-/ Ruhestö- rung (im Innenraum)	–	Lm, Tag/Nacht/24h, Pegelklasse (4 à 5dB für Tagemittelungspegel im Bereich 50-70 dBA)
Schuemer-Kohrs, Schuemer, Schreckenber, Griefhahn & Moehler	1998	S St	1600	Lärmquelle, Tageszeit	Belästigung (Konversation innen/außen, Ra- dio/Musik/TV, Erholung innen/außen, total, Einschlaf- fen, Aufwachen)	Interview (5-Punkte-Skala, totale Belästigung Nachts auf 11-Punkte- Skala)	Leq
Schütte, Wenning & Griefhahn	2006	S St	70	Schalldruckpegel, Aufgabenschwierigkeit (Criterion Task Set des Grammatical Reasoning Tests), Lärm- quelle, Person (Fähigkeiten/Fertigkeiten)	Leistungsqualität (GRT), Lästigkeit	Test	Leq (45/55dBA)
Sørensen & Hammar	1983	L S	50-100	Lärmpegel, Zuganzahl	subjektive Lärmbelästigung	Kategorisierung der Belästigungsre- aktion, im Fokus: Prozent an "sehr belästigt"	Leq (51-75dBA), Lmax (71-92dBA), 35-250 Züge/24h
Tamura	1994	S	721	Lärmpegel, Zugart	Unzufriedenheit	4-Punkte-Skala (unzufrieden, eher unzufrieden, eher zufrieden, zufrie- den): "Sind Sie zufrieden oder unzu- frieden mit dem Umgebungslärm?"	Leq, 24h, Lmax=40-60dBA

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Vernet	1979	S St	20	Lärmpegel, Ereignisanzahl, Verkehrsart, Gebiet, Leq-Wert	Einschlafschwierigkeit, Aufwachhäufigkeit, Einstellung bezüglich Erwachsenen	5 Kategorien (keine Antwort, transitorische Antwort: erhöhte Muskelspannung/K-Komplex/ vasomotorische Antwort ohne Stadiumsänderung, Stadiums-änderung, Aufwachen, positive Antwort)	dBA, Leq, L ₁ ,...,L ₉₀ , Kategorisierung der Störungen oberhalb der natürlichen Grund-belastung (Spitzenpegel, Auftretens-dauer, Störungsemergenz, Störungsquelle)
Vernet	1983	S St	20	Lärmpegel, Ereignisanzahl, Verkehrsart, Gebiet, Leq-Wert	Einschlafschwierigkeit, Aufwachhäufigkeit, Einstellung bezüglich Erwachsenen	5 Kategorien (keine Antwort, transitorische Antwort: erhöhte Muskelspannung/K-Komplex/ vasomotorische Antwort ohne Stadiumsänderung, Stadiums-änderung, Aufwachen, positive Antwort)	dBA, Leq, L ₁ ,...,L ₉₀ , Kategorisierung der Störungen oberhalb der natürlichen Grund-belastung (Spitzenpegel, Auftretens-dauer, Störungsemergenz, Störungsquelle)
Vos	2004	S	12	Lärmquelle, Geschwindigkeit, Lärmpegel, Entfernung, Fensterstellung	Belästigung	1 Frage (9-Punkte-Skala), 2 Messungen/Person (innen/außen), Simulation ($r > 0.5$), Mittel (0.54-0.82)	Leq (niedere Geschwindigkeit: 65/70/75/80dBA, höhere Geschwindigkeit: 75/80/85/90dBA)
Walker & Chan	1996	S	24	Frequenzspektrum, Lärmpegel, Hintergrund	Hörschwelle für den Lärm durch Vibration, Belästigung	–	50/80Hz (Spec 1/2), 60/65/70/75/78dB (Lin), 55/65dB (Lin)
Yano & Kobayashi	1990	L S St U	148	Lesen bei normalem Tempo, Lärmquelle, Lärmpegel	subjektive Lärmbelästigung	kategorische 7-Punkte-Skala ("gar nicht" bis "unerträglich")	Leq: 70dBA (Referenz zu 20µPa), 50-70dBA, 60-70dBA (gesamt)
Yano, Morihara & Sato	2005	S	780	Lärmquelle, Lärmpegel, Vibrationspegel	generelle Belästigung, Störung bei Aktivität (Zuhören), Schlafstörung	5-Punkte-Skala	Leq, 24h (32-50dBA, 24-78dBA)
Yano, Sato & Morihara	2007	L S St	5092	Lärmpegel, Lärmquelle	Belästigung	5-Punkte-Skala, Punkte-Skala	Ldn (L=45-60dBA, S=30-80dBA, St=50-80dBA)

Referenz	Jahr	Lärmquelle(n)	Stichproben- größe	UV	AV	Operationalisierung AV	Operationalisierung Lärm
Yoshida & Nakamura	1988	S	830	Gebiet Zugstreckenanzahl, Stre- ckenstruktur, Ereignisan- zahl/Tag), Lärmpegel	Gefühl (Belästigung, Ver- stimmung), Sprach- interferenz (TV, Telefon, Konversation), Schlaf (Er- wachen, Einschlafen), Psy- che (Irritation, Denken/ Lesen, Entspannen), phy- sisch (gastroentero-logisch, Ohr, Kopf, Herz)	Fragen über den Störanteil von Lärm (5 Kategorien), Gesundheitsstatus	Ldn (dBA, Geräuschlevel Tag/Nacht)

L = Luft

S = Schiene

St = Straße

U = Umgebung

5.1.1 Belästigung (N=87, -15 fehlen)

Der Abschnitt über lärminduzierte Belästigungsreaktionen widmet sich der inhaltlichen Verdichtung von insgesamt 87 empirischen Veröffentlichungen zu den Auswirkungen von Schienenlärm auf die subjektiv erfasste Belästigung von betroffenen Anwohnern, wobei 15 Untersuchungen nicht näher in eine genauere Beschreibung münden können, da ihre Volltexte nicht verfügbar sind (siehe Tab. 10). Insgesamt handelt es sich dabei um 44 Feldstudien, 20 kontrollierte Laborexperimente, 2 kombinierte Labor- und Feldstudien, 4 statistische Sekundäranalysen und 2 Metaanalysen, die aufgrund ihrer Größe und Aussagekraft trotz Nichterfüllung des vorab determinierten Einschlusskriteriums der „*empirischen Arbeiten*“ in das Review eingeschlossen wurden. Die Feldstudien sind aufgrund fehlender externer Kontrolle konfundierender Variablen und dem ausnahmslosen Querschnittsdesign lediglich deskriptiv angelegt und demnach können kaum Aussagen zu möglichen lärmverursachten gesundheitlichen Langzeitfolgen getroffen werden. Im Groben lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse zu diesem Lärmwirkungsbereich in sechs nachfolgend behandelte Abschnitte unterteilen:

Tab. 10: Empirische Arbeiten zu Belästigung

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Aasvang, Engdahl & Rothschild	2007
Åhrlin	1988
Åhrlin & Rylander	1979
Ali	2005
Andersen, Kühl & Relster	1983
Basner, Elmenhorst, Maas, Müller, Quehl & Vejvoda	2008
Chan & Lam	2008
De Coensel, Botteldooren, Berglund, Nilsson, De Muer & Lercher	2007
De Jong	1979a
Fastl, Kuwano & Namba	1996
Fields	1979
Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Moehler & Mehnert	2000
Hall, Dixit & Taylor	1980
Heininen-Guzejev, Vuorinen, Kaprio, Heikkilä, Mussalo-Rauhamaa & Koskenvuo	2000
Howarth & Griffin	1990
Howarth & Griffin	1990
Izumi	1988
Joncour, Cailhau, Gautier, Champelvoier & Lambert	2000
Kaku, Hiroe, Kuwano & Namba	2004
Kim, Lim, Hong, Jung & Lee	2007
Klæboe, Turunen-Rise, Hårvik & Madshus	2003
Knall & Schümer	1983
Kuhnt u. a.	2008
Kurra, Morimoto & Maekawa	1999
Kurra, Morimoto & Maekawa	1999
Kuwano, Namba & Okamoto	2004
Lam & Au	2008
Lam, Chan, Chan, Au & Hui	2009
Lambert, Champelovier & Vernet	1993
Lambert, Champelovier & Vernet	1996
Lambert, Champelovier & Vernet	1998
Leue, Schütte & Griefahn	2004

Liepert, Moehler, Schreckenberg, Schuemer & Fastl	2005
Liepert, Möhler, Schuemer & Griefahn	1999
Lim, Kim, Hong & Lee	2006
Marks & Griefahn	2007
Marks & Griefahn	2007
Meyer-Baron	2000
Miedema & Van den Berg	1988
Möhler	1985
Möhler, Hegner, Schuemer & Schuemer-Kohrs	1996
Möhler & Knall	1983
Möhler & Liepert	2006
Möhler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000
Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberg, Mehnert & Griefahn	2000
Möhler, Schuemer, Knall & Schuemer-Kohrs	1986
Morihara, Sato & Yano	2004
Niemann u. a.	2006
Öhrström	1997
Öhrström	1997
Öhrström	2007
Öhrström, Andersson, Skanberg & Barregard	2007
Öhrström, Björkman & Rylander	1980
Öhrström, Gunnarson & Ögren	2007
Öhrström, Ögren, Jerson & Gidolf-Gunnarsson	2008
Öhrström & Skanberg	1996
Öhrström, Skanberg, Barregard, Svensson & Ängerheim	2005
Paulsen & Kastka	1995
Planungsbüro Obermeyer	1983
Quehl & Basner	2008
Rylander, Björkman & Åhrlin	1977
Sandrock, Griefahn, Kaczmarek, Hafke, Presi & Gjestland	2008
Sato, Yano, Morihara & Masden	2004
Schreckenberg, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Griefahn & Moehler	1999
Schuemer-Kohrs, Schuemer, Schreckenberg, Griefahn & Moehler	1998
Sörensen & Hammar	1983
Vos	2004
Walker & Chan	1996
Yano & Kobayashi	1990
Yano, Morihara & Sato	2005
Yano, Sato & Morihara	2007
Yoshida & Nakamura	1988

1. Dosis-Wirkungsbeziehungen der Lärmbelastigung als Funktion des Schalldruckpegels
2. Einfluss von Moderatoren auf die Lärmbelastigung
3. Vergleich der Belastigungsreaktionen auf unterschiedliche Verkehrslärmarten (Schiene, Straße, Flug)
4. Verhaltensänderungen
5. Vibration
6. New-Infrastructure Effect

Im Folgenden wird auf diese sechs Unterkategorien durch Zusammenfassung der wesentlichen Studienergebnisse und Vergabe von Evidenzstufen näher eingegangen. Die Evidenzlevel geben ein abschließendes allgemeines Urteil über die Qualität der Aussagesicherheit der Studienergebnisse ebenso wie ein Resümee des Forschungstrends (falls sich ein solcher ergibt) in jedem Abschnitt wieder.

5.1.1.1 Dosis-Wirkungsbeziehungen

Die Fragestellung dieses Abschnitts ist die Frage nach dem Zusammenhang zwischen wachsender Lärmexposition und daraus resultierender zunehmender Belastigung. Neben der Vorstellung der Dosis-Wirkungskurven aus vier großen Synthesen aus einem Pool an Primärstudien beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der Aggregation der weiteren wesentlichen Studienergebnisse in diesem Bereich.

Vorerst unspezifiziert soll der immer wieder empirisch untermauerte Trend der subjektiv erfragten zunehmenden Belastigung als einer Funktion des Lärmpegels hervorgehoben werden. Mehrere Studien stellen in Regressionsanalysen den Zusammenhang zwischen der Geräuschbelastung und der persönlichen Belastigungsreaktion dar. Mit Hilfe dieser Regressionskurven soll eine künftige Vorhersage der erwarteten Belastigung durch differierende Schallpegel möglich gemacht werden. Der Schallpegel wird entweder Lärmkartierungsangaben entnommen, die mit den Adressen der Befragten zu ihrer subjektiv eingeschätzten Belastigung verknüpft werden, oder aber aus der Kombination von feldgebundenen Stichprobenmessungen mit tragbaren Pegelmessern und anschließenden Berechnungsverfahren zur Bestimmung eines Index für die Geräuschbelastung ermittelt. Als Maß für den Schallpegel hat sich der äquivalente Dauerschallpegel über verschiedene Zeitintervalle (Leq_{24h} , Leq_{Tag} , Leq_{Nacht} , L_{DN}) oder aber der Maximalpegel durchgesetzt. Die Belastigungsreaktion wird im Feldsetting in persönlich bzw. telefonisch geführten Interviews bzw. postalisch zugesandten Fragebögen erfasst. Diese Belastigungsreaktion wird schließlich in einer Funktion über dem Schallpegel als Prozentangabe der quantitativen Betroffenheit in der untersuchten Stichprobe (über alle individuellen Daten gemittelter Prozentsatz der „*Highly Annoyed People*“) operationalisiert oder aber in der analogen Abtragung der Skalenpunkte der Ratingskalen zur Belastigung auf der Ordinate (5-, 7- oder 11-stufige ordinale Likert-Skalen) und einer zugehörigen Amplitudenangabe entweder auf individuellem oder einem bereits aggregierten Niveau.

In mehreren groß angelegten Metaanalysen bzw. rechnerischen Synthesen eines ausgewählten Pools an Primärstudien zu Lärmexpositionsfolgen, insbesondere Belastigung (Fidell, Barber und Schultz 1991; Fields und Walker 1982b; Miedema und Vos 1998; Miedema und Vos 2007; Schultz 1978) und Schlaf (Miedema und Vos 2007), haben sich immer wieder signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen bestätigen lassen, die übereinstimmend in Regressionskurven veranschaulicht wurden. Diese Graphiken sollen der Vorhersage der lärminduzierten Belastigungsreaktion aus der gemessenen und berechneten akustischen Geräuschbelastung dienen. Der vorhandene Lärm wird dabei meist durch den äquivalenten Dauerschallpegel gemittelt über variierende Zeitintervalle

operationalisiert. Die wesentliche Schwierigkeit dieses Forschungsansatzes liegt in der Transformation der heterogenen Konstruktoperationalisierungen der einzelnen Studien in einheitliche, vergleichbare Bewertungsmaßstäbe sowohl der abhängigen (Belästigung) als auch der unabhängigen (Lärmpegel) Parameter. Die Verwendung verschiedener Messinstrumente und Berechnungsmethoden für die Geräuschbelastung, wie auch der letztendlich angegebenen Lärmindizes und der Einsatz differierender Skalen und Erhebungsbögen für die abhängigen Variablen (Interviews vs. Fragebögen, Summenscores aus Itemkatalogen vs. singuläre Fragen zur Konstrukterfassung, totale Belästigung vs. (quellen-)spezifische Belästigungsreaktionen, fehlende eindeutige, konsensuelle Begriffsbestimmung der unabhängigen Variablen usw.) macht eine quantitativ zusammengefasste Darstellung mehrerer Studienergebnisse schier unmöglich. Es stellt sich somit nicht nur die Frage nach einer inhaltlich-semanticen Begriffsklärung der Belästigung, sondern vielmehr auch das Problem der quantitativen Darstellung dieses Konstruktes. Im Sinne der Veranschaulichung seien im Folgenden vier dieser zusammenfassenden Arbeiten vorgestellt, insbesondere die graphische Darstellung der Expositions-Wirkungskurven zu Lärm und den daraus resultierenden Belästigungsreaktionen (siehe Tab. 11).

Tab. 11: Metaanalysen zu Lärm und Belästigung

Autoren	Ort	N (Studien)	Quelle	Lärmmaß	Belästigung
Fidell u. a. (1990)	Studien aus Belgien, GB, Kanada, Dänemark, Australien, Schweden, Niederlande, USA	15 zusätzlich zu den Studien von Schultz (1978) mit 453 Datenpunkten	Flug, Straße, Schiene	L_{dn}	% Highly Annoyed
Miedema & Vos (1998)	Synthese aus Fidell (1990) und Schultz (1978)	47 Untersuchungen mit 55 Datensätzen (63.969 Befragte)	Flug, Straße, Schiene	L_{dn}	% Highly Annoyed
Miedema & Vos (2007)	FRA, GER, JPN, UKD, SWE, TRK, SWI, CAN, NET, USA	24 Feldstudien mit 28 Datensätzen	Flug, Straße, Schiene	$L_{night (23-7h)}$	% Highly Sleep disturbed, % sleep disturbed, % a little sleep disturbed
Schultz (1976)	Studien aus Schweden, Schweiz, Frankreich, Deutschland, England	11 mit 161 Datenpunkten	Flug, Straße, Schiene	L_{dn}	% Highly Annoyed (27-29 % der oberen Belästigungsskala)

Zur Vereinheitlichung des Kriteriums „*Highly Annoyed*“ (HA) schlägt Schultz (1978) in seiner Synthese aus 18 Studien aus 9 Ländern vor, die oberen drei einer 11-Punkte Skala, sowie die oberen zwei Kategorien einer 7-Punkte Skala als Einheit für die „hoch belästigten“ zu verwenden. Dies entspricht den oberen 29 % (auf der 7 Punkte Skala) bzw. 27 % (auf der 11 Punkte Skala) auf der Belästigungsskala. Als heuristische Faustregel zählt Schultz demnach all jene Reaktionen als „*Highly annoyed*“ (HA), die auf den oberen 27-29 % der Skala zur Belästigung liegen. Schultz betont, dass ein Vorteil des Fokus auf den Prozentsatz der HA in der verschwindenden Relevanz nicht akustischer Faktoren in Hinsicht auf die auftretende Lärmbelastigung in dieser Subgruppe liege und

dies sowohl für die Individual- als auch die Gruppenebene gelte. Auf der Basis von elf Untersuchungen synthetisiert er schlussendlich eine einzige Kurve zu einer aktuell am besten verfügbaren Schätzung der resultierenden Belästigung, die auf alle Arten von Transportlärm zurückzuführen sind. Sieben Studien konnten nicht in die Synthese integriert werden, da die Datenpunkte zu sehr streuen und nicht in einer Kurve aggregiert werden können. Schultz integriert in seine Synthese Studien aus den Jahren 1961-1974 für die drei Lärmquellen Flug, Straßen- und Schienenverkehr. Die quellspezifische Berichterstattung bleibt aus, so dass mögliche Unterschiede in den Belästigungsreaktionen für die drei Quellen nicht auszumachen sind. Die nachstehenden Abbildungen veranschaulichen die Dosis-Wirkungskurven (siehe Abb. 43 und Abb. 44), die aus diesem Vorgehen resultieren.

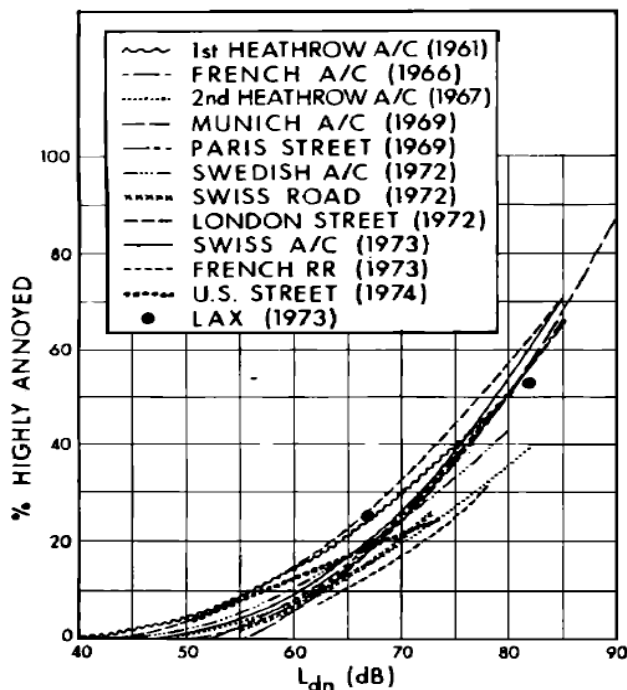


Abb. 43: Dosis-Wirkungskurven nach Schultz für elf Primärstudien (Schultz 1978)

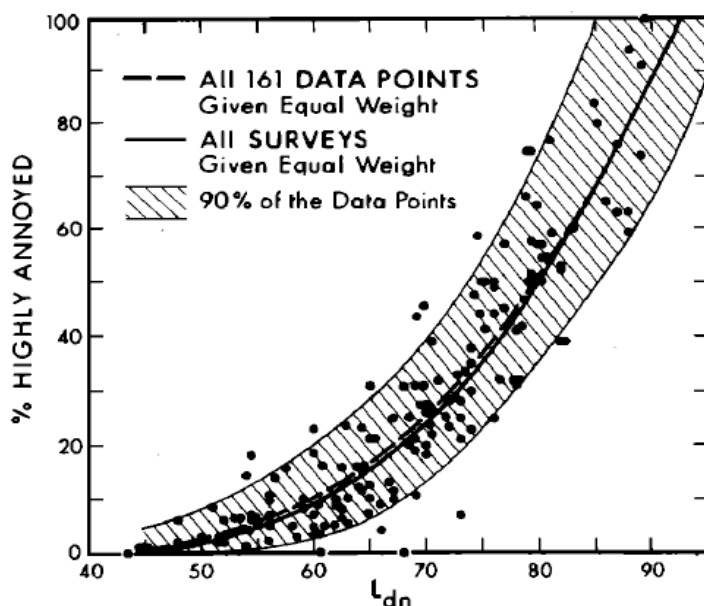


Abb. 44: Aggregierte Dosis-Wirkungskurve nach Schultz für alle Datenpunkte (Schultz 1978)

In der Wiederaufbereitung der Daten von Schultz (1978) und der Integration 15 neuer Arbeiten durch Fidell u. a. (1991) ergibt sich eine von Schultz' Daten abweichende Lärmbelastungskurve über dem Tag-Nachtlärmpegel. Dabei wurden die in der nachstehenden Tab. 12 aufgelisteten Primärarbeiten zu den Daten aus dem Jahr 1978 ergänzt und eine neue Dosis-Wirkungskurve mit insgesamt 453 Datenpunkten über der Geräuschbelastung in L_{dn} aufgetragen. Der Zeitraum der integrierten Studien reichte nun von 1975 bis 1985 und umfasste erneut die drei wesentlichen Verkehrslärmquellen des Flug-, Straßen und Schienenlärms. Die abgetragene Geräuschbelastung reichte auch hier von ca. 30-90 dB(A) und zieht sich über eine Reaktion der *HA* von 0 % bei 30 dB(A) über 30 % bei 70 dB(A) bis hin zu 70 % bei 85 dB(A). Auch in dieser rechnerischen Zusammenfassung werden keine separaten Dosis-Wirkungsverläufe für die einzelnen Lärmquellen zur Verfügung gestellt.

Die Belastungskurve fällt mit einer quadratischen Regressionsgleichung etwas höher aus [etwa 4dB höher bei einem L_{dn} von 57.5 dB(A) und um die 1.5 dB(A) höher bei einem L_{dn} von 70 dB(A)] als in der vorherigen Analyse. Bei 76 dB(A) ist ein Schnittpunkt der beiden aggregierten Kurven zu verzeichnen, bei dem die vor diesem Cross-Over-Wert etwas höhere Belästigungsreaktion aus der neueren Synthese von Fidell u. a. (1991) mit steigendem Pegel nun unter der Kurve von Schultz (1978) bleibt (siehe Abb. 45). Ein wesentlicher Beeinflussungsfaktor der resultierenden Belastungskurven liegt in den differierenden Begriffsbestimmungen des Konstrukts Belästigung bzw. dem Anteil der *HA*. In der älteren Synthese wurden die oberen 27-29 % der Antwortskalen als *HA* festgelegt, wobei in der aktuelleren Version von Fidell die oberen 31.4 % der Antwortalternativen dem Kriterium der *HA* gleich kamen. Dabei kam es bei 45.5 % der Datenpunkte zu einer Unterschätzung der „*High Annoyance*“ um 5 %, während über die Hälfte (54.5 %) der Daten die *HA* um 10.3 % überschätzten. Ein weiteres Problem stellt die lückenhafte Berichterstattung der Lärmmessung dar, die dazu führt, dass eine Einschätzung der Genauigkeit dieser teils gemessenen teils berechneten Werte für den Lärmpegel wage bleibt. Die Anzahl der eingesetzten Mikrophon-Lokalisierungen, die Dauer der Messung, die Kalibration der Messungen und die Homogenität der Exposition der in die Befragung einbezogenen Gebiete stellen relevante Details für eine Abschätzung des Konfidenzintervalls dar, die in der Beschreibung des Messvorganges in den einzelnen Arbeiten oftmals fehlen.

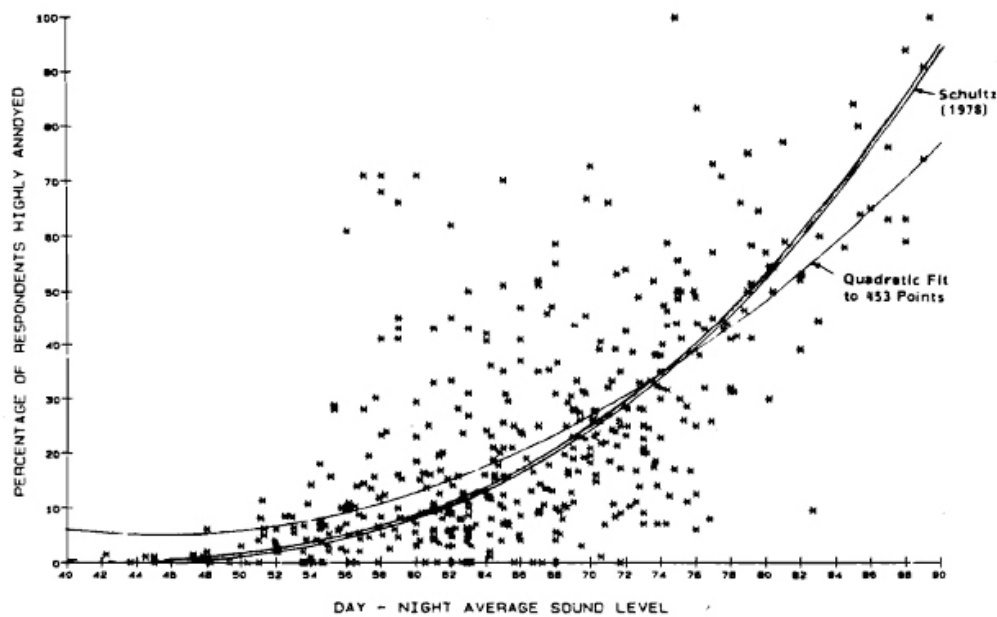


Abb. 45: Vergleich der alten und neuen Regressionskurve aus den erweiterten Daten von Schultz (Fidell, Barber und Schultz 1991)

Tab. 12: Überblick sozialwissenschaftlicher Fragebögen (Fidell, Barber und Schultz 1991)

Mnemonic	Authors(s)	No. of data points
1978 addenda, new surveys:		
(1) U.S. AIRBASE	Borsky, 1985	25
(2) ANTWERP STREET	Myncke <i>et al.</i> , 1977	31
(3) BRUSSELS STREET	Myncke <i>et al.</i> , 1977	23
(4) BURBANK AIRPORT	Fidell <i>et al.</i> , 1985	20
(5) CANADIAN ROAD	Hall and Taylor, 1977	14
(6) DANISH STREET	Relster, 1975	28
(7) BRITISH RAIL	Fields and Walker, 1982	11
(8) AIRCRAFT/ TRAFFIC	Hall <i>et al.</i> , 1977	21
(9) ORANGE COUNTY AIRPORT	Fidell <i>et al.</i> , 1985	12
(10) AUSTRALIAN AIRCRAFT	Hede and Bullen, 1982	42
(11) TRAMWAY/ TRAFFIC	Rylander, 1977	12
(12) DECATUR AIRPORT	Schomer, 1983	4
(13) SWEDISH RAILROAD	Sorensen and Hammar, 1983	15
(14) WESTCHESTER AIRPORT	Fidell <i>et al.</i> , 1985	8
(15) DANISH RAILROAD	Andersen <i>et al.</i> , 1982	26
total:		292

Der Artikel von Miedema und Vos (1998) berücksichtigt einige Kritikpunkte an den Synthesen von Fidell u. a. (1991) sowie Schultz (1991) und erstellt einen neuen Katalog aus insgesamt 55 Primärstudien mit 63.969 Interviewten zu der empfundenen Belästigung auf die drei Hauptverkehrslärmquellen inklusive der Studien aus den zwei eben genannten Arbeiten (siehe Tab. 12). Im Sinne der Qualitätssicherung aufgrund einer homogenen und damit besser vergleichbareren Datengrundlage legten die Autoren drei Einschlusskriterien für den Einbezug der Datensets in die Metaanalyse fest:

- a. Der DNL (Day-Night-Level, Messung und Berechnung) wie auch der Prozentsatz der *HA* sind quellenspezifisch angegeben.
- b. % *HA* ist direkt erfasst aus der Antwort zur allgemeinen Lärmbelästigung von der entsprechend betroffenen Lärmquelle.
- c. % *HA* wird aus einem Cut-Off abgeleitet der genügend nah an 72 liegt auf einer Skala von 0 (keine Belästigung) bis 100 (sehr hohe Belästigung).

Zusammenfassend kann für die Metaanalyse von Miedema und Vos (1998) festgehalten werden, dass der %HA bei einer Geräuschbelastung unter 40-45 dB bei 0 liegt und sich dann monoton steigend verhält als eine Funktion des DNL (Day-Night-Level). Es wurden differierende Funktionen für die drei berichteten Lärmquellen gefunden, wobei die Steigung der Belästigung für Fluglärm höher ist als die für Straßenlärm, gefolgt von Schienenlärm mit der geringsten Steigung (siehe Abb. 46). Unterschiede zwischen den quellenspezifischen Belästigungsreaktionen wurden durch Datenmaterial belegt, welches zum Einen alle Studien kombiniert betrachtete und zum Anderen einen Fokus auf lediglich jene Arbeiten legte, in denen die Befragten nur zwei Quellen beurteilen mussten. Die Variation in den Kurven der % HA als eine Funktion des DNL ist für die verschiedenen Studien unterschiedlich groß, am auffälligsten jedoch für Straßenlärm, am wenigsten schwankend für den Schienenlärm.

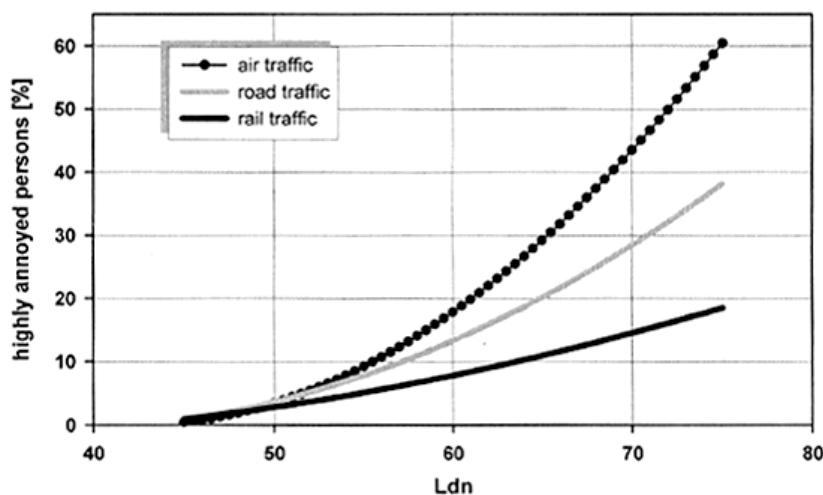


Abb. 46: Dosis-Wirkungskurven für die drei Hauptverkehrslärmquellen (Miedema und Vos, 1998)

Tab. 13: Primärstudien der Metaanalyse (Miedema und Vos 1998)

Fields' code	Name of the survey	Number of respondents (for this source)
Aircraft		
AUL-210	Australian Five Airport Survey (1980)	3288
CAN-168	Canadian National Community Noise Survey (1979)	631
FRA-016	French Four-Airport Noise Study (1965)	2000
FRA-239	French Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	565
NET-240	Schiphol Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	573
NOR-311	Oslo Airport Survey (1989)	1548
NOR-328	Bodo Military Aircraft Exercise Study (1991 – 1992)	702
NOR-366	Vaernes Military Aircraft Exercise Study (1990 – 1991)	391
SWE-035	Scandinavian Nine-Airport Noise Study (1969, 1970, 71, 72, 74, 76)	1662
SWI-053	Swiss Three-City Noise Survey (1971)	3934
UKD-024	Heathrow Aircraft Noise Survey (1967)	4515
UKD-242	Heathrow Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1982)	1993
UKD-238	Glasgow Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	598
USA-022	U.S.A. Four-Airport Survey (phase I of Tracor Survey) (1967)	3499
USA-032	U.S.A. Three-Airport Survey (phase II of Tracor Survey) (1969)	2828
USA-044	U.S.A. Small City Airports (small City Tracor Survey) (1970)	1954
USA-082	LAX Airport Noise Study (1973)	702
USA-203	Burbank Aircraft Noise Change Study (1979)	924
USA-204	John Wayne Airport Operation Study (1981)	1033
USA-338	U.S.A. 7-Air Force Base Study (1981)	874
	Total Aircraft (20 datasets)	34214
Road Traffic		
CAN-120	Western Ontario University Traffic Noise Survey (1975)	1149
CAN-121	Southern Ontario Community Survey (1975/1976)	1304
CAN-168	Canadian National Community Noise Survey (1979)	568
BEL-122	Antwerp Traffic Noise Survey (1975)	896
BEL-137	Brussels Traffic Noise Survey (1976)	297
FRA-092	French Ten-City Traffic Noise Survey (1973/1975)	975
FRA-239	French Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	524
FRA-364	French 18-site Time of Day Study (1993/1994)	895
GER-192	German Road/Railway Noise Comparison Study (1978/1981)	1649
GER-372	Ratingen-Dusseldorf Road Traffic/Aircraft Survey (1985/1986)	559
GER-373	Ratingen Road Traffic/Aircraft Study (1987)	440
NET-106	Dordrecht Home Sound Insulation Study (1974)	420
NET-240	Schiphol Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	473
NET-258	Amsterdam Home Sound Insulation Study (1975)	365
NET-276	Netherlands Tram and Road Traffic Noise Survey (1993)	697
NET-361	Netherlands Environmental Pollution Annoyance Survey (1983)	880
NET-362	Amhem Road Traffic Study (1984)	293
SWE-142	Stockholm, Visby, Gothenburg Traffic Noise Study (1976)	811
SWE-165	Gothenburg Tramway Noise Survey (1976)	464
SWI-053	Swiss Three-City Noise Survey (1971)	945
SWI-173	Zurich Time-of Day Survey (1978)	1371
UKD-071	B.R.S. London Traffic Noise Survey (1972)	2903
UKD-072	English Road Traffic Survey (1972)	1043
UKD-157	London Area Panel Survey (1977/1978)	364
UKD-242	Heathrow Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1982)	410
UKD-238	Glasgow Combined Aircraft/Road Traffic Survey (1984)	536
	Total Road Traffic (26 datasets)	21228

Railway

FRA-063	Paris Area Railway Noise Survey (1972)	334
GER-192	German Road/Railway Noise Comparison Study (1978/1981)	1648
NET-153	Netherlands Railway Noise Survey (1977)	671
NET-276	Netherlands Tram and Road Traffic Noise Survey (1983)	265
NET-361	Netherlands Environmental Pollution Annoyance Survey (1993)	71
SWE-165	Gothenburg Tramway Noise Survey (1976)	464
SWE-228	Swedish Railway Study (1978 – 1980)	856
SWE-365	Swedish 15-site Railway Study (1992 – 1993)	2833
UKD-116	British National Railway Noise Survey (1975/1976)	1385
	Total Railway (9 datasets)	8527

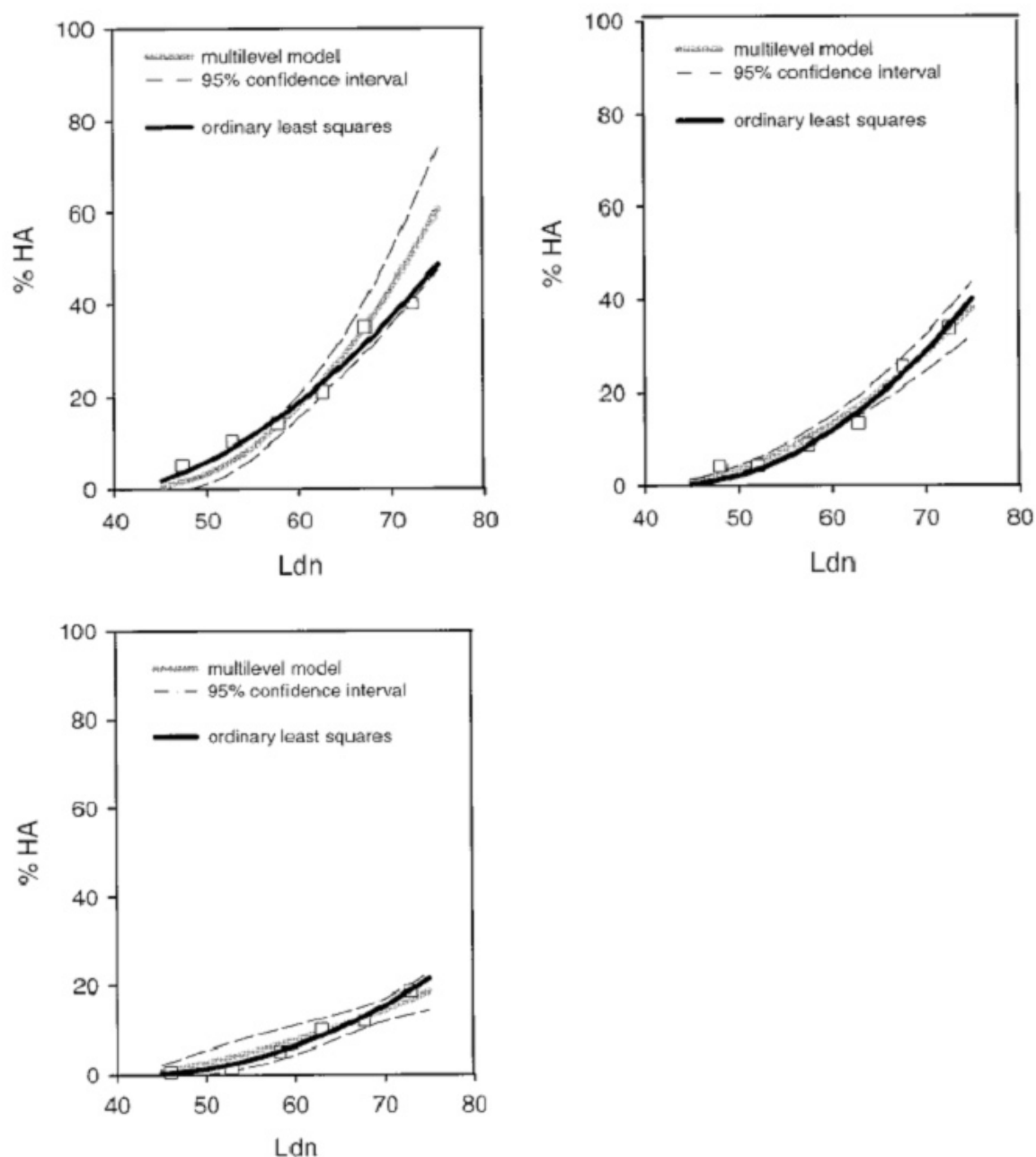


Abb. 47: Synthetisierte quellenspezifische Dosis-Wirkungskurven (Miedema und Vos 1998)

Die divergierenden Kurvenverläufe in den besprochenen Synthesen lassen sich durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren erklären. Daher muss festgehalten werden, dass eine allgemeingültige und präzise Vorhersage der Lärmbelastung aus der individuellen Geräuschbelastung in einem quantitativen Maß (z.B. der Regressionsanalyse in einer Metaanalyse) nicht gewährleistet werden kann, da die Mehrzahl relevanter Einflussgrößen nie vollständig bekannt sein wird. Von daher kann es lediglich zu Schätzungen der Belastungsreaktion unter Berücksichtigung der Fehleranfälligkeit des folgenden moderierenden Faktorenpools kommen (hier sei auch auf den Abschnitt der allgemeinen Methodenkritik verwiesen):

- Messung und Berechnung der Lärmbelastung
- Transformation in ein einheitliches Pegelmaß (L_{dn} , L_{eq})
- Transformation in eine einheitliche Belastungskategorie aus divergierenden sozialen Fragebögen und Erhebungsmethoden
- Fehlender Einbezug nicht akustischer Faktoren (z.B. Distanz zur Lärmquelle) und persönlicher Faktoren (z.B. Lärmempfindlichkeit)

Im Weiteren wird nun auf die übrigen Studien eingegangen, die Aussagen über Dosis-Wirkungsbeziehungen zum Zusammenhang von Lärmexposition durch Schienenverkehr und Belastungsempfinden machen. In diesem Rahmen wurden 44 Arbeiten (von den oben aufgeführten wird in dieser Tabelle nur die Arbeit von Miedema und Vos (1998) dargestellt) ausfindig gemacht (siehe Tab. 14).

Tab. 14: Studien zum Dosis-Wirkungszusammenhang Schienenlärm und Belastigung

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>	<i>N</i>	<i>Lärmquelle(n)</i>	<i>Pegel (X-Achse)</i>	<i>Belastigung (Y-Achse)</i>
Aasvang, Engdahl & Rothschild	2007	307	Schiene	$L_{max} = 23 - 45(dBA)$	5 Punkte Skala → aufgetragen: Summe der slightly + moderately + very + extremely vs. Moderately + very + extremely annoyed
Åhrlin	1988	685	Schiene, Flug, Straße	Anzahl der Lärmereignisse 50 bis >200	? Skala ? → aufgetragen: % der HA (Highly Annoyed)
Ali	2004	714	Schiene	$L_{dn} = 82.7 - 93.7 (dBA)$	Skala? → aufgetragen: % der HA
Andersen, Kühl & Relster	1982/1986	615	Schiene	$L_{eq,24h} = 50, 55, 60, 65 (dBA)$	Ordinale 3 Punkte Skala → aufgetragen: % der stark belästigten, stark + etwas belästigten, belästigten
De Coensel u. a.	2007	100	Schiene, Straßen-Referenzwert	$L_{eq,10min} = 38 - 80 (dBA)$	Master scaled units (100 Punkte) → aufgetragen: Analoge 100 Punkte Skala
Fields	1979	1453	Schiene	L_{max} während Zugvorbeifahrt, $L_{eq,24h} - 30 - 80 (dBA)$, L_{dn}	ordinale 11 Punkte Skala → aufgetragen: Analoge 11 Punkte Skala

Howarth & Griffin	1990	30	Schiene (Lärm vs. Vibration)	$L_{eq,24s} = 59, 64, 69, 74, 79, 84$ (dBA)	7 Punkte Skala → aufgetragen: 7 Punkte in Abhängigkeit von der Vibration
Howarth & Griffin	1990	24	Schiene (Lärm vs. Vibration)	$L_{eq,24s} = 59, 64, 69, 74, 79, 84$ (dBA)	Referenzangabe zu einem Bsp. Stimuli, der mit 100 bewertet wurde → aufgetragen 0-300 in Abhängigkeit von Vibration
Izumi	1988	211	Schiene, Straße	$L_{eq,24h} = 45-65$ (dBA)	10 Punkte Skala → aufgetragen: 10 Punkte in Abhängigkeit von verschiedenen lautem Hintergrundlärm (Straße)
Joncour u. a.	2000	700	Schiene, Straße, Flug, Industrie, andere Anwohner	$L_{eq,24h}$ (kontinuierlicher Pegel)	10 Punkte Skala → aufgetragen: ??
Kaku, Hiroe, Kuwano & Namba	2004	12	Straße, Schiene		
Kim, Lim, Hong, Jung & Lee	2007	377	Straße, Schiene, Flug	$L_{eq,7h} = 40 - 88$ (dBA)	10 Punkte Skala → aufgetragen: 10 Punkte für SCHL
Knall & Schümer	1983	1080	Schiene, Straße	$L_{eq,day}, L_{eq,night}$ (Zeiten?) - 50 vs. 70 (dBA)	??
Kuhnt u. a.	2008		Schiene, Straße	$L_{eq,7h} = 34, 46, 64$ (dBA)	verbale 5 Punkte Skala mit je 10 Untereinheiten (0-50 Score) → aufgetragen: Analoge 5 Punkte Skala
Kurra, Morimoto & Mae-kawa	1999	64	Flug, Straße, Schiene	$L_{eq,7h} = 30, 35, 40, 45, 50, 55$ (dBA)	7 Punkte Skala → aufgetragen: 7 Punkte
Kurra, Morimoto & Mae-kawa	1999	64	Flug, Straße, Schiene	$L_{eq,7h} = 30, 35, 40, 45, 50, 55$ dB(A)	7 Punkte Skala → aufgetragen: %HA für gemittelten Leq Wert der 3 Lärmquellen
Kuwano, Namba, & Okamoto	2004	E1: 12 / E2/3: 20	Schiene	E1: L_{eq} (55, 60, 65, 70, 75dB) / E2/3: L_{eqN} (45 - 70 dBA) + C (25 - 65 dBA) [kombiniert]	E1/2: 7 Kategorien: "sehr leise" bis "sehr belästigend" / E3: 5 Kategorien: "nicht gestört" bis "sehr gestört" → aufgetragen:
Lam, Chan, Chan, Au & Hui	2009	597	Schiene, Straße	$L_{eq,7h} = 40 - 75$ (dBA)	7 Punkte Skala → aufgetragen: 7 Punkte für den gemittelten Leq Wert beider Lärmquellen
Lambert, Champelovier & Vernet	1995	260	Schiene	$L_{eq,24h} = 40 - 55$ (dBA)	? Skala ? → aufgetragen: % der HA für Sommer, morgens u abends

Lambert, Champelovier & Vernet	1998		Schiene, Straße	$L_{eq,day} = < 54, 54-57, 57-60, 60-67, > 67$ (dBA)	? Skala ? → aufgetragen: % der HA
Leue, Schütte & Griefahn	2004	72	Schiene, Straße	$L_{eq} = 40 - 82$ (dBA)	5 Punkte Skala mit je 10 Untereinheiten (Score von 0-50) → aufgetragen: keine Kurve, Studienbeschreibung!
Lim, Kim, Hong & Lee	2006	724	Schiene	$L_{dn} = 52 - 76$ (dBA)	11 Punkte Skala → aufgetragen: % der HA (Unit 8-10)
Marks & Griefahn	2007	163	Straße, Schiene	L_{eq} in 11 Belastungsstufen von 35 - 80 (dBA)	standardisierter FB → ?? Aufgetragen: ?? Keine Kurve, Studienbericht
Miedema & van den Berg	1988	685	Tram, Straße	$L_{eq,24h} = 45-70$ (dBA)	5 Punkte Skala → % der HA (Unit 5) für unterschiedliche Begebenheiten der Tramstrecke
Miedema & Vos	1998	63969 aus 47 Primärstudien (9 davon zu SchL)	Schiene, Straße, Flug	DNL auf der Basis von L_{eq}	verschiedene Skalen aus den Studien → % der HA
Moehler & Knall	1983	150	Schiene, Straße	$L_{eq,24h}$ $L_{eq,day}$ (6-22h) = 55 – 70 (dBA) $L_{eq,night}$ (22-6h) = 47 – 69 (dBA)	5 Punkte Skala → aufgetragen: 5 Punkte
Moehler & Liepert	??	479	Straße, Schiene	$L_{eq,24h}$ $L_{eq,day}$ (6-22h) = $L_{eq,night}$ (22-6h) =	10 Punkte Skala → aufgetragen: 10 Punkte
Moehler u. a.	2000	1600	Schiene, Straße		gleiche Studie wie Möhler & Liepert
Morihara, Sato & Yano	2004	1741	Straße, Schiene	$L_{eq,24h}$ → STL=50 - 76 (dBA), SCHL= 30 - 80 (dBA)	4 Punkte Skala → aufgetragen: % der HA (Skalenspunkt 4)
Öhrström	1997	FB1=2,883; FB2 = 333	Schiene	$L_{max} = 5$ Kategorien (71-75, 76-80, 81-85, 86-90, >90 (dBA))	5 Punkte Skala → aufgetragen: % der HA (Unit)
Öhrström, Andersson, Skanberg & Barregard	2007	1953	Schiene, Straße	$L_{eq,24h} = 45-72$, $L_{dn} = 49-79$ (dBA)	5 Punkte Skala → aufgetragen: % der Belästigten (Unit 2-4)
Öhrström u. a.	1980	1953	Schiene, Straße	$L_{eq,24h}$ ($L_{eq,24h,tot} = 45-50, 51-55, 56-60, 61-70$ (dBA))	5 Punkte Skalen für Belästigung, & Häufigkeit (Summenscore aus Häufigkeit u Ausmaß v 0-6) → "gestört" waren jene mit einem Score ≥ 4 --> aufgetragen: Kumulativer Anteil der 5 Belästigungskategorien (0 - 1)

Öhrström u. a.	2007	1953	Schiene, Straße, Flug	$L_{eq,24h} = 45 - 70$ (dBA)	5 Punkte Skala → aufgetragen: kumulativer Anteil (0-1) der 5 Belästigungskategorien
Paulsen & Kastka	1994	16	Tram, Hammermill	$L_{eq,7h} = 30 - 60$ (dBA)	10 Punkte Skala → aufgetragen: 10 Punkte von 0-9
Sandrock u. a.	2007	N1=22 N2=60	Tram, Bus, truck	$L_{eq,7h}$ (dBA) = 43.6 - 9, -6, -3, +3, +6, +9 (dBA) drauf	10 Punkte Skala (1-10) → aufgetragen: 10 Punkte
Sato u. a.	2004	397-490	Schiene	$L_{eq,24h} = 4$ Kategorien: 45-50, 50-55, 55-60, 60-65 (dBA)	4 u 5 Punkte Skala → aufgetragen: % der HA (nur oberste oder oberste 2 Kategorien)
Schreckenberg u. a.	1999	492-592/Gebiet, zu Beginn: 1600	Schiene, Straße	$L_{eq,7h} \rightarrow 4$ Klassen à 5: Mittel 52.5, 57.5, 62.5, 67.5 (dBA)]	5 Punkte Skala → aufgetragen: keine Kurve, Studienbericht
Sörensen & Hammar	1983	50-100/Gebiet	Schiene, (Luft)	$L_{eq,24h} = 51 - 75$ (dBA) $L_{max} = 71 - 92$ (dBA)	? Skala ? → aufgetragen: % der HA
Vos	2004	12	Schiene	$L_{eq,7h} = 65 - 90$ (dBA)	9 Punkte Skala → aufgetragen: 9 Punkte (von 1-9) für verschiedene Zugarten
Walker & Chan	1995	24	Untergrund Schiene	$L_{in,7h} = 60, 65, 70, 75, 78$ (dBA)	11 Punkte Skala → aufgetragen: 11 Punkte (von 0-10)
Yano & Kobayashi	1990	148 [(1) 48, (2) 50, (3) 50]	Alltag, Schiene, Luft, Straße	$L_{eq,7h} = 50, 60, 70$ (dBA)	7 Punkte Skala → aufgetragen: 7 Punkte

Die Arbeiten unterscheiden sich sowohl in Stichprobengröße, untersuchter Lärmquelle und erfasstem Geräuschpegelrange als auch in der Erhebung der Belästigungsreaktion und abgebildeten Einheit in der funktionalen Darstellung der Reaktion in der Regressionskurve. In Abhängigkeit von diesen Unterschiedlichkeiten wie auch der variierenden Berücksichtigung möglicherweise moderierender Kontrollvariablen (siehe auch folgender Abschnitt 2. Moderatoren) durch Einbezug in eine z.B. hierarchische Regressionsanalyse, können die Kurvenverläufe unterschiedlich stark divergieren. Die Geräuschbelastung wurde entweder in $L_{eq,24h}$ (oder anderen Zeitintervallen) L_{dn} oder L_{max} erfasst; die Belästigungsreaktion dagegen wurde in Fragebögen durch verbale Aussagen mit numerischen Referenzwerten (für statistische Zwecke) oder numerische 5, 7, 9, 10 oder 11 Punkte Skalen operationalisiert. Am Ende wurde die subjektive Reaktion durch einen Summenindex mehrerer Items zu Belästigung oder aber einem singulären Score auf der jeweiligen Skala als Antwort auf eine Belästigungsfrage („Thinking about the last 12 months or so, when you are here at home, how much does noise from (source) bother, disturb or annoy you?“ Alternatives: „not at all“, „slightly“, „moderately“, „very“ and „extremely“) dargestellt. Die Darstellung in der Regressionskurve bestimmte sich entweder durch eine Prozentangabe der „(Highly) Annoyed People“ oder dem direkten Auftrag der analogen Punkteskala.

Dosis-Wirkungsbeziehungen, die durch den Regressionsanteil des Schienenverkehrslärms in der allgemeinen und nächtlichen Belästigung ausgedrückt werden, sind in mehreren Untersuchungen auf Signifikanzniveau bestätigt worden; das heißt mit steigendem Maximal- (Aasvang, Engdahl und Rothschild 1981; Ahrlin 1988; Öhrström 1997b) oder äquivalentem Dauerschallpegel (Ali 2005; Andersen, Kuhl und Relster 1988;

Fields 1979; Izumi 1988; Kaku u. a. 2004; Kim u. a. 2007; Knall und Schuemer 1983; Kuhnt u. a. 2008; Kurra, Morimoto und Maekawa 1999a; Kuwano, Namba und Okamoto 2004; Lam u. a. 2009; Leue, Schütte und Griefahn 2004; Lim u. a. 2006; Miedema und van den Berg 1988; Miedema und Vos 1998; Moehler und Knall 1983; Moehler, Liepert, Schuemer und Griefahn 2000; Öhrström u. a. 2007; Öhrström u. a. 2007; Öhrström u. a. 2005; Sandrock u. a. 2008; Schreckenbergh u. a. 1999; Vos 2004; Walker und Chan 1996; Öhrström, Björkman und Rylander 1980) steigt auch die subjektiv erfragte Belästigung. Ein Beispiel seien die geschätzten Dosis-Wirkungskurven für Schienen- im Vergleich mit Straßenverkehrslärm von Öhrström u. a. (2007) (siehe Abb. 48).

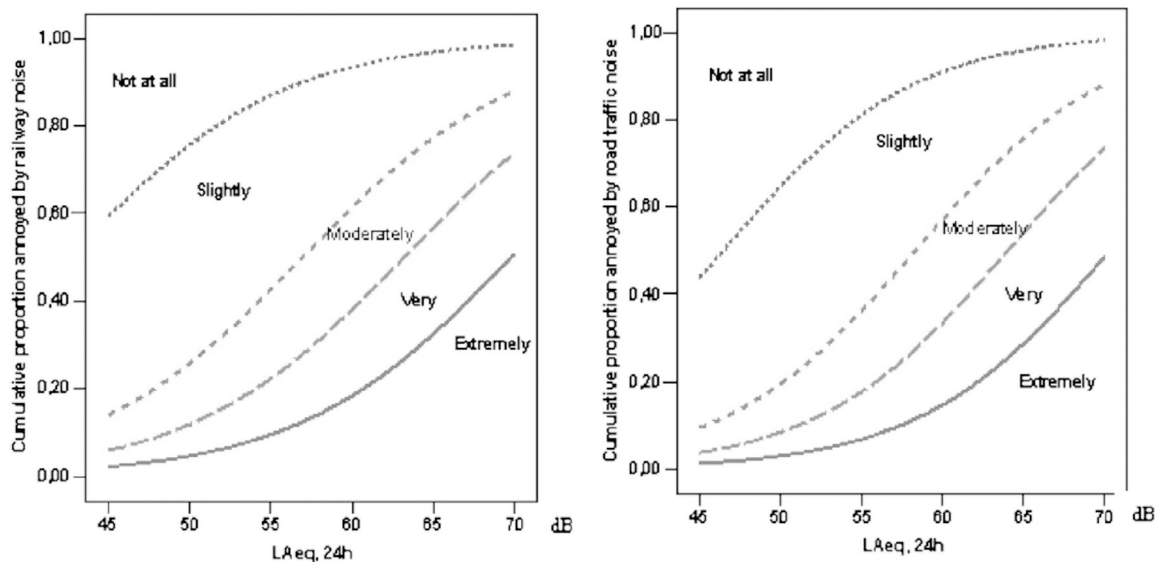


Abb. 48: Geschätzte Dosis-Wirkungskurven von Schienenlärm und Straßenlärm (Öhrström u. a. 2007)

In einer experimentell simulierten Feldstudie von De Coensel u. a. (2007) z.B. erklärt der Lärmpegel als einzige Kriteriumsvariable 80 % der Varianz in der Belästigungsreaktion auf Schienenlärm.

Wird der totale Geräuschpegel (Schienen- und Straßenlärm zusammen), der durch den Summenindex mehrerer Lärmquellen berechnet werden kann, berücksichtigt, korreliert dieser schwach mit der totalen Belästigung (Izumi 1988). Auf die Unterschiede in den Belästigungsreaktionen in Anbetracht berechneter Schallpegel aus singulären oder kombinierten (der totalen bzw. einer dominanten gepaart mit einer simultan vorherrschenden aber weniger lauten) Lärmquellen wird in dem Abschnitt über den Vergleich verschiedener Lärmquellen bezüglich der Belästigung noch näher eingegangen. Die Schallpegel, die in den Studien als Referenz für die Funktion der Belästigung über der Geräuschbelastung verwendet werden, erstrecken sich über differierende Pegelbandbreiten (siehe auch Tab. 14):

L_{dn}	= von min. 49 bis max. 93.7 dB(A)
$L_{eq,24h}$	= von min. 30 bis max. 84 dB(A)
$L_{eq,7h}$	= von min. 30 bis max. 88 dB(A)
L_{max}	= von min. 23 bis max. 90 dB(A)
$L_{eq,day}$	= von min. 55 bis max. 70 dB(A)
$L_{eq,night}$	= von min. 47 bis max. 69 dB(A)

Es gab aber auch Ergebnisse in widersprechende/abweichende Richtungen: In einer Untersuchung von Joncour u. a. (2000) zeigte sich, dass der äquivalente Dauerschallpegel während der Nacht in keiner Beziehung zu den Belästigungsangaben zu Schienenlärm steht. Yano und Kobayashi (1990) konnten ebenso keinen Effekt des Lärmpegels ($L_{eq} = 60-70$ dBA) auf die Belästigung gegenüber Flug- oder Schienenlärm bestätigen.

Den Forschungsbefunden in diesem Abschnitt zu Belästigung wird die *Evidenzstufe 1* (+++) vergeben, da auf einem qualitativ hochwertigen Niveau (sekundärstatistische Nachweise) der überwiegend einheitliche Trend einer positiven Dosis-Wirkungsbeziehung durch 44 Studien abgebildet werden konnte.

5.1.1.2 Moderatoren

Im folgenden Abschnitt sollen Studienergebnisse zu möglichen moderierenden Einflüssen der unter a) bis e) aufgeführten Variablen im Zusammenhang mit schienenlärminduzierter Belästigung präsentiert werden. Die folgende fünf-stufige Unterteilung wurde durch inhaltliche Gruppierung der untersuchten Moderatorvariablen gebildet.

a) Demographische Variablen:

- Alter
- Geschlecht
- Bildung
- Sozioökonomischer Status (SOS)
- Einkommen
- Stadt/Land
- Familiengröße
- Wohndauer
- Familienstand
- Hausbesitzer

b) Persönliche Faktoren:

- Lärmempfindlichkeit
- wahrgenommene Lautheit
- Einstellungen gegenüber der Lärmquelle (z.B. als Transportmittel)
- Gebrauch des Transportmittels
- Qualität der Wohnumgebung/Nachbarschaft (Zufriedenheit)
- Hörschwellen
- Kontrollwahrnehmung
- Angst (Bewertung des Verkehrsmittels als gefährlich)

c) Akustische Faktoren:

Spitzenpegel, Dauerschallpegel
Geschwindigkeit des Zuges
Anzahl der Züge
Expositionsdauer
Zugart (Passagier-, Güter-, Schnellzug)
Frequenzbereich
Lärm-Ruhe-Intervalle
Anstiegszeiten
Distanz zum Gleis
Isolierte Fenster (j/n)
Position des Schlafzimmers
Art des Hauses (Stein/Holz/Fachwerk)

d) Nicht akustische Faktoren:

Tageszeit
Jahreszeit
Beschäftigung während der Schallbelastung,
Umgebungsfaktoren (meteorologische Umstände)

Obwohl in vielen Studien zwar angegeben wurde, dass mehrere Kontrollvariablen in die Erhebung eingingen (vor allem standardisierte demographische Angaben der Studienteilnehmer/innen), fällt die Berichterstattung über deren Einfluss bezüglich der Hauptfragestellung leider oft unzureichend aus. Bisweilen bleiben sie in der Ergebnisdarstellung häufig vollkommen unerwähnt. In der unmittelbar anschließenden Darstellung werden lediglich jene Referenzen erwähnt, die auch konkrete Aussagen zu den untersuchten Effekten der Moderatorvariablen in ihrer Wirkung auf die Belästigungsreaktion machen.

a) Demographische Variablen

In der Mehrzahl der Studien, in denen Angaben zu demographischen Daten gemacht werden, gibt es keine signifikanten Ergebnisse bezüglich eines Moderatoreffekts dieser Parameter in der Beziehung zwischen Schienenlärm und Belästigung. Ein negativer Zusammenhang zwischen Belästigung aufgrund von Schienenlärm wurde für das Alter gefunden (Fields 1979; Aasvang, Engdahl und Rothschild 1981), keine Effekte zwischen Alter und Belästigung berichten Miedema und van den Berg (1988), wobei Miedema und Vos (1998) feststellen, dass der Effekt des Alters vom Lärmpegel abhängt (kurvenliniar). Dabei zeigt sich, dass relativ alte, aber auch relativ junge Anwohner weniger belästigt sind als die mittlere Alterskategorie. Geschlecht, Einkommen, Bildung, sozioökonomischer Status und auch die binäre Kodierung des Wohngebiets in Stadt und Land erweisen sich zumeist als nicht relevante Einflussfaktoren (Aasvang, Engdahl und Rothschild 1981; Fields 1979; Miedema und Vos 1998; Miedema und van den Berg 1988; Moehler 1986; Öhrström, Björkman und Rylander 1980; Kuhnt u. a. 2008). Knall und Schümer (1983) finden einen Haupteffekt des Wohngebiets, der sich darin äußert, dass die Lästigkeitsdifferenz zwischen Straßen- und Schienenlärm in städtischen Gebieten größer ist als in ländlichen Gebieten. Leue u. a. (2004) entdecken einen Interaktionseffekt des Geschlechts mit dem Lärmpegel in Bezug auf die empfundene Belästigung insofern,

als dass sich bei geringen Schallpegeln Männer stärker belästigt fühlen, bei hohen Pegeln sind hingegen Frauen mehr verärgert. In anderen Studien (z.B. De Coensel u. a. 2007; Kurra, Morimoto und Maekawa 1999a; Kurra, Morimoto und Maekawa 1999b; Moehler 1986) werden demographische Variablen zwar erhoben, deren Zusammenhang zur Belästigungsreaktion jedoch nicht näher berichtet. Miedema und Vos (1998) berichten zusätzlich in ihrer Synthese mehrerer Primärstudien, dass der Einfluss von Bildung durch den Alterseffekt gemindert wird, wobei Probanden mit höherer Bildung auch angeben mehr belästigt zu sein. Der Arbeitsstatus hat beinahe keinen Einfluss auf Belästigungswerte. Weiterhin tendieren Singles zu einem geringeren und Hausbesitzer zu einem höheren Belästigungsempfinden. Nach Fields (1979) spielt die Größe des Haushalts keine Rolle.

b) Persönliche Faktoren

Eine der am besten untersuchten und auch theoretisch in Lärmwirkungsmodelle eingeflochtenen persönlichen Faktoren ist die Lärmempfindlichkeit (LEM). Mit diesem Konstrukt ist die zumeist subjektiv in Fragebögen erfasste individuelle Wahrnehmung und die daraus resultierende gesteigerte Empfindsamkeit gegenüber Lärm gemeint. Medizinisch wird dies unter den Begriff Hyperakusis (gr. *hyper* über, *akuo* ich höre) gefasst, unter dem eine krankhafte Empfindlichkeit gegenüber Schall, der normalerweise noch nicht als unangenehm laut empfunden wird, bezeichnet wird. Normalerweise unterscheidet das menschliche Gehirn wichtige von unwichtigen Geräuschen und blendet letztere aus. Bei Menschen mit Hyperakusis scheint dieser Mechanismus nicht zu funktionieren. Diese individuelle Lärmempfindlichkeit kann unabhängig vom Schallpegel zwischen verschiedenen Personen je nach subjektiver Konstitution variieren. Heinonen-Guzejev u. a. (2000) stellen in ihrer Untersuchung fest, dass lärmempfindliche Probanden signifikant mehr über Lärmexposition berichten [($p < .001$) $\rightarrow$ 38.2 % der Lärmempfindlichen vs. 25.5 % der Nichtempfindlichen berichten über Lärm]. Lärmempfindliche Studienteilnehmer berichten Straßen- und Fluglärm außerhalb der Lärmkartierungsgebiete zweimal so oft (bei Schiene noch mehr) wie nicht empfindliche Teilnehmer. Lärmkartierungsinformationen und Lärmempfindlichkeit sind beide unabhängige signifikante Prädiktoren für den subjektiven Lärmbericht bei Fluglärm. Für Schienenlärm ist nur die Lärmkartierungsinformation signifikanter Prädiktor ($p < .04$) für den Lärmbericht, beim Straßenverkehrslärm nur Lärmempfindlichkeit ($p < 0.04$). In der logistischen Regression des Lärmberichts auf die Lärmkartierungsinfo und die Lärmempfindlichkeit über alle drei Quellen verringern sich die Odds Ratios für die zwei Prädiktorvariablen, wenn Alter, Geschlecht, SOS, Hörvermögen, Wohndauer und der Blutdruck als Kontrollvariablen mit aufgenommen werden. Dies bedeutet, dass jene Faktoren einen moderierenden Einfluss auf die Beziehung zwischen den zwei Prädiktorvariablen und der erfassten Lärmberichterstattung (im Sinne von Belästigung) haben. Weitere Studien (Lam u. a. 2009; Leue, Schütte und Griefahn 2004; Miedema und Vos 1998; Sandrock u. a. 2008) bestätigen ebenso positive Korrelationen zwischen der Lärmempfindlichkeit und lärminduzierter Belästigung.

Marks und Griefahn (2007a) finden heraus, dass die Lärmempfindlichkeit besonders beim Wohnen und Schlafen, nicht aber beim Arbeiten als signifikante Prädiktorvariable für lärminduzierte Belästigung steht. Keine (Aasvang, Engdahl und Rothschild 1981; Öhrström, Björkman und Rylander 1980) oder geringe Auswirkungen der LEM können in Meyer-Barons (2000) Untersuchung auf subjektive Gestörtheitsurteile (Gestörtheit am Tag, Störung der Kommunikation, Störung der Entspannung/Konzentration, Störung von Aktivitäten draußen, Belästigung durch Schienenverkehrslärm) festgestellt werden.

Folgende weitere persönlich relevante Einflussgrößen ergeben sich aus einzelnen Untersuchungen. Die subjektive Einstellung gegenüber dem Zug als Transportmittel weist einen negativen Zusammenhang zur berichteten Belästigung auf (Lam und Au 2008; Lam u. a. 2009); diesen Befund bestätigt Fields (1979) allerdings nicht. Für die Zufriedenheit

mit vorgenommenen Lärmschutzmaßnahmen (Chan und Lam 2008; Lambert, Champelovier und Vernet 1996) und der Wohnumgebung (Lam u. a. 2009; Lam und Au 2008), sowie für die subjektive Kontrollwahrnehmung über Lärm (Fields 1979; Meyer-Baron 2000) werden negative Zusammenhänge mit der Belästigungsreaktion gefunden. Die wahrgenommene Lautheit (Lam u. a. 2009; Lam und Au 2008; Marks und Griefahn 2007a), ebenso wie Angstgefühle bzw. die Bewertung des Schienenverkehrs als gefährlich (Meyer-Baron 2000; Miedema und Vos 1998) korrelieren positiv mit der Belästigungsreaktion. Öhrström u. a. (1980) stellen in ihrer Laborstudie fest, dass Probanden, die angeben, daheim einem eher ruhigen Wohnumfeld ausgesetzt zu sein, höhere Belästigungsreaktionen im Labor angeben. Für den Gebrauch des Transportmittels zeigen Chan und Lam (2008), dass sich die Nicht-Nutzer (gefolgt von den gelegentlichen Nutzern und den regelmäßigen Nutzern) mehr belästigt fühlen. Miedema und Vos (1998) bestätigen diese durch die ökonomische Abhängigkeit vom Transportmittel reduzierend wirkende Belästigungsreaktion.

c) Akustische Faktoren

Neben dem wesentlichen akustischen Parameter des Schallpegels, über den bereits in der Sektion der Dosis-Wirkungsbeziehungen ausführlich berichtet wurde, seien in diesem Abschnitt besonders die drei Variablen Anzahl der Züge, Distanz zum Gleis und Geschwindigkeit des Verkehrsmittels aufgeführt, da diese aufgrund ihrer Relevanz im Zusammenhang mit lärminduzierter Belästigung am meisten und mit den eindeutigsten Resultaten untersucht worden sind. Dies mag daran liegen, dass sie zumeist hoch mit dem Schallpegel korrelieren. Dieser Zusammenhang ist insofern plausibel, als dass diese drei Einflussgrößen den Immissionspegel zu großen Teilen mitbestimmen.

In Regressionsanalysen wird mit steigender *Anzahl der vorbeifahrenden Züge* pro Tag oder Woche auch eine zunehmende Belästigung nachgewiesen. In der Abb. 49 wird deutlich, dass der Anteil der stark Belästigten in Kombination mit steigendem maximalem Lärmpegel und der Anzahl verbundener Lärmereignisse (Vierecke für 60-250 Züge/24h, Kreise für 20-50 Züge/24h) zunimmt.

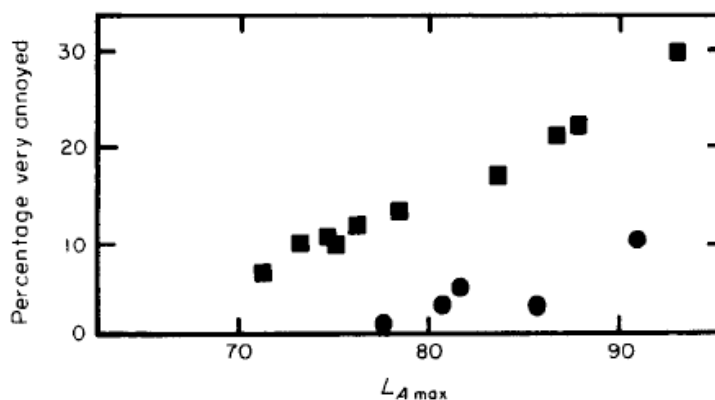


Abb. 49: Schallpegelabhängige Belästigung in Zusammenhang mit der Anzahl der Lärmereignisse (Sörensen und Hammar 1983)

Fields (1979) zeigt allerdings in einer Regressionsschätzung, dass es einen Schwelleneffekt zu geben scheint, der beschreibt, dass ab einem bestimmten Punkt der Fahrzeugfrequenz die Belästigung nicht weiter zunimmt (siehe Abb. 50).

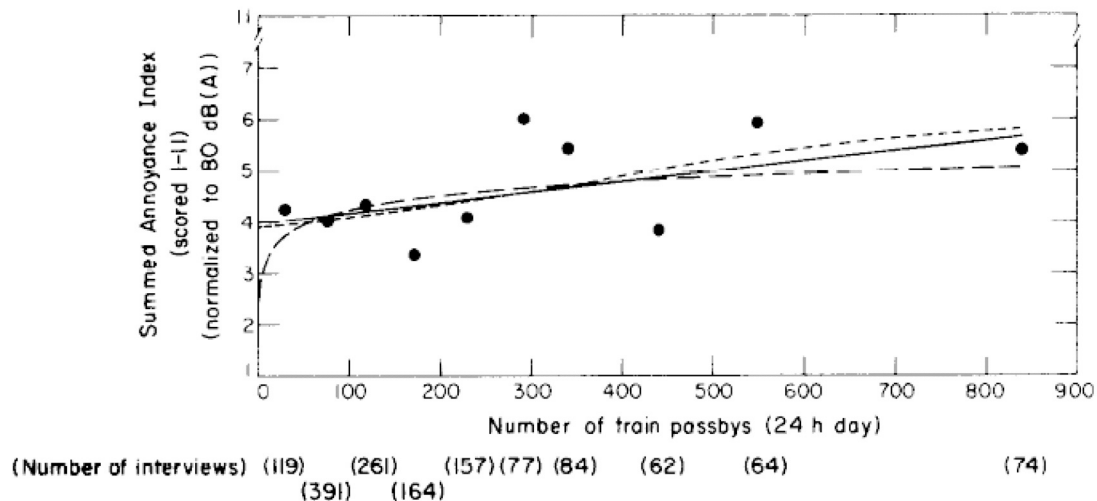


Abb. 50: Schwelleneffekt für die Anzahl der Lärmereignisse (Fields und Walker 1982b)

Öhrström und Skånberg (1996) hingegen berichten über gemischte Effekte hinsichtlich der Anzahl der Lärmereignisse. In Gebieten mit 60 Zügen/Tag ist die Belästigung viel höher als in Gebieten mit 160 Zügen/Tag. In vibrationsfreien Gebieten dagegen steigt die Belästigung mit wachsender Anzahl der Züge/24h.

Auch die *Geschwindigkeit der Züge* und die Anstiegssteilheit der Schallpegel verstärken die Belästigung (De Coensel u. a. 2007; Fields 1979; Öhrström, Björkman und Rylander 1980), ebenso die *Dauer der Exposition* (ab einem Pegel von $L_{eq,24h} = 55$ dBA → siehe (Fields 1979) Eine negative Korrelation zwischen Expositionsdauer unabhängig vom Pegel finden Andersen u. a. (1983). Vos (2004) zeigt in seiner Felduntersuchung, in der er sich japanische Hochgeschwindigkeitszüge (Maglev) mit Spitzengeschwindigkeiten bis zu 400 km/h anschaut, dass die Geschwindigkeit der Züge keine unmittelbaren bzw. moderierenden Auswirkungen auf die Belästigungsreaktion haben muss (siehe Abb. 51).

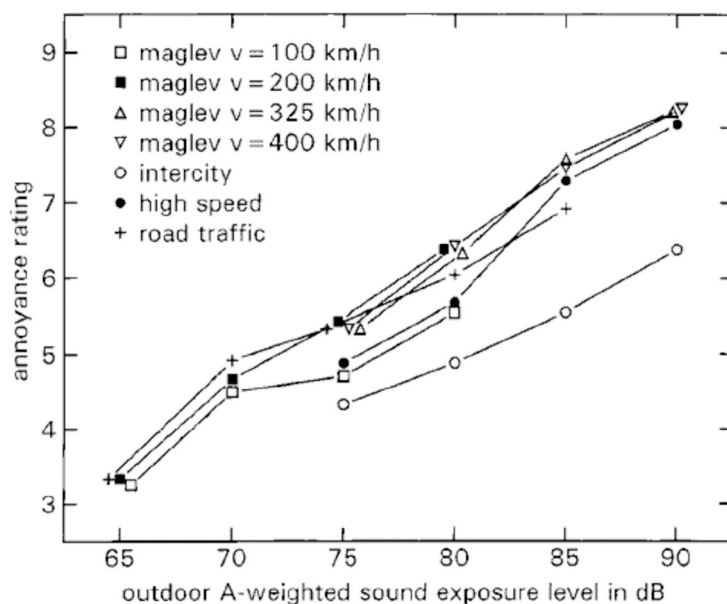


Abb. 51: Belästigung in Abhängigkeit von verschiedenen Zügen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Vos 2004)

Ein weiterer häufig diskutierter Moderator ist *die Entfernung der Lärmquelle* zu den Anwohnerhäusern. Es kann übereinstimmend ein inverser Zusammenhang zwischen Distanz zum Gleis und schallpegelabhängiger Belästigung ausgemacht werden (Ali 2005; De Coensel u. a. 2007; Morihara, Sato und Yano 2004; Öhrström u. a. 2007; Tamura 1994; Vos 2004)(siehe Abb. 52).

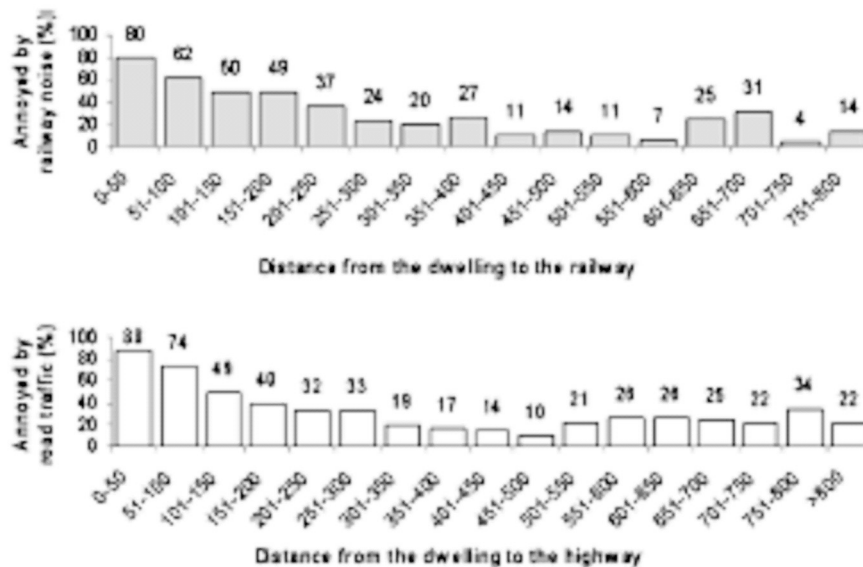


Abb. 52: Schallpegelabhängige Belästigung und Distanz zum Gleis (Öhrström u. a. 2007)

Zuletzt seien weitere weniger oft untersuchte Parameter genannt, die den Lärmpegel ebenfalls mitbestimmen und von daher auch eine regulierende Funktion auf die pegeldeterminierte Belästigung haben. Güterzüge werden im Vergleich mit Passagierzügen in der Untersuchung von Fields (1979) dreimal so oft als belästigender empfunden. In der Studie von De Coensel u. a. (2007) erklärt die Zugart keinen zusätzlichen Varianzanteil zum bereits einbezogenen Schallpegel. Wenn die *Position des Schlafzimmers* Richtung Gleis ausgerichtet ist (Öhrström und Skånberg 1996), sowie bei *Sichtbarkeit des Zuges* (Fields 1979) steigt die Belästigung. Dagegen sinkt sie mit dem *Einbau von isolierten Fenstern*, wobei Aasvang u. a. (1981) bei Anwohnern mit Lärmschutzfenstern stärkere Belästigung gegenüber Schienenverkehrslärm im Vergleich mit denjenigen ohne zusätzlichen Lärmschutz durch isolierte Fenster verzeichnen können. Möhler hat in mehreren Untersuchungen zeigen können, dass die Belästigung größer ist bei *offener Fensterstellung*. Vos (2004) allerdings findet ähnliche lediglich pegelabhängige Belästigungsreaktionen für verschiedene Lärmquellen, unabhängig von offenen oder geschlossenen Fenstern.

Anwohner in *Holzhäusern* sind mehr belästigt als Anwohner in Häusern aus Beton, sowie Villenbewohner mehr verärgert sind als Apartmentbesitzer (Öhrström und Skånberg 1996).

Walker und Chan (1996) machen in ihrer Laborstudie einen Effekt des *Frequenzbereiches* aus, wobei sich zeigt, dass Probanden bei höheren Frequenzen (z.B. 80 Hz) mehr belästigt sind im Vergleich mit Lärmereignissen bei niederen Frequenzen (~50Hz).

d) Nicht akustische Faktoren

Unter den nicht akustischen Faktoren stellt sich der *Tages- bzw. Jahreszeitpunkt* (siehe z.B. Abb. 53) als der wichtigste heraus. Immer wieder kann gezeigt werden, dass

Schienenlärm in den Abend- und Nachtstunden (Andersen, Kühl und Relster 1983; Fields 1979; Joncour u. a. 2000; Moehler 1986; Öhrström 1997b), sowie am Wochenende und im Sommer (17.4 % im Sommer vs. 5 % im Winter highly annoyed bei N=260 von (Lambert, Champelovier und Vernet 1993; Öhrström 1997b) als belästigender empfunden wird.

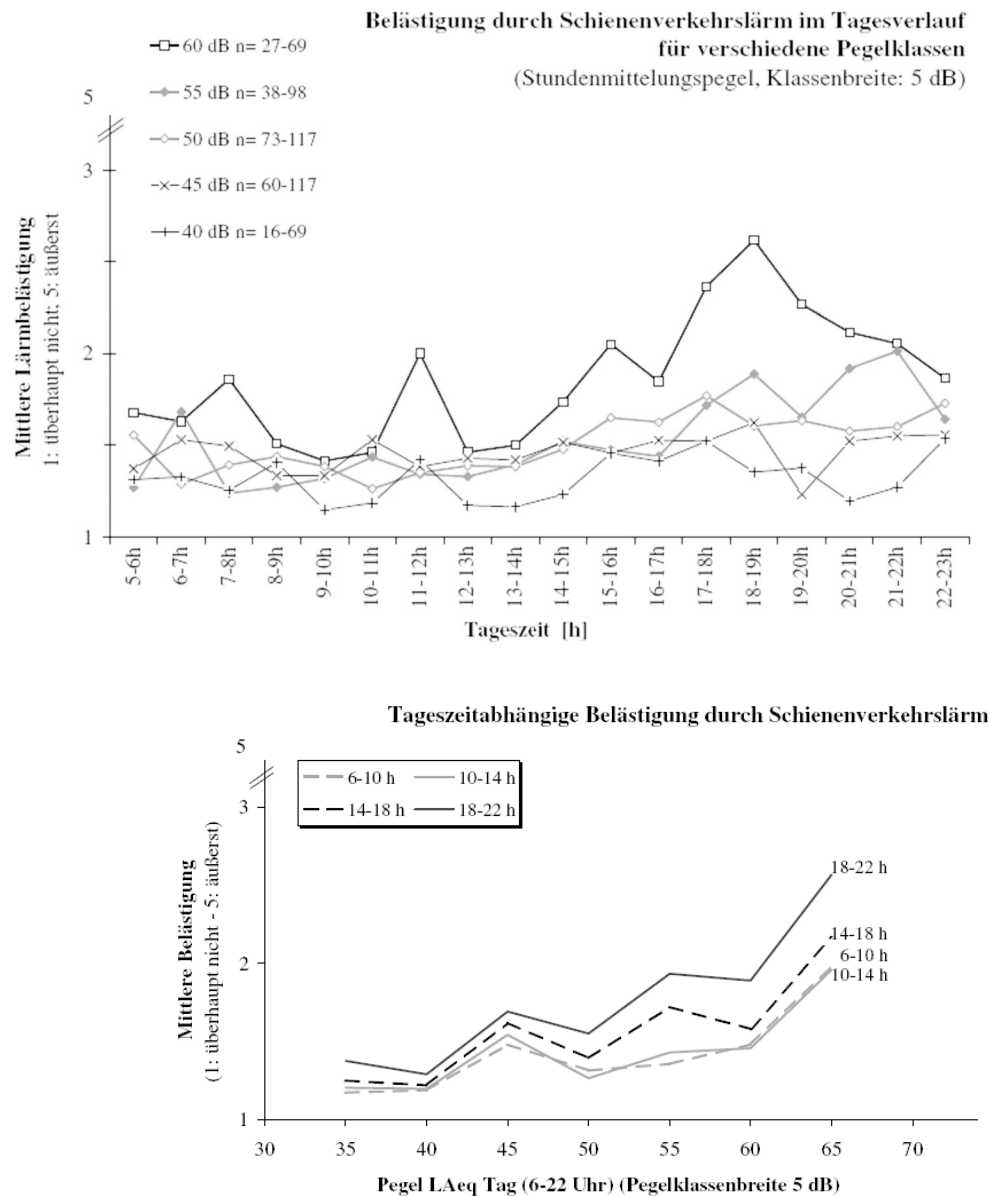


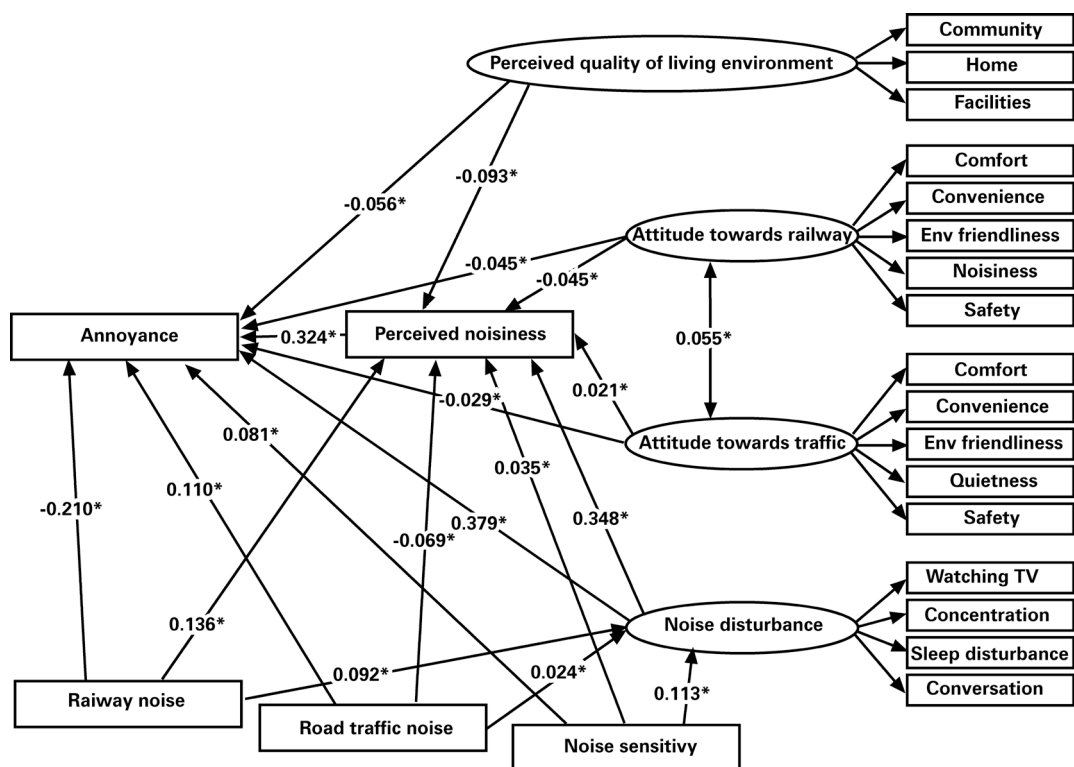
Abb. 53: Tageszeitabhängige Belästigung (Schreckenbergs und Guskis 2005)

Kuhnt u. a. (2008) können keinen Unterschied in der Belästigung zwischen einem Experimentaltermin morgens (8.30 h) und mittags (12.30 h) feststellen.

Außerdem zeigt sich übereinstimmend, dass Schienenlärm belästigender empfunden wird wenn während des Lärms eine schwierige Aufgabe ausgeführt werden soll (Kuhnt u. a. 2008; Sandrock u. a. 2008; Schütte, Wenning und Griefahn 2006). Dies geht konkordant mit Ergebnissen zu schallbeeinträchtigten Leistungsparametern und auch Ergebnissen zur Gestörtheit von alltäglichen Aktivitäten in Zusammenhang mit Schienenlärm (hier sei auf die Abschnitte 5.1.3 und 5.1.5 verwiesen).

Abschließend sei noch näher auf eine Studie von Lam u. a. (2009) eingegangen, die anschaulich mehrere Moderatoren in drei Pfadanalysen/-modellen zusammenführen. In ihrer Studie untersuchen sie insbesondere die Auswirkungen von nicht-akustischen Faktoren und der jeweilig dominanten Lärmquelle auf die Belästigungsreaktion in verschiedenen Lärmquellenszenarien [(a) Schienenlärm dominierendes Gebiet (mind. 5 dB(A) lauter als die andere simultane Quelle) vs. (b) Straßenlärm dominierendes Gebiet vs. (c) Lärmsituation total] mit insgesamt 597 Verkehrslärmanwohnern (siehe Abb. 54). In ihre Analysen beziehen Lam u. a. (2009) die folgenden Variablen mit diversen Subkategorien ein (siehe auch Abb. 54):

- wahrgenommene Lautheit zu Hause
- Lärmempfindlichkeit
- Zufriedenheit mit der Umgebung
- Einstellung gegenüber dem Zug/Auto als Transportmittel
- Einfluss der Störung von täglichen Aktivitäten
- Anzahl der täglichen Stunden daheim
- Wohndauer



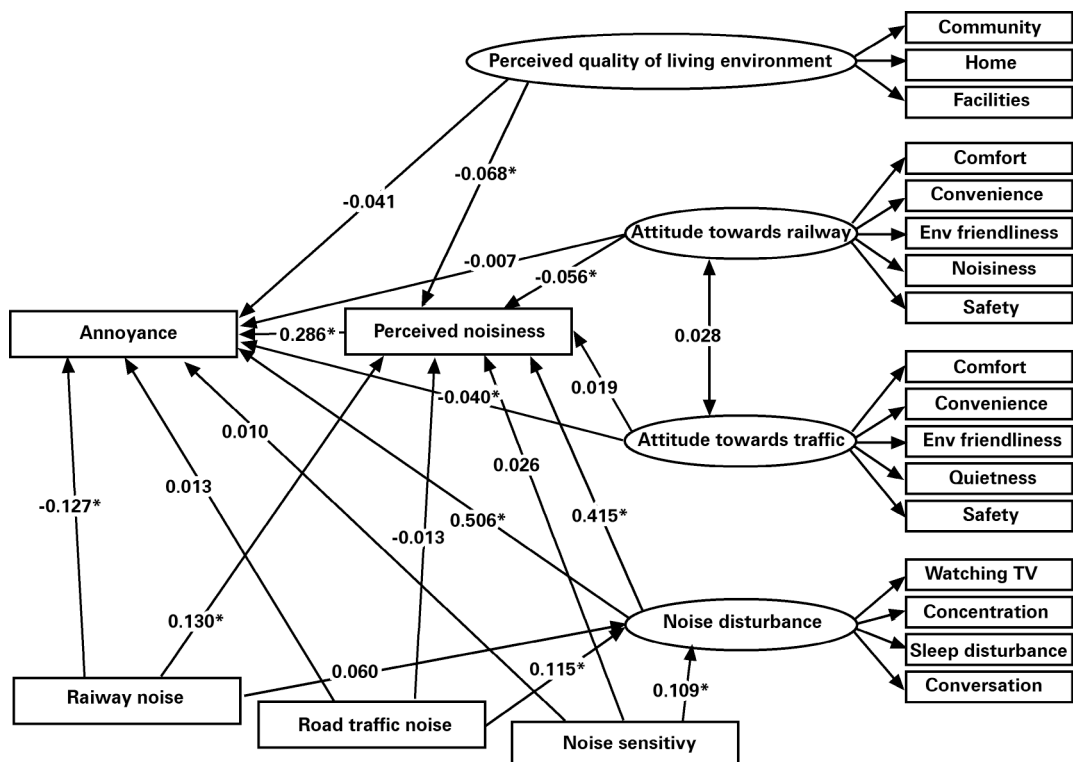
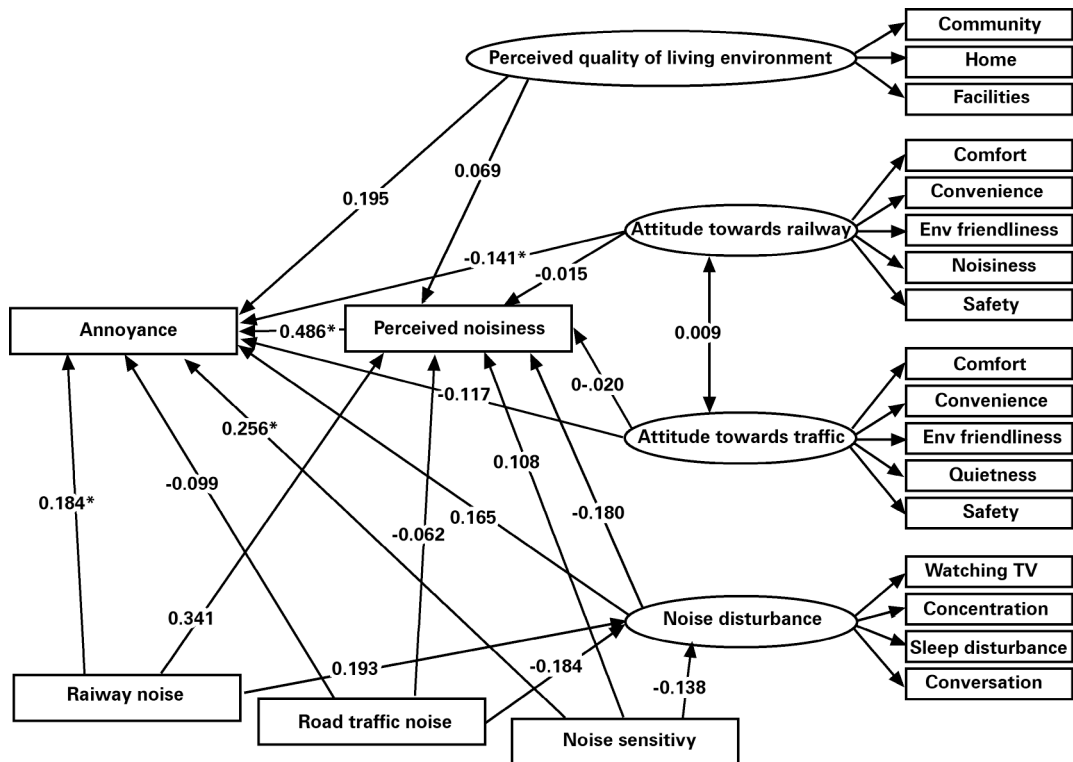


Abb. 54: Drei Pfadmodelle zu nicht akustischen Einflussfaktoren (Lam u. a. 2009)

Der totale Lärmpegel ist in den Regionen mit dominantem Straßenlärm signifikant höher als in Schienengebieten. Die Regressionssteigung des Schienenlärms in der Vorhersage von Belästigung ist steiler verglichen mit der Straßenlärmsituation und der kombinierten Gesamtlärmsituation. Auch die Regression von Belästigung auf wahrgenommene Lautheit ist hoch signifikant ($p < .0005$). Es werden drei Strukturgleichungsmodelle mit verschiedenen Geräuschbelastungssituationen durchgeführt (a) Straßenlärm dominant (b) Schienenlärm dominant (c) Beide Quellen gleich dominant = Total.

Kurz zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Belästigung zu großen Teilen durch Gestörtheit verschiedener Aktivitäten und wahrgenommene Lautheit beeinflusst wird. Die persönliche Lärmempfindlichkeit, Einstellungen gegenüber den verschiedenen Verkehrsmitteln und die wahrgenommene Qualität der Wohnumgebung stellen sekundär moderierende Faktoren dar. Wenn die eine oder andere Quelle dominiert, hat die jeweils dominante Quelle eine direkte signifikant positive Wirkung auf die Belästigung, die jeweils nicht dominante Quelle hat einen negativen Effekt auf die Belästigungsreaktion. In dem Gesamtmodell (3. Modell) zeigt sich, dass Straßenlärm zwar einen kleineren, aber positiven ($R^2 = 0.013$), Schienenlärm einen größeren, aber signifikant negativen ($R^2 = -0.127$) Einfluss auf Belästigung hat.

Den Forschungsbefunden im Zusammenhang mit Moderatoren in der Beziehung zwischen Lärm und Belästigung wird die *Evidenzstufe 1* (+++) vergeben, da es eine Überzahl einheitlicher Studienergebnisse zu einer Mehrzahl von Moderatoren gibt. Zu den wichtigsten zählen der Schallpegel, welcher positiv, als auch die Distanz zum Gleis vom Immissionsort, welche negativ auf die Verbindung zwischen Lärm und Belästigung betroffener Anwohner einwirkt.

5.1.1.3 Vergleich verschiedener Lärmquellen

In mehreren Studien werden verschiedene Lärmquellenvergleiche hinsichtlich der Belästigungsreaktion durchgeführt. Diese Vergleiche beziehen sich zumeist entweder auf einen binären Vergleich zwischen Straßen- und Schienenlärm (vor allem die Arbeitsgruppe um Möhler), einem Dreifach-Vergleich zwischen Straßen-, Flug- und Schienenlärm oder aber einen Vergleich der Lästigkeit verschiedener Zugarten [mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Technisierungsgrad: französischer Maglev Train, japanischer Shinkansen, deutsche Hochgeschwindigkeitszüge ICE, konventioneller Personenverkehr (IC, EC, RE)]. Schließlich gibt es auch Untersuchungen, die zwar mehrere Quellen in ihre Studien einbeziehen, aber keinen direkten Vergleich der quellenspezifischen Lästigkeitsunterschiede durchgeführt haben bzw. nicht darüber berichten (Heinonen-Guzejev u. a. 2000; Kim u. a. 2007; Liepert u. a. 1999; Miedema und van den Berg 1988; Miedema und Vos 1999; Rylander u. a. 1977; Schütte, Wenning und Griefahn 2006; Morihara, Sato und Yano 2004; Vernet 1983).

Insgesamt lassen sich drei Haupttendenzen in den gesammelten Befunden festmachen. Zum einen zeigt sich Schienenlärm als weniger belästigend im Vergleich mit Straßenlärm. In einem anderen Cluster an Studienergebnissen dreht sich dieser Effekt um, ein dritter Block subsumiert gemischte Befunde. Im folgenden Abschnitt werden diese drei Hauptströmungen nun näher besprochen.

Ein genereller Trend, auf dem auch der Schienenbonus (aufgrund der geringeren Stör-/Lästigkeitswirkung) aufbaut, liegt darin, dass Schienenlärm weniger belästigend ausfällt als Straßen- und vor allem Fluglärm (Fields 1979; Joncour u. a. 2000; Knall und Schuemer 1983; Lambert, Champelovier und Vernet 1993; Liepert u. a. 2005; Miedema und Vos 1998; Moehler 1985; Ohrström, Gunnarsson und Ögren 2007; Sandrock u. a.

2008; Schreckenbergs u. a. 2001; Schuemer-Kohrs u. a. 1998). Dabei ist Schienenlärm weniger lästigkeitswirkend als Straßenlärm, gefolgt von Fluglärm, wobei sich die Unterschiede mit steigendem Pegel noch vergrößern (Fields 1979). Werden Anwohnergebiete untersucht, in denen die eine oder andere Lärmquelle (zumeist Straße vs. Schiene) dominiert (mind. 5 dB(A) lauter als die simultan vorherrschende, aber leisere andere Lärmquelle) wie in einer Untersuchung von Joncour u. a. (2000), zeigt sich, dass die Schienenlärm-dominante Gruppe immer weniger belastigt ist als die Straßenlärm-dominante Gruppe oder die Gruppe mit gleich lauten Geräuschpegeln der zwei Quellen. Die Straßenlärm-dominante Gruppe berichtet bei hohen Lärmpegeln [über 60/65 dB(A)] einstimmig die höchsten Belastigungswerte. Bei einem Lärmpegel von 60 dB(A) stimmen 40 % überwiegend mit dem Item "Ich vergesse Straßenlärm" überein. Bei dem Item zu Schienenlärm stimmen 70 % der Befragten unabhängig vom Lärmausmaß mit dem Item überein. 60 % in der Schienenlärm-dominanten Gruppe [bei >10 dB(A)] sind sich einig, dass der Schienenlärm allein ertragbar wäre, nur 30 % in der äquivalenten Situation für Straßenlärm. Wenn Schienenlärm um mindestens 10 dB(A) lauter ist, negieren 30 % der Befragten diese Tatsache, wenn Straßenlärm um 10 dB(A) lauter ist, negieren diese Tatsache nur 15%. Für die nächtlichen Regressionskurven ist die Angabe der "ziemlich oft oder immer gestörten" durch Schienenlärm unabhängig vom Lärmpegel. Für Straßenlärm steigt die nächtliche Gestörtheit mit dem Lärmpegel. Knall und Schümer (1983) bestätigen einen Schienenbonus von 4.4 dB(A), wobei die Lästigkeitsdifferenz in städtischen Gebieten sogar noch größer ausfällt als in ländlichen Wohngegenden. Lambert u. a. (1998) halten einen Schienenbonus von 5 dB(A) bei einem Dauerschallpegel (24h) von 70 dB(A) fest. In einer kombinierten Feld- und Laborstudie (Liepert u. a. 2005) kann die geringere Lästigkeit von Schienenlärm, sogar trotz hoher Vorbeifahrhäufigkeiten (im Feld) untermauert werden. Schienengebiete mit hoher Anzahl von Lärmereignissen (>360 Züge/24h) wirken in gleicher Weise belastigend wie Schienengebiete mit niederen Lärmereignisanzahlen und können beide einen gleich bleibenden Bonus von 5-6 dB(A) gegenüber Straßenlärm behaupten. Der Schienenbonus fällt in der Laboruntersuchung bei hoher Anzahl von Lärmereignissen, sowohl für die Straße [1350 Passbys (hoch) vs. 600 Passbys (gering)] als auch für Schienenfahrzeuge [13 Züge am Tag (hoch) vs. 5 Züge am Tag (gering)] und gleichem Lärmpegel [um die 55 dB(A)] sogar noch größer aus als in vergleichbaren Geräuschpegelsituationen mit geringeren Vorbeifahrhäufigkeiten.

Die Reihenfolge der quellspezifischen Lästigkeit divergiert allerdings in unterschiedlichen Studien.

Niemann u. a. (2006) geben in seiner großen epidemiologischen Feldstudie (LARES) eine Folge der Belastigung von Straße vor Flug und zuletzt Schienenlärm an (siehe Abb. 55).

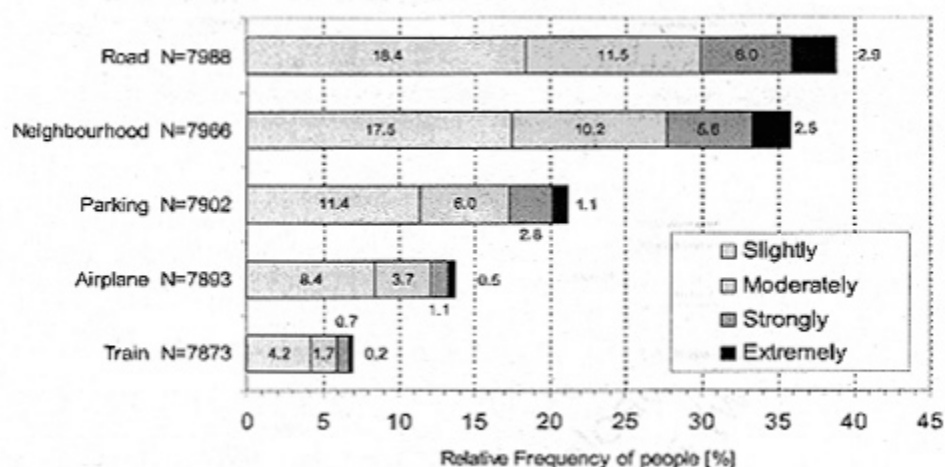


Abb. 55: Belastigung durch verschiedene Lärmquellen (Niemann u. a. 2006)

Die Arbeitsgruppe um Möhler führt mehrere Untersuchungen zu der Lästigkeitsdifferenz zwischen Straßen- und Schienenlärm durch (Möehler 1986; Möehler 1987; Möehler und Knall 1983; Möehler, Liepert, Schuemer und Griefahn 2000; Möehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000; Möehler 1985; Schuemer-Kohrs u. a. 1998; Schreckenbergs u. a. 1999). Aus all diesen Untersuchungen ergibt sich ein Schienenbonus (geringere Störwirkung) bzw. Schienenmalus in Abhängigkeit vom untersuchten Gestörtheitsbereich, von der Pegelstärke und auch vom betrachteten Bezugszeitraum (Tag/Nacht). Schienenlärm ist insgesamt signifikant geringer belästigend als Straßenlärm für $L_{eq,24h}$ mit einem Bonus von 4dB(A), ebenso wie für die Belästigung nachts (Bonus von 10 dB(A) für die Gesamtgestörtheit und Schlafstörungen, die Lärm zugeschrieben werden), sowohl bei offenem als auch geschlossenem Fenster. Der Schienenbonus lässt sich für die für generelle Störung der Ruhe und Erholung in der Wohnung, den vegetativen Störungen sowie der allgemeinen Störung über Tag und Nacht sowie Schlafstörungen festhalten. Der Schienenmalus trifft auf die Störung der Kommunikation innen (Musik hören, unterhalten/telefonieren, häusliche Geselligkeit) und die Störung der Erholung und Kommunikation außen zu. Diese Lästigkeitsunterschiede sind insgesamt tagsüber geringer als nachts, sowie geringer in unteren Pegelbereichen. In Situationen, in denen Schienenlärm dominant ist (5-10 dB(A) lauter als Straßenlärm) ergeben sich gleich häufige Belästigungsaufzählungen. Steigt die Dominanz von Schienenlärm, geben 60-70 % der Befragten eine stärkere Belästigung durch Schienenlärm an. In der umgekehrten Situation für sehr dominanten Straßenlärm geben 80-100 % der Befragten eine höhere Belästigung durch Straßenlärm an. Vergleichen Möehler und Liepert (2006) verschiedene Dominanzsituationen der beiden Quellen Straße und Schiene, zeigt sich, dass bei gleichem simultanem Pegel der beiden Quellen Straßenlärm belästigender ist. Bei dominantem Straßenlärm (mind. 10 dB(A) lauter) wirkt Schienenlärm weniger belästigend, wobei Straßenlärm in der Bedingung, in der Schienenlärm dominiert, eine größere Rolle spielt als in der umgekehrten Situation, denn da wirkt sich der dominante Straßenlärm nicht in einer erhöhten Belästigung gegenüber Schienenlärm aus, auch nicht bei Pegeln über 55 dB(A).

Die Graphik (siehe Abb. 56) aus der großen Synthese von Miedema und Vos (1998) veranschaulicht den zuvor beschriebenen allgemeinen Trend der geringeren Belästigung von Schienenlärm gegenüber Straßen- und schließlich Fluglärm.

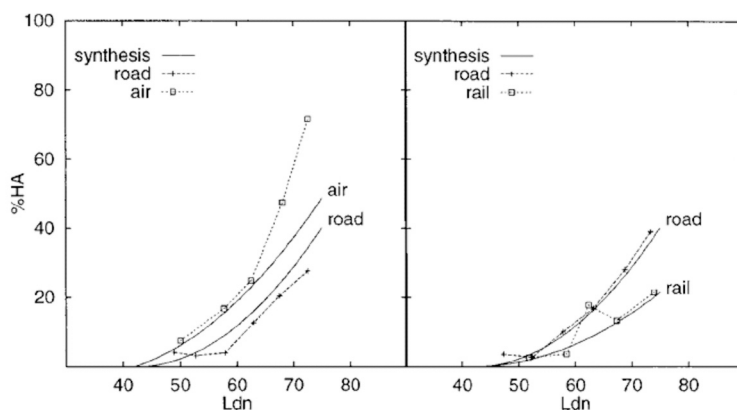


Abb. 56: Regressionskurven der quellspezifischen Belästigung (Miedema und Vos 1998)

Eine ähnliche Studie zu verschiedenen lauten Geräuschbelastungssituationen durch die zwei Lärmquellen Schiene und Straße führten Ohrström u. a. (2007) durch. Bei singulärer Exposition durch die Geräuschquellen bei gleichem Pegel [53 dB(A)] fühlen sich 50 % durch Schienenlärm, dagegen 75 % durch Straßenlärm belästigt. In der Situation mit beiden äquivalenten Geräuschbelastungen fühlen sich bei 53 dB(A) 71 % belästigt, das heißt, Straßenlärm wird belästigender als Schienenlärm singulär und kombiniert mit

Straßenlärm empfunden. Wird nur der Prozentsatz der stark Belästigten berücksichtigt, verstärken sich die Unterschiede sogar noch. Sandrock u. a. (2008) belegen, dass Tram-Lärm weniger belästigend wirkt als Buslärm über alle untersuchten Pegelklassen.

Darüber hinaus gibt es einen Block mit durchmischten Befunden. Basner u. a. (2008) finden in einer experimentellen Laborstudie, dass in Expositionsnächten mit dreifacher Geräuschquellenbelastung Fluglärm belästigender als Schienenlärm wirkt, gefolgt von Straßenlärm. In Doppel-Belastungen zeigt sich Fluglärm belästigender als Schienenlärm, aber Schienenlärm stärker störend als Straßenlärm (siehe Abb. 58).

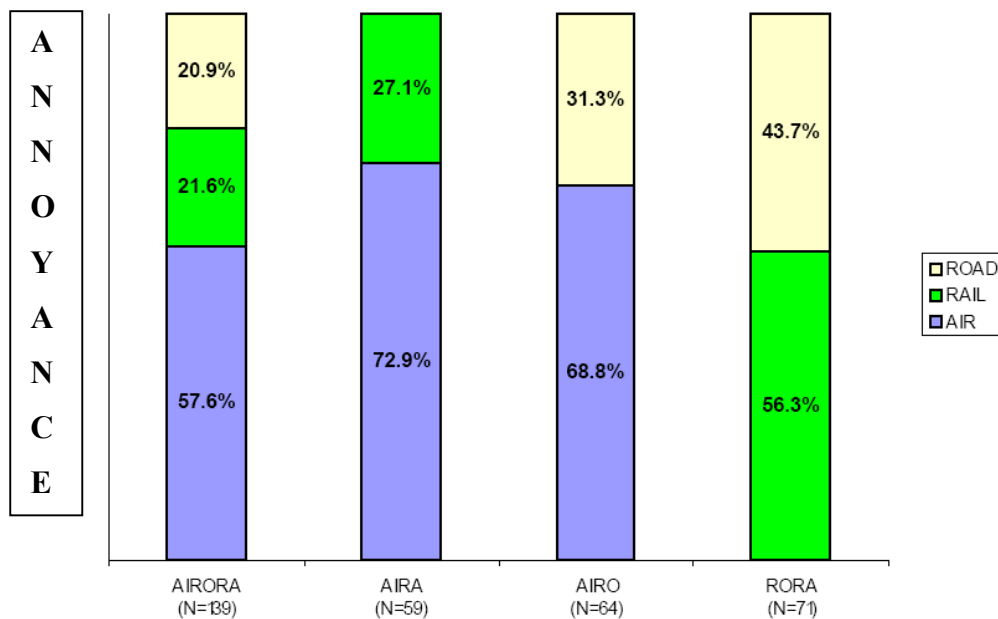


Abb. 58: Lärmbelästigung in verschiedenen kombinierten Lärmbelastungssituationen (Basner u. a. 2008)

Öhrström u. a. (2007) zeigen gemischte Befunde je nach Verwendung verschiedener Schallpegelmaße. Wenn der Lärmpegel in $L_{eq,24h}$ ausgedrückt wird, ist die Belästigung gegenüber Schienenlärm etwas höher als gegenüber Straßenlärm (bei 55 dB(A) 43 % vs. 36 %, bei 65 dB(A) 77 % vs. 75 %), dabei verhält es sich umgekehrt, wenn L_{den} als Lärmmaß verwendet wird (bei 60 dB(A) 35 % vs. 40 %, bei 75 dB(A) 90 % vs. 84 % SCHL vs. STRL) (siehe Abb. 59).

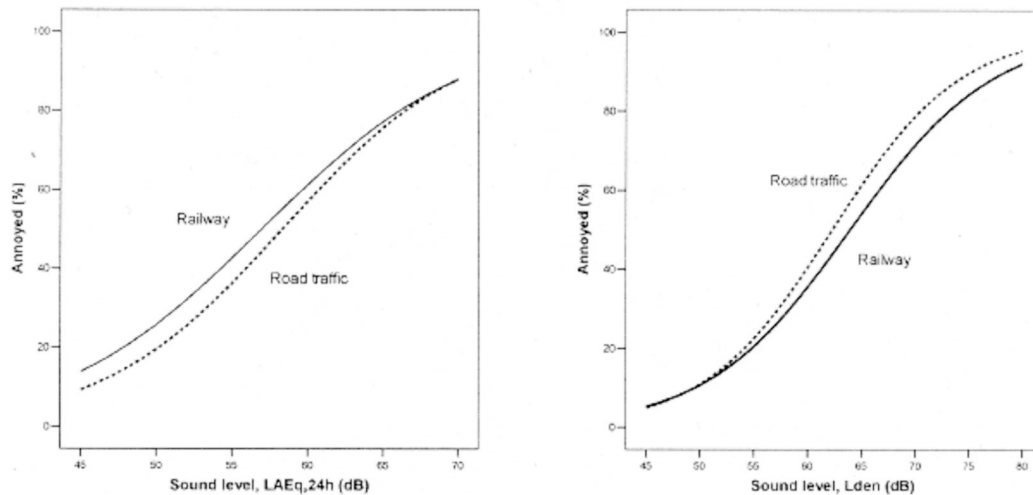


Abb. 58: Verwendung verschiedener Pegelmaße für Belästigungsreaktionen auf Schienen- und Straßenlärm (Öhrström u. a. 2007)

In einer logistischen Regression: (Kovariaten: Wohndauer, Fensterart, Position des Schlafzimmerfensters, Lärmempfindlichkeit) ist die Belästigung bei gleichem Ausmaß an Lärm durch die beiden Quellen mit steigendem Lärmpegel immer etwas größer als für die Straßenlärm-dominante Situation. Ist Schienenlärm dominant, zeigt sich die Belästigung in der Schienenlärm-dominanten Situation bis 56 dB(A) größer für Schienenlärm als in der kombinierten Situation, bei Pegeln darüber gibt es ein Cross-Over und die kombinierte Situation erscheint belästigender als die Situation Schienenlärm-dominant (siehe Abb. 59).

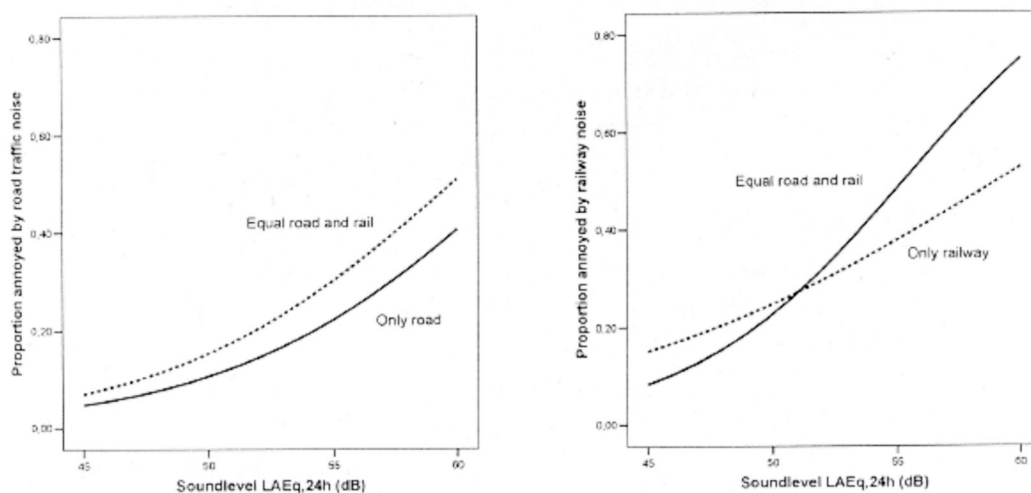


Abb. 59: Verschiedene Geräuschbelastungssituationen kombinierten Straßen- und Schienenlärms (Öhrström u. a. 2007)

In einer weiteren multiplen logistischen Regression: (totale Belästigung als KV für $L_{eq,24h}$) zeigt sich bei steigenden Pegeln bis 55 dB(A) die kombinierte Situation stärker total belästigend als die Situation, in der nur eine Lärmquelle dominant ist. Ab 58 dB(A) dreht sich das Blatt und eine dominante Lärmquelle ist weniger belästigend als die kombinierte Situation, selbst wenn sich die totalen Lärmpegel gleichen. Für den L_{den} bei steigenden Pegeln ist immer die kombinierte Situation oder Straßenlärm-dominant stärker total

belästigend als Schienenlärm-dominant (signifikant für alle Pegel zw. 54-74 dB(A), $p < 0.03$) (Siehe Abb. 60).

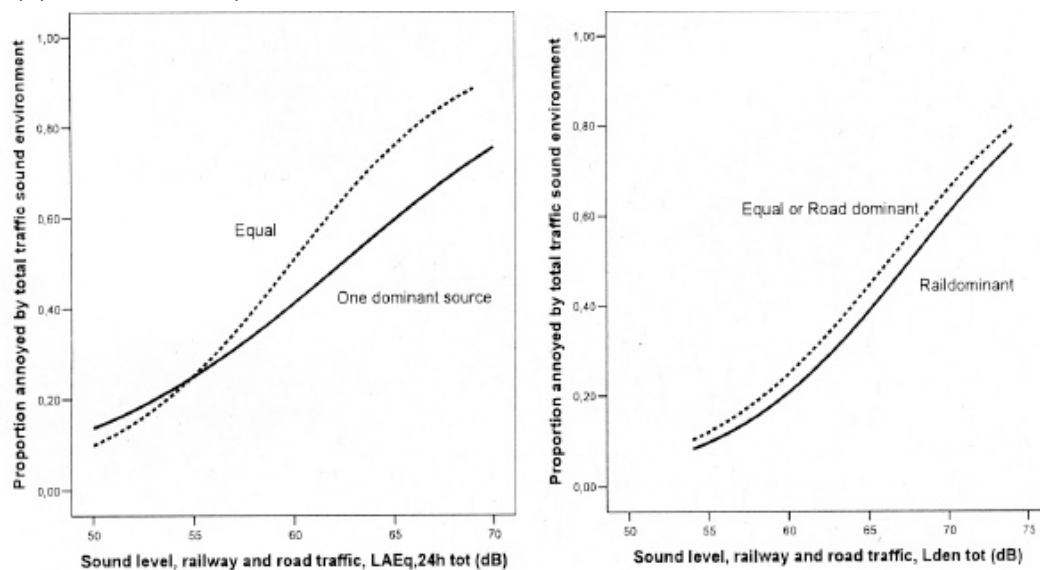


Abb. 60: Lästigkeitsunterschiede für singuläre Quellen vs. kombinierte Geräuschquellenbelastung (Öhrström u. a. 2007)

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Laborstudien aus dem Jahr 2005 und 2007 (Öhrström u. a. 2005; Öhrström u. a. 2007; Öhrström u. a. 2005): In der unteren Pegelkategorie [(45-50dB(A)) gleicht sich die Belästigung für Straßenlärm und Schienenlärm (14 %). In den beiden mittleren Kategorien wird Schienenlärm signifikant öfter berichtet als Straßenlärm [37 % vs. 27 % für 51-55 dB(A) und 58 % vs. 62 % für 56-60 dB(A)] (siehe Abb. 61).

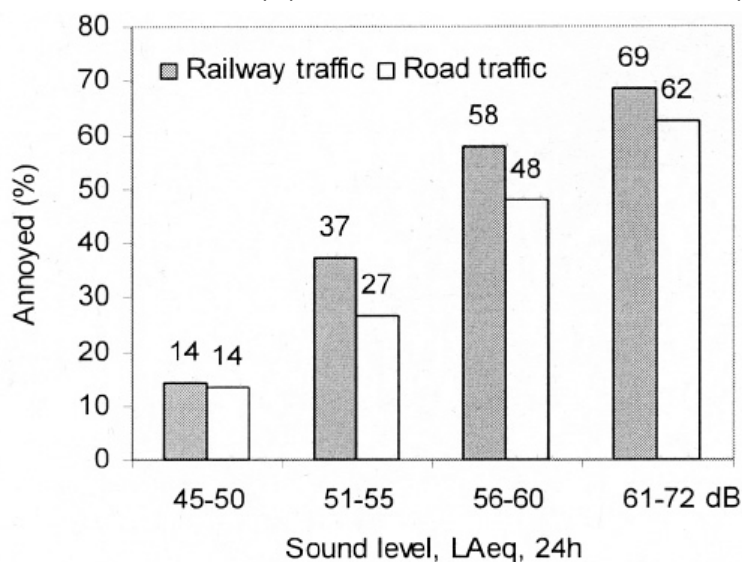


Abb. 61: Lästigkeitsvergleich zwischen Straßen- und Schienenlärm (Öhrström u. a. 2005)

Außerdem ergibt sich ein Interaktionseffekt für die simultane Präsentation der Lärmquelle (siehe Abb. 62): Die Belästigung durch Straßenlärm wird verstärkt, wenn simultan ein hoher Geräuschpegel von Schienenlärm ausgeht. Die Belästigung gegenüber Straßenlärm ist bei 61-70 dB(A) Straßenlärm und gleichzeitigem 56-60 oder 61-70 dB(A) Schienenlärm signifikant größer als bei geringeren Pegeln des simultanen

Schienenlärms. In den beiden oberen Kategorien des Schienenlärms wird die Belästigung gegenüber Schienenlärm verstärkt durch steigenden Straßenlärm. Wenn % *HA* als abhängiges Kriterium verwendet wird, findet sich kein Interaktionseffekt für Straßenlärm, wohl aber für Schienenlärm in den Kategorien 56-60 u 61-72 dB(A) bei zusätzlich hohen Pegel durch Straßenlärm [56-60 oder 61-70dB(A)].

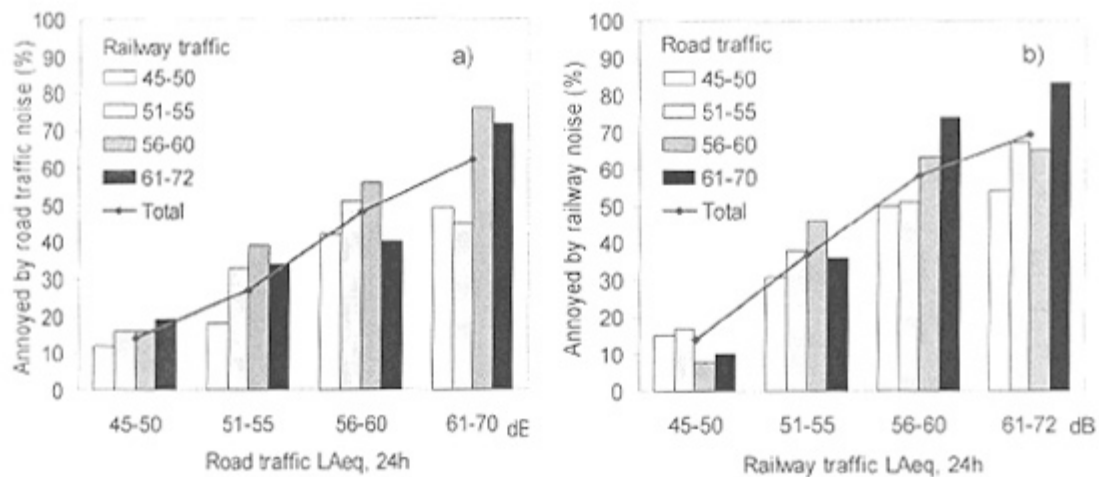


Abb. 62: Lästigkeitsvergleich in verschiedenen Geräuschbelastungssituationen (Öhrström u. a. 2005)

Die Lärmbelastigung von Straßen- und Schienenlärm und die Gesamtlärmbelastigung ist in den unteren drei Kategorien annähernd gleich (12-14 % für 48-52 dB(A), 22-26 % für 53-57 dB(A), in der oberen Pegelkategorie (63-72 dB(A) zeigt sich Straßenverkehrslärm signifikant geringer als die Gesamtbelastigung und Schienenlärmelastigung signifikant höher als Straßenlärmelastigung ($p < 0.001$) (siehe Abb. 63). Die Belästigung gegenüber der gesamten Lärmumgebung ist höher, wenn zwei Lärmquellen simultan laut vorherrschen im Vergleich mit der Situation mit einer dominierenden Lärmquelle. Die Belästigungsdifferenz steigt von 6 % bei 48-51 dB(A) bis hin zu 10 % bei 56-60 dB(A) und 20 % in der höchsten Lärmkategorie (siehe Abb. 64).

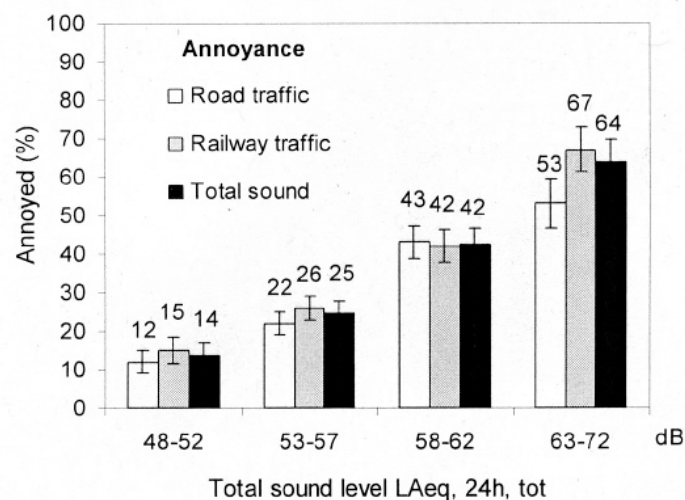


Abb. 63: Belästigungvergleich mit verschiedenen Lärmquellen (Öhrström u. a. 2007)

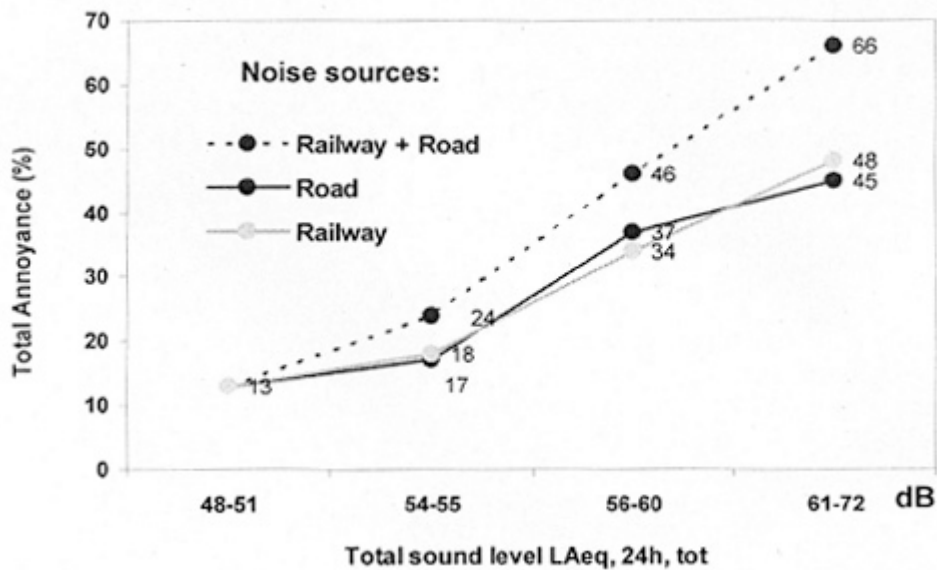


Abb. 64: Totale Belästigung als Funktion des Lärmpegels über verschiedene Lärmquellen (Öhrström u. a. 2007)

In einer anderen Untersuchung von Öhrström u. a. (1980) kommt heraus, dass für Dauerschallpegel von 55 dB(A) ($L_{eq,24h}$) Lastwagenlärm geringer als Schienenlärm und dieser wiederum geringer als Flug- und Mopedlärm belästigt. Für Maximalpegel zwischen 70-80 dB(A) findet sich in der Reihenfolge Schienen- und Fluglärm, Mopedlärm und Lastwagenlärm absteigende Belästigung. Quehl und Basner (2008) können in Experimentalstudien nachweisen, dass in triple Expositions Nächten Fluglärm (73 %) belästigender als Schienenlärm (17 %) und schließlich Straßenlärm (13 %) wirkt. In den jeweiligen Paarvergleichen zeigt sich folgendes Bild: Doppelbelastung: Fluglärm (68 %) vs. Schienenlärm (32 %), Fluglärm (73 %) vs. Straßenlärm (27 %), Schienenlärm (64 %) vs. Straßenlärm (36 %). Yano und Kobayashi (1990) präsentieren in einer Graphik die wechselnde Lärmbelastigung durch verschiedene Lärmquellen je nach Schallpegel (siehe Abb. 65). In der Abbildung zeigt sich, dass ab 55 dB(A) Schienenlärm weniger belästigend ist als Straßen- und Fluglärm, wo darunter noch Straßenlärm am wenigsten belästigend vor Schienenlärm und Fluglärm ist. Bei einem Pegel von 70 dB(A) ist Straßenlärm das belästigendste Ereignis vor Fluglärm und zuletzt Schienenlärm.

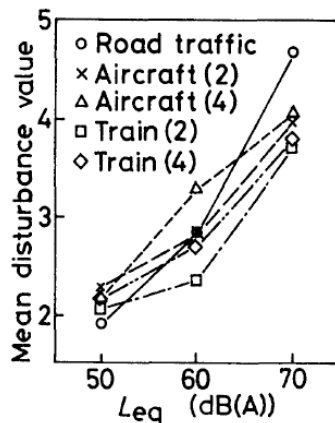


Abb. 65: Durchschnittliche Belästigung verschiedener Lärmquellen als Funktion des Lärmpegels (Yano und Kobayashi 1990)

Ein dritter großer Trend befindet Schienenlärm belästigender als andere Lärmquellen, z.B. Straßenlärm, oft abhängig von den betrachteten Störungsbereichen (Konfundierung Belästigung und Störung von Aktivitäten oder schlafmangelinduzierte Belästigungsreaktionen). Ahrlin und Rylander (1979) vergleichen Straßen- und Schienenlärm bezüglich der Belästigung aufgrund der Unterbrechung von Ruhe/Schlaf, Sprache und Aufwachreaktionen. Es zeigt sich, dass Schienenlärm in allen Störungsbereichen die größten Effekte auslöst, wobei die Störungen in der *HA* Kategorie noch ausgeprägter sind. Schienenlärminduzierte Belästigung im Labor während imaginierter Aktivitäten [(1) über ein wichtiges Projekt sprechen (2) Telefonieren (3) Radio/TV hören (4) Lesen/Konzentrieren (5) mit Freunden reden (6) Einschlafen (7) Nachts schlafen (8) Hausarbeiten verrichten] ist ebenfalls signifikant höher als durch Straßenlärm (Leue, Schütte und Griefahn 2004). Bei gleichen Pegeln für beide Quellen ist die subjektive Belästigung durch Schlafstörungen für Schienenlärm größer als für stark pegelfluktuierenden und auch gleich bleibenden Straßenlärm in einer Untersuchung von Kaku u. a. (2004). Die Hälfte der Befragten fühlt sich durch Straßenlärm bei 40-45dB(A) $L_{eq,1hr}$ bei Schienenlärm bereits ab 35 dB(A) $L_{eq,1h}$ gestört (*Gestört* meint Kategorie drei und mehr auf einer 5 Punkte Skala). Wenn der $L_{eq,1h}$ 50 dB(A) und mehr beträgt, steigt die Inzidenzrate von Aufwachreaktionen für Schienenlärm drastisch an. Für Straßenlärm gibt es keinen solchen Effekt [gar kein Anstieg → flacher Verlauf, bleibt auf dem Level von Schienenlärm bei 25-30 dB(A)]. In den zwei Laboruntersuchungen von Kurra u. a. (1999b; 1999a) ist Schienenlärm für die allgemeine Belästigung, die spezifisch auf daheim projizierte Belästigung (Abb. 66) wie auch die Störung während des Lesens und Hörens über alle Pegel belästigender als Straßenlärm und Fluglärm. Kuhnt u. a. (2008) finden keinen Unterschied in der Belästigung, wenn die eine oder andere Quelle dominiert (Straße vs. Schiene), jedoch ist die Situation mit ähnlicher Geräuschbelastung durch beide Lärmquellen etwas belästigender im Vergleich mit jener, in der eine Quelle dominiert.

In einer experimentellen Laborstudie machen Öhrström u. a. (2008) wechselnde Ergebnisse bezüglich der Lästigkeitsdifferenzen zwischen Straßen- und Schienenlärm fest. In ihrer Laborstudie stellen sie heraus, dass während Schienenlärm im Durchschnitt 2.2 Probanden, während Straßenlärm (L_{eq}) 1.3 und 1.5 (L_{max}) Probanden (bei $N = 18$) nachts aufwachen ($p < 0.03$). 39 % für Schienenlärm, 22 % für Straßenlärm (L_{eq}) und 28 % für Straßenlärm (L_{max}) geben an, durch jene Aufwachreaktionen belästigt zu sein. 28 % für Schienenlärm und jeweils 17 % für Straßenlärm berichten weiterhin eine verschlechterte Schlafqualität durch Lärm. In einer Regressionsanalyse erklärt Straßenlärm 46 % der Varianz in der vorhergesagten Schlafqualität während der Straßenlärmexposition, Schienenlärm erklärt 50 % der Varianz der Schlafqualität in Nächten mit Schienenlärm.

Ein kleiner, jedoch nicht signifikanter Prozentsatz gibt an, durch Schienenlärm mehr belästigt zu sein (44 % Schienenlärm vs. 33 % Straßenlärm L_{eq} und 28 % Straßenlärm L_{max}) als durch Straßenlärm.

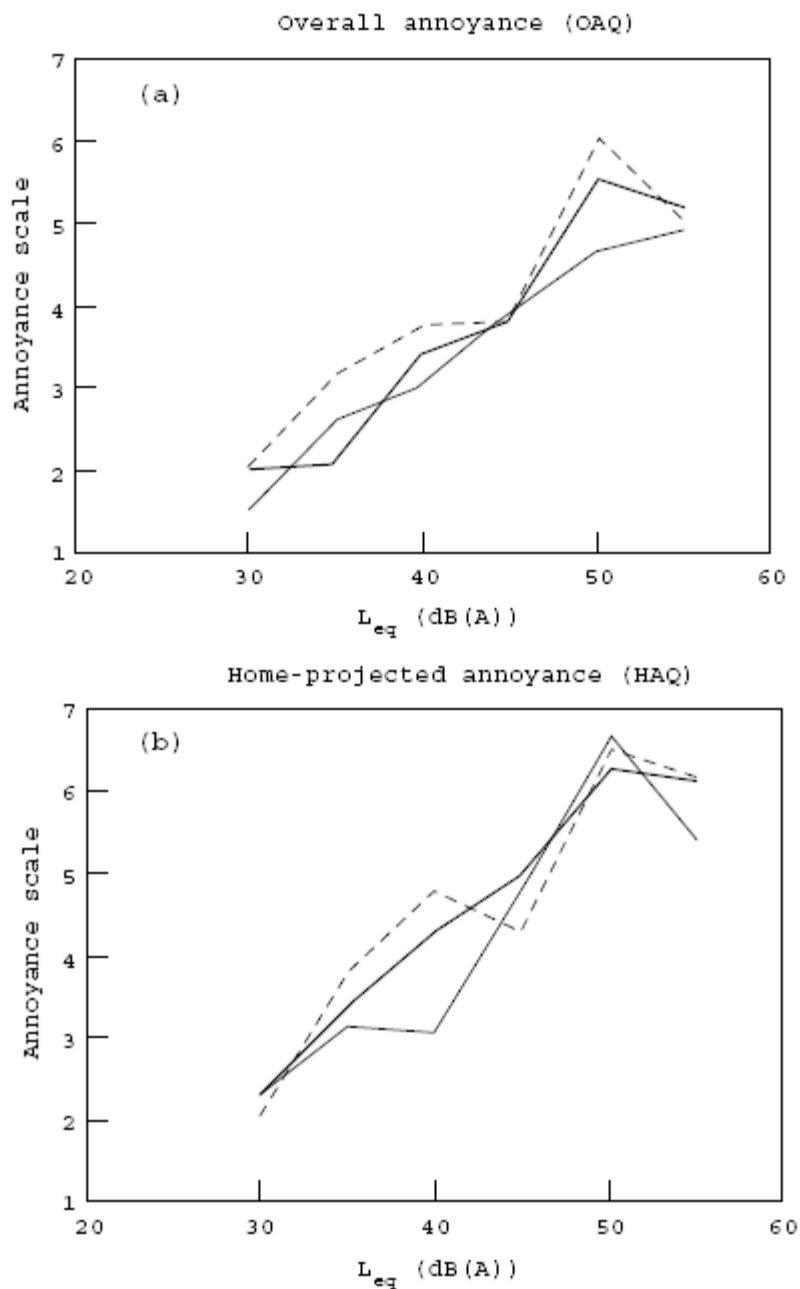


Abb. 66: Quellspezifische Belästigungsunterschiede (Kurra, Morimoto und Maekawa 1999a)

Ein letzter Vergleich, der mehrfach Beachtung findet in den Studien zu Schienenlärm und Belästigung, bezieht sich auf die Lästigkeitsdifferenzen zwischen verschiedenen Zugarten.

De Coensel u. a. (2007) finden keinen Belästigungsunterschied zwischen verschiedenen Zuggattungen (TGV, IC und Maglev Referenzmaß: Straße) trotz differierender Geschwindigkeiten ($\rightarrow$ TGV = 140, 300 km/h, IC = 140 km/h, Maglev = 200, 300, 400 km/h). Tamura (1994) weist in einem persönlichen Interview mit 55 Probanden (davon 22 Shinkansen-Zug Anwohner und 23 Anwohner einer gewöhnlichen Bahnlinie) nach, dass in dem Gebiet mit der Shinkansen-Zuglinie die Lärmumgebung als eine der unbeliebtesten beschrieben wird und die Anwohner negative Gefühle über Schienenlärm empfinden. In Gebieten mit normalem Zuglärm haben die Anwohner ein besseres Bild vom Schienenverkehr und sind sogar froh, dass sie in dieser Umgebung wohnen. Viele

von ihnen bevorzugen ein gewisses Ausmaß an Schienenlärm zu hören und würden nicht umziehen wollen, sogar dann nicht, wenn sie sich den Wohnort aussuchen könnten. Yano u. a. (2005) bestätigen die erhöhte Belästigung durch Vibration und Lärm durch den Shinkansen gegenüber einer konventionellen Bahnlinie. Allerdings ist anzumerken, dass die Vibration, die durch den Shinkansen ausgeht, signifikant höher ist als die verursacht durch die konventionelle Bahn.

Vos (2004) vergleicht einen Maglev Zug (100, 200, 325, 400 km/h) mit einem IC (120-140 km/h), einem Hochgeschwindigkeitszug (300 km/h) und normalen PKWs und Trucks (80 km/h) in unterschiedlichen Entfernungen (25, 50, 100 m) vom Gleis und Fensterstellungen (offen vs. geschlossen). Es zeigt sich, dass bei vergleichbaren ASELS die Belästigung gegenüber dem Maglev unabhängig von der Geschwindigkeit desselbigen ausfällt. Die Belästigung durch den Maglev ist nicht größer als durch Straßenlärm bei geringen ASELS (65-80 dB(A)). Im Mittel über alle ASELS ist die Belästigung durch den Maglev ebenso groß wie Belästigung durch Straßenlärm. Bei geringeren ASELS [75/80 dB(A)] fällt die Belästigung durch den Maglev größer als durch den ICE. Bei höheren ASELS [85/90 dB(A)] gibt es keinen Unterschied mehr. Mit steigendem Pegel steigt auch die Differenz zwischen IC und Maglev Zug. Bei 80 dB(A) hat der IC einen 9 dB(A) Bonus in den Belästigungswerten, bei 75 dB(A) einen 5 dB(A) Bonus. Mit geschlossenem Fenster ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie in der Situation mit offenem Fenster.

Im Fazit zeigt sich, dass gänzlich divergierende Befunde in der Kategorie Lärmquellen vergleichende Belästigung festgestellt werden, in denen sich die Rangordnung des Belästigungsausmaßes zwischen Schienen-, Straßen- und Fluglärm besonders in wechselnden Studiendesigns (scheinbar größere Belästigung durch Schienenlärm in Laborstudien, aber geringere Störwirkung des Schienenlärms in Feldstudien verglichen mit Straßenlärm), aber auch in den Vergleichen verschiedener Kombinationen von Geräuschbelastungssituationen der drei Quellen neu sortiert.

Der Befund-Block „Vergleich verschiedener Lärmquellen in ihrer Belästigung“ erhält die *Evidenzstufe 3 (+ +/-)*, da es überaus widersprüchliche Befunde der Primärstudien gibt. Eine Richtung verweist auf einen Schienenbonus, eine andere auf einen Schienenmalus im Vergleich mit Straßen- und Flugverkehrslärm.

5.1.1.4 Verhaltensänderungen (N=9)

Verhaltensänderungen als Konsequenz der lärminduzierten Belästigung oder als direkte Maßnahme zur Lärmreduktion/-vermeidung können in mehreren Studien bestätigt werden. Die am meisten berichtete konkrete Konsequenz äußert sich in der Fensterstellgewohnheit lärmbelästigter Schienenanwohner. In der Stichprobe von Fields (1979) mit 1453 Befragten, schlafen 19 % aufgrund des Schienenlärms mit geschlossenem Fenster, auch im Sommer. In diesem Sinne berichten auch Andersen u. a. (1988), dass mit steigendem Lärmpegel [$L_{eq,24h}$ in den Schritten 50, 55, 60 und 65 dB(A)] ein zunehmender Prozentsatz angibt, in ihrer Fensterstellgewohnheit beeinflusst zu werden (in der Richtung, dass das Fenster nicht mehr geöffnet wird; 0 %, 4 %, 11 % und 22 % von 391 Befragten tagsüber sowie 0 %, 8 %, 25 % und 47 % nachts von 260 Befragten für die entsprechenden vier Pegelkategorien). Nachts ist der Einfluss stärker als am Tage. Griefahn u. a. (2000) weisen nach, dass Schienenlärmanwohner signifikant öfter mit offenem Fenster schlafen als Straßenlärmanwohner, ebenso wie, dass Straßenlärmanwohner signifikant öfter das Fenster schließen bei steigendem Lärmpegel. Auch Liepert u. a. (1999) zeigen in ihrer Untersuchung, dass von den ca. 1300 Probanden in dominierenden Straßengebieten gegenüber Schienenlärmgebieten über den gesamten beobachteten Lärmpegelrange nachts von ca. $L_{eq,night} = 40-70$ dB(A) öfter das Fenster

schließen. Moehler (1987) sowie Schuemer-Kohrs u. a. (1998) führen detaillierten Bericht über die Fensterstellgewohnheit von Bahnanwohnern in mehreren Quellen. Dabei kommt heraus, dass mit zunehmenden äquivalenten Dauerschallpegel der Anteil der Lärmbelästigten und der Anteil derer, die das Fenster nachts geschlossen halten bei Straßenlärm ansteigt, beim Schienenlärm ist der Anstieg der Anteilskurven dagegen deutlich geringer. Bei Straßenverkehr beginnt die Störungskurve bei 60 dB(A) außen zu steigen und bleibt dann ab ca. 65 dB(A) auf etwa gleichem Niveau; die Maßnahmekurve (Fenster schließen) steigt dagegen bereits ab einem Pegel von 55 dB(A) konstant an, der Betroffene versucht sich also schon bei relativ geringen Schallpegeln durch das Fensterschließen vor Kommunikationsstörungen zu schützen. Beim Schienenlärm beginnt die Störungskurve bei 55dB(A) konstant zu steigen, die Maßnahmekurve steigt dagegen mit nur geringer Steigung an. In diesem Fall nimmt der Betroffene offensichtlich die Störung in Kauf ohne dass er das Fenster schließen muss. Nachts wird die Fensterschließmaßnahme bei Straßenlärm schon bei etwa 45 dB(A) ergriffen. Trotz geschlossenen Fensters zeigt sich keine wesentliche Reduktion des Anteils der Belästigten. Dagegen ist bei den Kommunikationsstörungen tagsüber nach dem Fensterschließen eine deutliche Reduzierung des Anteils der Gestörten zu verzeichnen. Beim Schienenlärm wird weder tags noch nachts das Fensterschließen als Lärmschutzmaßnahme ergriffen, nachts ist der Anteil der Belästigten auch bei offenem Fenster sehr gering, tagsüber wird eine zumeist sehr kurzfristige Störung der Kommunikation in Kauf genommen zugunsten des Vorteils eines offenen Fensters (frische Luft). Bezüglich anderer Verhaltensänderungen werden zumeist lediglich deskriptive, prozentuale Häufigkeitsangaben bestimmter lärminduzierter Handlungen gemacht. Fields (1979) schildert, dass von den 1453 Interviewten weniger als 0.5 % Umzugspläne aufgrund von Schienenlärm hegen. Bei <70 dB(A) $L_{eq,24h}$ beschwerten sich ca. 8 % bei Autoritäten und weniger als 8 % berichten über Doppelfenstereinbau. 1/3 geben an, die Fenster zu schließen bei den höchsten Lärmpegeln, sowohl während Tag und Nacht (50 % der 1/3). Lambert u. a. (1996) schildern als wesentliche Verhaltensänderungen in einer Felduntersuchung mit 260 Teilnehmern (siehe Abb. 67) Fenster schließen (35 %), Raumwechsel (4 %) und beabsichtigter Umzug (6.6 %). Der Lärmpegel beeinflusst diese insofern, als dass ab 55 dB(A) ein steiler Anstieg der prozentualen Verhaltensänderungen zu verzeichnen ist.

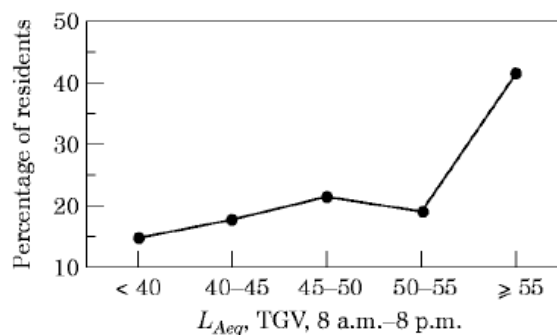


Abb. 67: Verhaltensänderungen (Lambert, Champelovier und I. Vernet 1996)

In einer Laborstudie von Maruyama (1964a) in Japan kann gezeigt werden, dass sechs studentische Probanden als Reaktion ab einem Lärmpegel von 70phon (bis Spitzenpegel von 80phon) die Stimme beim Vorlesen anheben und diese Veränderung der Sprechlautstärke einem Nacheffekt unterliegt, das heißt, auch in lärmfreien Perioden bleibt die Sprechstärke erhöht. Die 110 Studienteilnehmer von Schreckenberger und Guski (2005) geben in einem Fragebogen an, dass sie während erhöhter Lärmbelästigung durch Straßen- und Schienenverkehr überwiegend passiv kommunizieren und entspannte Tätigkeiten ausführen.

Obwohl die Befunde im Abschnitt zu Verhaltensänderungen in Folge von Schienenlärm und dessen Lästigkeitsreaktionen recht eindeutig sind, kann lediglich *die Evidenzstufe 2* (+ +) vergeben werden, da die Studienergebnisse rein deskriptiver Natur und damit zum Einen quantitativ in Form statistischer Tests nicht gut abgesichert sind. Zudem sind keine klaren Ursache-Wirkungseffekte durch die angewendeten Studiendesigns schlussfolgerbar.

5.1.1.5 Lärm und/oder Vibration (N=11)

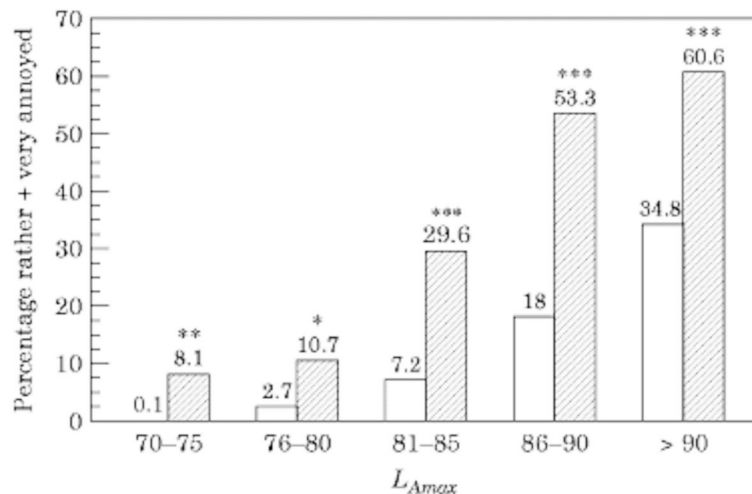
Elf Studien berichten über den Zusammenhang von Lärm und Vibration in Kombination oder als direktem Vergleich bezüglich der nachfolgenden Belästigungsreaktion (Howarth und Griffin 1990; Howarth und Griffin 1990; Klæboe u. a. 2003; Fields 1979; Morihara, Sato und Yano 2004; Öhrström 1997a; Öhrström 1997b; Öhrström und Skånberg 1996; Paulsen und Kastka 1995; Walker und Chan 1996; Yano, Morihara und Tetsumi 2005).

Howarth und Griffin (1990) untersuchen in zwei Laborstudien aus dem Jahr 1990 die Belästigungsreaktion durch die simultane Belastung durch Lärm und Vibration in der Kombination variierender Ausmaße [über je sechs Amplituden von $L_{eq} = 59, 64, 69, 74, 79, 84$ dB(A) und $VDV = 0.07, 0.10, 0.14, 0.20, 0.28, 0.40$ (ms)]. In der ersten zeigt sich folgendes Ergebnismuster: Die Belästigungsmaße hängen von beiden Stimuli ab. Mit steigendem Lärmpegel, auch trotz hoher Vibration, wird die Lärmreduktion bevorzugt. Bei hoher Vibrationsstärke und geringem Lärmpegel dagegen nicht (Schwelle ca. 80 dB(A) → fast 100 % Lärmreduktion bevorzugt unabhängig von der Vibrationsstärke). Belästigung ist stärker beim höchsten Lärmpegel mit geringerer Vibration als beim höchsten Vibrationspegel mit geringerem Lärmpegel. Bei hohem Lärmpegel hat der Anstieg der Vibration keinen zusätzlichen Belästigungseffekt. Bei geringeren Lärmpegeln steigt dagegen die Belästigung mit steigender Vibration.

Bei geringer Vibration unterscheiden sich Belästigungsmaße über den verschiedenen Lärmpegeln mehr als bei größerer Vibration (da ist auch die Belästigung bei geringem Lärmpegel schon ziemlich hoch).

In der zweiten Studie zeigt sich, dass bei geringer Vibrationsamplitude die Belästigung durch Vibration mit steigendem Lärmpegel sinkt. Bei großer Vibrationsamplitude (ab V4) steigt das Belästigungsmaß mit steigendem Lärmpegel. Lärm hat einen signifikanten Effekt bei allen Vibrationspegeln außer V3 und V5. Die Belästigungsmaße durch einen steigenden Lärmpegel sind relativ unbeeinflusst von der Vibrationsamplitude. Die Korrelationskoeffizienten der Regressionsanalysen für Lärm und Vibration sind hoch signifikant ($p < 0.001$). Die kombinierte Regressionsgerade für beide Quellen ist ebenfalls hoch signifikant ($r = 0.97, p < 0.005$). Der Steigungskoeffizient für Lärm ist exponentiell, der für Vibration linear. Klæboe u.a. (2003) bestätigt in ihrer Felduntersuchung, dass der Anteil belästigter Personen mit steigender Vibration zunimmt. In anderen Arbeiten hat Vibration keinen signifikanten Effekt auf die Belästigung oder bestimmte tägliche Aktivitäten (Radio/TV hören) (Morihara, Sato und Yano 2004). Öhrström (1997) berichtet in einer Feldstudie, dass sich die Vibrationsbelästigung insgesamt von 45 % ziemlich und sehr Belästigten (N=512) bei einer Gleis-Distanz von 50-150m auf 16 % verringert, nachdem Schallschutzmaßnahmen in den untersuchten Anwohnergebieten durchgeführt wurden. In einer zweiten großen Felduntersuchung aus dem Jahr 2007 findet sie heraus, dass allgemeine Belästigung wie auch der Prozentsatz der ziemlich und sehr Belästigten in Gebieten mit Vibration entlang steigender Maximalpegel signifikant größer ist als in Gebieten ohne Vibration [22 % mehr der % HA bei $L_{max} = 81-85$ dB(A) und 29 % mehr % HA bei L_{eq} von 66-70 dB(A)], wobei die erstere besser mit den verwendeten Lärmindizes korreliert als der Prozentsatz der „*Highly Annoyed People*“. In einem anderen Bericht über die gleiche Stichprobe berichten Öhrström und Skånberg (1996), dass die

Belästigung in vibrationsfreien Gebieten mit steigender Anzahl der Züge/24h größer wird. Bei gleicher Anzahl der Züge pro Tag und gleichem $L_{\max}$ sind die Probanden in Vibrationsgebieten signifikant mehr *highly annoyed* durch Lärm als in vibrationsfreien Gebieten (siehe Abb. 68).

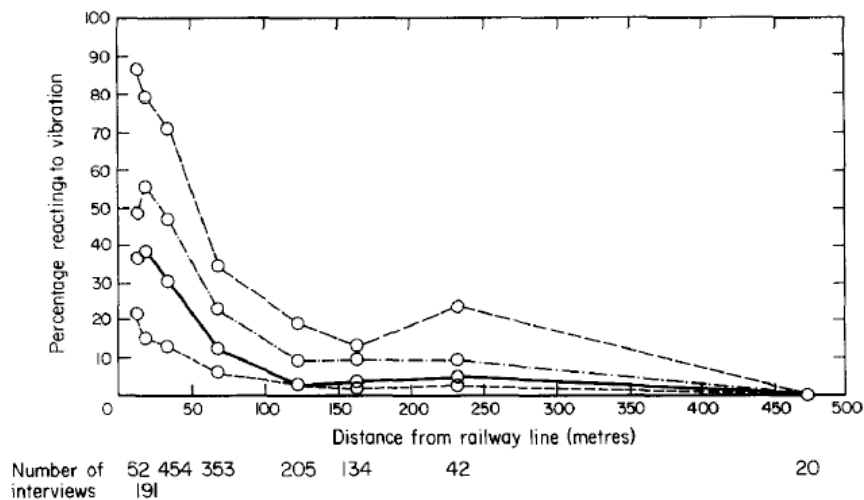


Straffiert: mit Vibration, weiß: ohne Vibration

Abb. 68: Vibrationsbestimmte Belästigung (Öhrström und Skånberg 1996)

Außerdem sind Anwohner, deren Schlafzimmer Richtung Gleis ausgerichtet sind, mehr belästigt als die, deren Schlafzimmer in eine andere Richtung liegen. Belästigung gegenüber Vibration ist in Vibrationsgebieten mindestens genauso oft wie gegenüber Lärm bis zu 200m Abstand, in vibrationsfreien Gebieten dagegen zeigt sich die Belästigung weniger stark als die Lärmbelastigungsreaktion. Das Ausmaß der Belästigung zeigt sich darüber hinaus bei Studienteilnehmer, deren Haus aus Holz gebaut ist verglichen mit Beton, ebenso wie bei denen, die in Villen leben verglichen mit Apartments, höher ausgeprägt. In Vibrationsgebieten ist die Häufigkeit der Störungsangaben 3-4x höher als in vibrationsfreien Gebieten, dazu zählen vor allem die Störung der Kommunikation draußen (häufigste Belästigungsreaktion), gefolgt von Erholung draußen, Radio/TV hören und Erholung innen. Im Vergleich Gebiete mit Vibration vs. Gebiete ohne Vibration muss in ersteren der L_{eq} um mindestens 10 dB(A) leiser sein um die gleiche Belästigung bei gleicher Anzahl von Zügen zu erzeugen. In einem Laborexperiment von Paulsen und Kastka (1995), in dem Lärm und Vibration von einer Tram und einem Hammermill simultan dargeboten werden, ergibt sich für die direkte Frage nach Vibration, dass die Belästigungsbewertung stark vom Vibrationslevel abhängt, der Einfluss des Lärmpegels aber eher klein ist und vernachlässigt werden kann. Fragt man hingegen direkt nach Lärm, hängt die Evaluation des Lärmpegels stark von der beiliegenden Vibration ab, besonders bei niedrigen Lärmpegeln. In der Frage nach der Gesamtbelästigung, hängen die Bewertungen überwiegend vom Lärmpegel ab, Vibration spielt mehr in den niederen Vibrationsamplitudenbereichen eine Rolle. In der Regressionsanalyse hat Lärm (51.3 %) einen höheren Erklärungswert als Vibration (5.4 %) für die Gesamtbelästigung durch die beiden Lärmquellen (Tram und Hammermill).

Fields (1979) berichtet in seiner großen Felduntersuchung aus den 70er Jahren, dass Vibration eine wesentliche Rolle in der Belästigung bei Distanzen von 25m (80 % Reaktion) bis hin zu 120m (maximal 20 % Reaktion) spielt, bei größeren Distanzen ergeben sich sehr geringe, kaum verändernde Vibrationsreaktionen ("ich fühle mich belästigt durch Vibration") (siehe Abb. 69).



Four reactions to vibration by distance. O--O, "Do the trains ever make your house or things in it vibrate or shake or rattle" (4.32); O-.-O, (if notice vibration) at least "a little annoyed"...when the trains "make the house vibrate or shake" (Q.18iv); O-O, (if notice vibration) "Would you say that the vibration caused by the trains is a problem or not?" (Q.33d); O----O, (if notice vibration) "very annoyed". when the trains.. "make the house vibrate or shake" (Q.18iv).

Abb. 69: Reaktionen bezüglich Vibration in Abhängigkeit von der Distanz zum Gleis (Fields 1979)

Von sechs nicht-lärmbedingten Aspekten des Schienenverkehrs (Vibration, Schmutz, Staub, Geruch, Rauch, Zuglichter, Passagiere können in die Fenster schauen) ist Vibration das am meisten belästigende Ereignis. Vibration wird minimal beeinflusst durch die Anzahl der Züge, mehr aber durch die Geschwindigkeiten der Züge, so z.B. wächst bei einem Anstieg von 30-150 km/h die Angabe der Anwohner „*Vibration ist ein Problem*“ auf 15-20 %. Die Sichtbarkeit des Zuges erhöht die Vibrationsreaktion um 6 %. Die Vibrationsreaktion wird auch erhöht durch individuelle Aspekte, wie etwa der Glaube an durch den Zug ausgehende Gefahr (Gefahr der Gesundheit) oder der Glaube, der Lärm könne verhindert werden. Weiterhin besteht eine insignifikante Tendenz, dass der Anteil der Züge nachts mit steigender Belästigung durch Vibration einhergeht.

Die Studienergebnisse zu Vibration und/oder Lärm erhalten zusammenfassend die *Evidenzstufe 3 (+ +/-)*, da die Befundlage recht heterogen und noch ziemlich dünn untersucht ist. Die Studien stimmen im Fazit darin überein, dass die Belästigungsreaktion durch Schienenlärm aufgrund variierender Vibrationsamplituden verstärkt werden *kann*. Es zeigt sich aber nicht notwendigerweise eine Abhängigkeit der Lärmbelastigungsbeurteilung vom Vibrationsausmaß. Vibration spielt für Schienenanwohner unter Berücksichtigung verschiedener Moderatorvariablen, so z.B. der Distanz zum Gleis, eine im wahren Sinne merkliche Rolle und macht damit die differierenden Ergebnisberichte verständlich.

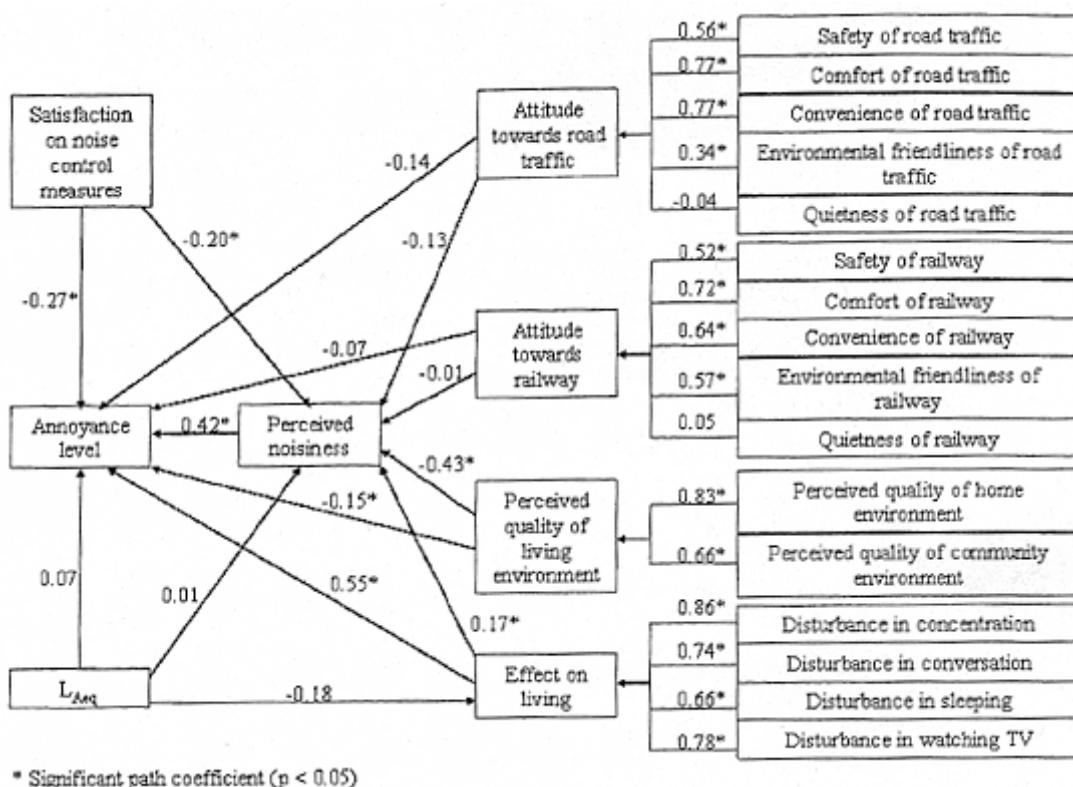
5.1.1.6 New-Infrastructure-Effect

Da die Aktualität und Rechtfertigung des Schienenbonus aktuelle Relevanz für diese Studie und ihren Kontext (Planung einer neuen Trasse von Offenburg nach Basel) hat, und dieser aber auf Felduntersuchungen basiert, die an bereits bestehenden Straßen-

und Schienengebieten ausgetragen wurden, soll hier auf den *New-Infrastructure-Effect* eingegangen werden. Dieser Effekt beschreibt die Situation, in der die Belästigung vor und nach der Einführung eines neuen Bahngleises oder einer neuen zusätzlich Lärm produzierenden Infrastruktur und demnach auch erhöhtem Lärmaufkommen untersucht wird.

Zu veränderten Belästigungsreaktionen in Folge neuer Bahnlinien können drei Untersuchungen im Review herangezogen werden (Lam und Au 2008; Lambert, Champelovier und Vernet 1998; Lambert, Champelovier und Vernet 1996).

In der Studie von Lam und Au (2008) wurde eine 11.4 km lange neue Schienenstrecke ausgebaut; die akustischen Veränderungen wurden durch Lärmkartierungsangaben gestellt, die durch Feldmessungen validiert wurden. 30 % der Anwohner haben einen Pegelanstieg um 2-4 dB(A), die Mehrheit des Rests nur 1 dB(A). Singulärer Straßenlärm wurde nun durch Schienenlärm ergänzt, der aber zumeist übertönt wurde vom angrenzenden Straßenlärm (nur in 0.2 % der Fälle ist Schienenlärm um 5 dB(A) lauter als Straßenlärm). Insgesamt nahm der Straßenverkehr auf den Hauptstraßen um 8 % zu, auf Nebenstraßen um 14 % ab, nach einem Jahr auf Hauptstraßen +12 %, auf Nebenstraßen -18%. Die durchschnittliche Belästigung sank um 0.37 auf der 7 Punkte Skala ($p < 0.001$). Im Follow Up (1 Jahr) kam es zu einem weiteren Niedergang um 0.65 Skalenunits. Die Pfadmodelle (siehe Abb. 70) lassen erkennen, dass Belästigung mehr durch diverse nicht-akustische Faktoren beeinflusst wird anstatt durch akustische, sowohl auf direktem als auch indirektem Weg. Diese Faktoren sind auch mit wahrgenommener Lautheit korreliert. Vor der Eröffnung der Bahnlinie spielten entweder direkt oder indirekt über wahrgenommene Lautheit drei Faktoren (wahrgenommene Qualität der Wohnumgebung, Zufriedenheit mit den Lärmschutzmaßnahmen und das Level der Lärmstörung von täglichen Aktivitäten) eine signifikante Rolle. Direkt nach der Eröffnung kam zu den drei Faktoren die Einstellung gegenüber der Bahnlinie dazu. Es zeigte sich, dass die Meinung über die Bahn nach der Eröffnung zunehmend positiver wurde. Nach einem Jahr sind alle zuvor genannten Parameter nicht mehr signifikant, das Niveau der Lärmstörung von täglichen Aktivitäten bleibt als einzige signifikante Variable zurück.



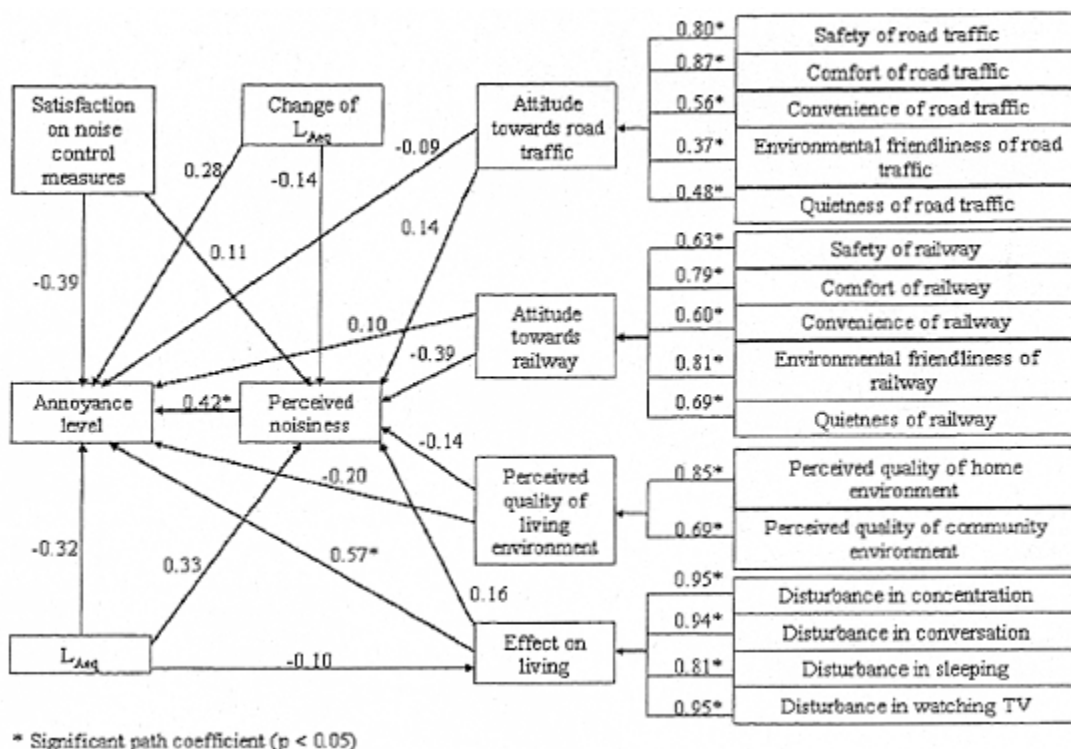
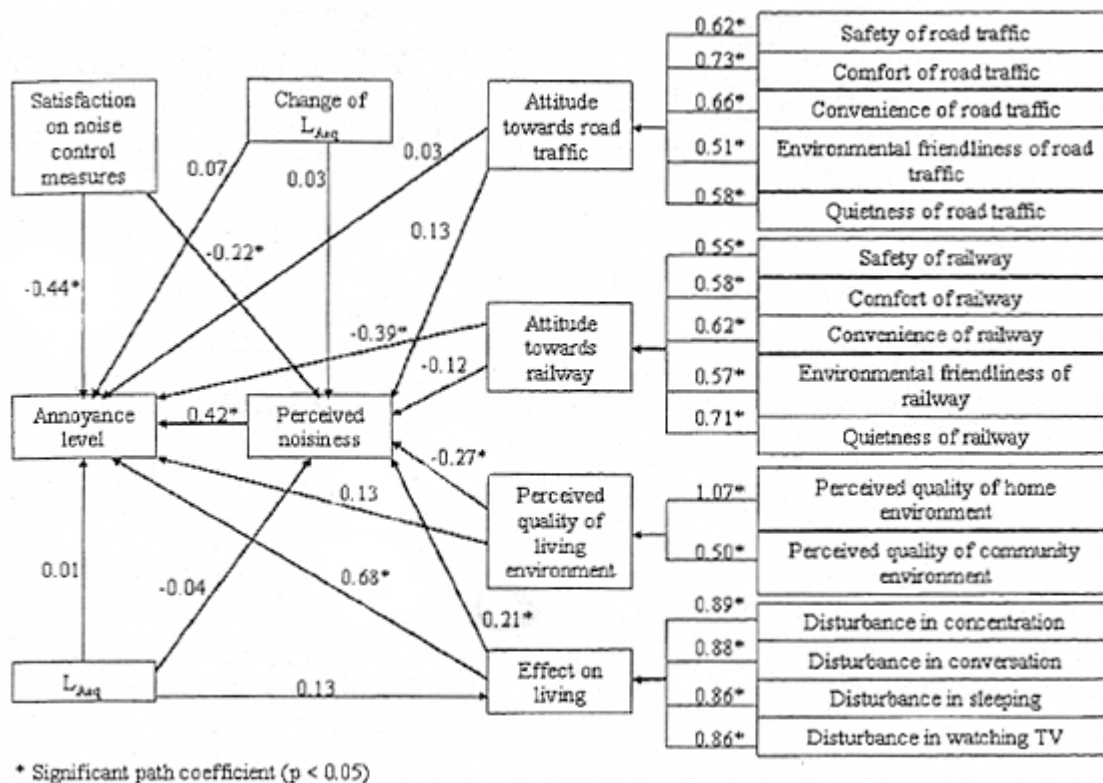


Abb. 70: Pfadmodelle zu drei Messzeitpunkten (Prä, Post und FU) der Eröffnung einer neuen Bahnlinie (Lam und Au 2008)

In der Studie von Lambert u. a. (1998) wird neben dem Vergleich der differierenden Belästigungsreaktion durch Straßen- und Schienenlärm auch der Vergleich der Unterschiede in der Belästigung zwischen neuen und bereits vorhandenen Verkehrssituationen durchgeführt. Der New-Infrastructure-Effect bestätigt sich; das heißt für eine gegebene Lärmquelle und einen gegebenen Lärmpegel scheint Lärmbelästigung

in neuen Bahngebieten höher zu sein als in bereits vorhandenen („neu“ bedeutet, dass eine neue Strecke während der Anwohnerschaft eröffnet wird; „bereits vorhanden“ bedeutet, dass das Gleis bereits da war bevor die Anwohner sesshaft wurden). Während bei Straßenlärm der Effekt bereits deutlich bei Lärmpegeln von $L_{\text{day}} = 54\text{-}57 \text{ dB(A)}$ auftritt, kommt es bei Schienenlärm erst bei $L_{\text{day}} = 60\text{-}67 \text{ dB(A)}$ zu einem deutlichen Anstieg der Belästigung in der neuen Bahnsituation (siehe Abb. 71).

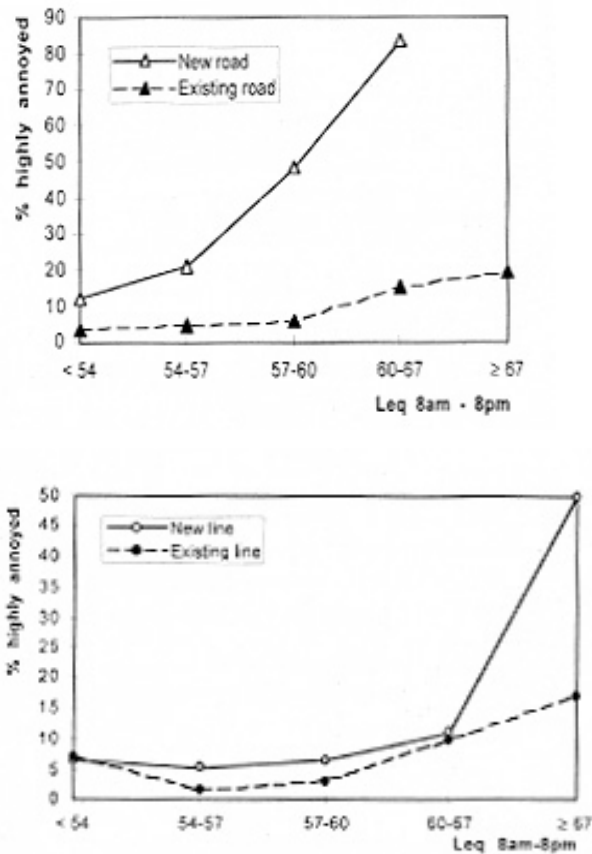


Abb. 71: New-Infrastructure-Effect (Lambert, Champelovier und Vernet 1998)

Zwar ist die Evidenz zum New-Infrastructure-Effect, welcher die Belästigung durch neu gebaute Verkehrswege stärker vermutet als durch bereits vorhandene, sehr eindeutig, doch mit lediglich zwei Primärstudien zu wenig repliziert und validiert und erhält auf Grund dessen die *Evidenzstufe 4 (+/-)*.

5.1.2 Psychische Variablen (N=14)

Unter psychischen Variablen im Zusammenhang mit Schienenlärm und der daraus resultierenden Belästigung sind kognitive (z.B. persönliche Einstellungen gegenüber dem Zug als Transportmittel) und/oder emotionale Aspekte (Zufriedenheit mit der Wohnumgebung in Bezug auf Schienenlärm) gemeint, die die Belästigungsreaktion beeinflussen können. Prinzipiell könnten diese auch unter dem Abschnitt 2. Moderatorvariablen subsumiert werden, sollen aber hier extern aufgeführt werden, um eine theoretische Parallele zum bereits behandelten Abschnitt der Verhaltensänderungen

in Folge auf die Belästigung durch Schienenlärm zu schaffen. In Tab. 15 sind die in diesem Abschnitt besprochenen Studien mit Autor und Jahr aufgeführt.

Tab. 15: Empirische Arbeiten zu psychischen Variablen

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Ali	2005
Andersen, Kühl & Relster	1983
Bonnefond u. a.	2008
Bronzaft & McCarthy	1975
Chan & Lam	2008
Evans, Lercher, Meis, Ising & Kofler	2001
Fields	1979
Griefahn, Damaschke, Künemund & Marks	2004
Griefahn, Marks & Basner	2006
Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Moehler & Mehnert	2000
Klæboe, Turunen-Rise, Hårvik & Madshus	2003
Lambert, Champelovier & Vernet	1993
Lambert, Champelovier & Vernet	1996
Lercher, Evans, Meis & Kofler	2002
Liepert, Moehler, Schreckenberger, Schuemer & Fastl	2005
Marks & Griefahn	2007
Meyer-Baron	2000
Möhler, Schuemer, Knall & Schuemer-Kohrs	1986
Niemann u. a.	2006
Öhrström	1997
Öhrström	1997
Öhrström & Skanberg	1996
Öhrström, Skanberg, Barregard, Svensson & Ängerheim	2005
Planungsbüro Obermeyer	1983
Sandrock, Griefahn, Kaczmarek, Hafke, Presi & Gjestland	2008
Schapkin, Falkenstein, Marks & Griefahn	2006
Tamura	1994
Vernet	1979
Vernet	1983
Yoshida & Nakamura	1988

Fields (1979) stellt in seiner großen epidemiologischen Felduntersuchung zu Schienenlärm und resultierender Belästigung keinen Zusammenhang zwischen allgemeinen Einstellungen gegenüber dem Zug als Transportmittel und Belästigung fest, doch aber Zusammenhänge zwischen Einstellungen gegenüber dem Zug als umweltbedingtem Ereignis, das in die Nachbarschaftsumgebung eindringt, ebenso wie Einstellungen gegenüber Schmutz, Geruch, Vibration des Zuges und dem Zug als potentielle Gefahr oder auch der Möglichkeit, den Schienenlärm zu reduzieren. In einer in ihrem Design und der Fragestellung ähnlich aufgezogenen Studie von Lambert u .a. (1996) stellt sich die Zufriedenheit mit vorgenommenen Lärmschutzmaßnahmen gegen Schienenlärm als belästigungsmindernder Aspekt heraus. Jene Anwohner, die nicht zufrieden sind, fühlen sich auch mehr belästigt. Meyer-Baron (2000) beschäftigt sich mit mehreren möglichen Einflussfaktoren (Schallpegel, Lärmempfindlichkeit, Bewertung des Schienenverkehrs als gefährlich, Wahrnehmung der Kontrolle, individuelle Bewältigungsversuche), die eine Auswirkung auf die Belästigung durch Schienenlärm

haben können. Von den subjektiven Faktoren wirken sich die Beurteilung des Schienenverkehrs als gefährlich und die mögliche Kontrollwahrnehmung aus. Die Kontrollwahrnehmung spielt vor allem bei der Gestörtheit am Tag, der Störung von Entspannung und von verschiedenen Aktivitäten (draußen) eine tragende Rolle. Mit zunehmender Beurteilung des Schienenverkehrs als gefährlich steigt die Gestörtheit, während der Eindruck, Einfluss auf den Lärm bzw. seine Wirkungen nehmen zu können, mit einem Absinken des Gestörtheitserlebens einhergeht. Umwelt- und personenbezogene Bewältigungsversuche erscheinen demgegenüber nicht geeignet, die Gestörtheit zu reduzieren.

5.1.3 Gestörtheit bei Aktivitäten (N=29)

Um unnötige Redundanz zu vermeiden werden in diesem Abschnitt des Reviews nur diejenigen Studienergebnisse berichtet, in denen direkt nach der Gestörtheit bei verschiedenen täglichen Aktivitäten (Kommunikation, Konversation, Telefonieren, Radio hören/TV schauen, Ruhe/Erholung innen/außen, Schlafstörungen, Lesen) gefragt wird und nicht jene, in denen die *Belästigung durch die Störung von Aktivitäten* erfragt wurde (siehe

Tab. 16). Diese sind im Abschnitt *Belästigung* zu finden.

Die Mehrzahl der Untersuchungen stimmen darin überein, dass subjektiv berichtete Störungen der Konversation, Störung beim Radio hören und Fernseh schauen, sprich Kommunikationsstörungen im Allgemeinen, die am häufigsten aufkommenden Störungen durch Schienenlärm betreffen (Ali 2005; Ahrlin 1988; Ahrlin und Rylander 1979; Fields 1979; Lambert, Champelovier und Vernet 1993; Lambert, Champelovier und Vernet 1996; Meyer-Baron 2000; Moehler 1985; Moehler 1986; Rylander u. a. 1977; Schreckenberg u. a. 2001; Schreckenberg u. a. 1999; Schuemer-Kohrs u. a. 1998).

Tab. 16: Empirische Arbeiten zu Gestörtheit

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Åhrlin	1988
Ali	2005
Ahrlin & Rylander	1979
Andersen, Kühl & Relster	1983
Fields	1979
Joncour, Cailhau, Gautier, Champelvoier & Lambert	2000
Kaku, Hiroe, Kuwano & Namba	2004
Klæboe, Turunen-Rise, Hårvik & Madshus	2003
Knall & Schümer	1983
Kurra, Morimoto & Maekawa	1999
Kuwano, Namba & Okamoto	2004
Lam, Chan, Chan, Au & Hui	2009
Lam & Au	2008
Lambert, Champelovier & Vernet	1993
Lambert, Champelovier & Vernet	1996
Leue, Schütte & Griefahn	2004
Liepert, Moehler, Schreckenberg, Schuemer & Fastl	2005
Meyer-Baron	2000
Möhler	1985
Möhler, Hegner, Schuemer & Schuemer-Kohrs	1996

Möhler, Schuemer, Knall & Schuemer-Kohrs	1986
Morihara, Sato & Yano	2004
Öhrström & Skanberg	1996
Öhrström, Skanberg, Barregard, Svensson & Ängerheim	2005
Planungsbüro Obermeyer	1983
Rylander, Björkman & Åhrlin	1977
Schreckenberger, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Griefhahn & Moehler	1999
Schreckenberger, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Möhler & Liepert	2001
Schuemer-Kohrs, Schuemer, Schreckenberger, Griefahn & Moehler	1998

Zusammenfassend kann sowohl ein Schienenbonus als auch ein Schienenmalus empirisch belegt werden, besonders in Studien aus den Arbeitsgruppen um Moehler (Moehler 1986; Schuemer-Kohrs u. a. 1998) und Schreckenberger (Schreckenberger u. a. 1999; Schreckenberger u. a. 2001). Moehler findet einen Schienenbonus (geringere Störwirkung des Schienenlärms gegenüber Straßenlärm) für allgemeine Störungen der Ruhe und Erholung in der Wohnung und der allgemeinen Störung über Tag und Nacht sowie subjektiv berichtete Schlafstörungen. Ein Schienenmalus findet sich für Störungen der Kommunikation innen und Störung der Erholung und Kommunikation außen. Diese Lästigkeitsunterschiede sind insgesamt bei Tagstörungen geringer als bei Störungen während der Nacht sowie geringer in den unteren Pegelbereichen.

Bestätigend fanden Schuemer-Kohrs u. a. (1998) für den Tag signifikant größere Gestörtheit während der Konversation innen und während des Radio/Musik/TV hörens für Schienenlärm. Für die Variablen totale Gestörtheit tagsüber und Erholung draußen war Straßenlärm dagegen schlimmer. Die nächtliche Belästigung, die auf Straßenlärm zurückgeht ist signifikant höher als jene für Schienenlärm für alle nächtlichen Belästigungsmaße (Abhalten vom Einschlafen, Aufwachen in der Nacht, Aufwachen am Morgen, totale Belästigung).

In zwei Studien von Schreckenberger u. a. (1999; 2001) partialisiert sich ein vergleichbarer Trend heraus. Für gleiche Lärmpegel ist Schienenlärm alles in allem weniger belästigend als Straßenlärm, aber bzgl. einiger spezifischer Aspekte störender. Es spiegelt sich folgendes Ergebnismuster wider:

- **Tagsüber:**

Belästigung, Kommunikation innen:	Schiene > Straße (sign.)
Gesamtstörung tagsüber:	Straße > Schiene (sign.)
Störung der Entspannung außen:	Straße > Schiene (n.s. $p < .02$)

- **Nachts:**

Gesamtstörung nachts:	Straße > Schiene (sign.)
	• Generelle Belästigung: Anteil "stark belästigt" (4 und 5 auf der 5 Punkte Skala) Straße > Schiene innerhalb jeder Lärmpegelklasse.

Rylander u. a. (1977) untersuchen in seiner Querschnittsstudie die Interferenz mit verschiedenen Aktivitäten (Konversation, Zuhören Radio/TV, Schlaf) und machen darauf aufmerksam, dass Schienenlärm den höchsten Anteil Belästigter während des "Radio/TV"

schauens (25 %) und Straßenlärm den höchsten Anteil während "Pause/Entspannung" (11 %) verursachte.

Öhrström u. a. (2005) schildern aus ihrer Feldstudie für die Störung von Aktivitäten durch Straßenlärm folgendes: Ein großer Prozentsatz (von $N = 1953$) deklariert die Unmöglichkeit, das Schlafzimmerfenster offen zu halten nachts und eine Störung der Unterhaltung/Erholung außen (53 %) während der höchsten Lärmpegel [61-70 dB(A)]. Die Unterbrechung der Erholung und Schlafqualität wird von 30 % in den 2 höchsten Pegelkategorien berichtet. Die am wenigsten gestörte Aktivität ist Kommunikation innen. Schienenlärm interferiert mit allen Aktivitäten auf höherem Niveau als Straßenlärm (Schienenmalus), besonders mit der Sprachkommunikation für innen und außen (70 % bei 61-72dB(A) (siehe Abb. 72).

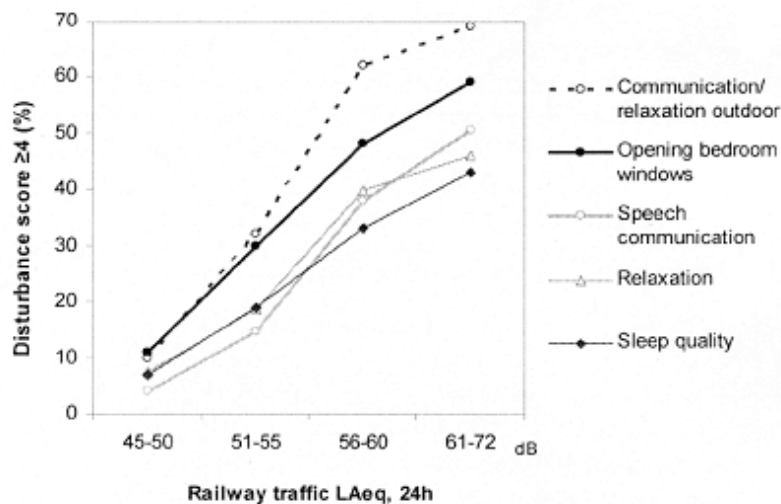
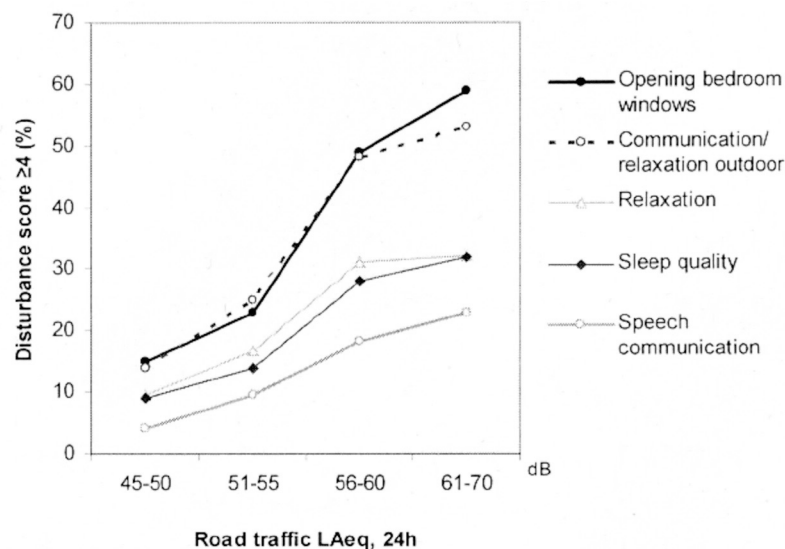


Abb. 72: Gestörtheit von Aktivitäten durch Straßen- und Schienenlärm (Öhrström u. a. 2005)

Meyer-Baron (2000) untersucht mehrere Prädiktoren in Bezug auf verschiedene Gestörtheitsurteile (Gestörtheit am Tag, Störung der Kommunikation, Störung der Entspannung/Konzentration, Störung von Aktivitäten draußen, Belästigung durch Schienenverkehrslärm). So zeigt sich, dass die Kontrollwahrnehmung und Bewertung des Schienenverkehrs neben dem Schallpegel als wichtigste Prädiktoren fungieren, wobei der Schallpegel den größten Varianzaufklärungsanteil übernimmt, vor allem für die

Störung der Kommunikation und bei der Störung von Aktivitäten draußen und der Gesamtgestörtheit am Tag. Die Kontrollwahrnehmung spielt vor allem bei der Gestörtheit am Tag, der Störung von Entspannung und der Störung von Aktivitäten draußen eine tragende Rolle. Mit zunehmender Beurteilung des Schienenverkehrs als gefährlich steigt die Gestörtheit, während der Eindruck, Einfluss auf den Lärm bzw. seine Wirkungen nehmen zu können, mit einem Absinken des Gestörtheitserlebens einhergeht. Umwelt- und personenbezogene Bewältigungsversuche erscheinen demgegenüber nicht geeignet, die Gestörtheit zu reduzieren. Auch die Lärmempfindlichkeit zeigt in diesem Prädiktorsatz nur eine untergeordnete Bedeutung für die Ausprägung der Gestörtheit.

Andere Studien berichten über Unterbrechungen von Ruhe/Erholung, Schlaf und Aufwachreaktionen durch Schienenlärm (Ahrlin und Rylander 1979; Fields 1979; Kaku u. a. 2004; Lambert, Champelovier und Vernet 1993; Lambert, Champelovier und Vernet 1996; Moehler 1985). Keine signifikanten Ergebnisse durch die Unterbrechung von Ruhe und Schlaf beschreiben Morihara u. a. (2004). Außerdem vergleichen sie die Gestörtheitsunterschiede zwischen nahen (Abstand zum Gleis >20m) und fernen Gebieten (Abstand zum Gleis >20m) von Schienenlärmanwohnern. Dabei zeigt sich, dass Telefonieren bei 60-65 dB(A) auf einem 5 % Level, bei 55-60 dB(A) auf einem 1 % Signifikanzniveau mehr in nahen Gebieten gestört wird. Vibration beim Radio/TV hören oder Belästigung allgemein durch Vibration ergibt keinen signifikanten Effekt, dennoch ist die Gestörtheit in nahen Gebieten größer als in fernen ab 55 dB(A) und mehr. Einschlafschwierigkeiten in nahen Gebieten sind signifikant erhöht bei 55-60 dB(A), diese Unterschiede sind aber nicht systematisch. Außerdem finden sich keine signifikanten Unterschiede für Aufwachreaktionen und Gestörtheit der Ruhe/Erholung zwischen nahen und fernen Gebieten sowohl für Schienen- als auch für Straßenlärm.

Die Korrelation zwischen dem Lärmpegel (L_{eq}) und der Gestörtheit während Gesprächen und Lesen sowie Schlafproblemen ist sehr gering bei Andersen u. a. (1983). Die Beziehung zwischen L_{max} und den Verhaltensvariablen Telefonieren, Radio/TV hören, Fenster öffnen Tag/Nacht, im Garten sitzen, allgemeines Wohlbefinden ist sehr gering [bei 85-90 dB(A) nur 0.35 erklärter Varianz der "strongly annoyed", L_{eq} hingegen erklärte 0.53 der "strongly annoyed" bei 50-65 dB(A)].

Die allgemeine Gestörtheit (Prozentsatz der „ziemlich oft oder immer Gestörten“) verhält sich nachts in einer Feldstudie von Joncour u. a. (2000) pegelunabhängig.

Lambert u. a. (1993; 1996) berichten in ihren Feldstudien mit jeweils 40 und 260 Bahnanwohnern, dass die Belästigung morgens und abends mit Spitzenwerten am Wochenende und im Sommer größer ist als in der Mitte des Tages. Haupteffekte betreffen Schlaf (besonders früh am Morgen), Konversation innen (44 %) und Fernseh schauen (36 %) [N = 40] nach der Eröffnung einer neuen Bahnlinie. In einer weiteren Untersuchung bestätigen sie die Hauptstörungen des Radio Hörens (34 %), Telefonierens (30 %), Gespräche föhrens innen (26 %), wenn die Fenster offen sind [N = 260]. 46 % sind allerdings niemals gestört, egal bei welcher Aktivität und trotz offener Fenster durch den TGV Atlantique (Train à grande vitesse).

Kurra u. a. (1999b) vergleichen in ihrer Laborstudie die Belästigung durch die Störung während des Lesens und Hörens, sowie die Veränderung der Belästigung, die dadurch auftritt, wenn Probanden gebeten werden, sich den gleichen Lärm im Labor anstelle daheim vorzustellen. Die Gestörtheit beim Lesen und Zuhören korreliert signifikant mit dem äquivalenten Dauerschallpegel für individuelle und gemittelte Gruppen-Daten mit dem Prozentsatz der *HA*, wobei die Gestörtheit beim Lesen höhere Korrelationen aufweist (größere Gestörtheit beim Lesen). Die Belästigungsmaße durch gestörtes Zuhören und gestörte Lesetätigkeit gleichen sich mit steigendem Pegel, ab 45 dB(A) steigt die Belästigung durch die Gestörtheit beim Lesen für den Prozentsatz der *HA* steiler an mit wachsendem Pegel. Bei 55 dB(A) sind 55 % mehr beim Lesen *highly annoyed* als beim Zuhören. Schienenlärm ist sowohl beim Lesen als auch beim Hören mit steigendem Pegel belästigender als die zwei anderen Quellen (Flug und Straße). Für die gestörte

Lesetätigkeit steigt mit 10 dB(A) die Belästigung linear. Für gestörtes Zuhören gibt es einen exponentiellen Anstieg über dem Lärmpegel. Der Typ der gestörten Aktivität hat demnach einen signifikanten Einfluss auf das individuelle Belästigungsausmaß. In der Regressionsanalyse wird die Belästigung durch gestörtes Lesen signifikant durch Schienenlärm vorhergesagt ($p < 0.0154$).

Ein anderer Aspekt des Schienenlärms, der auch bei der Belästigungsbeschreibung in den vorhergehenden Sektionen eine Rolle spielt, bezieht sich auf die hinzukommende Vibration. Klaboe u. a. (2003) finden, dass die am häufigsten gestörten Aktivitäten durch Schienenlärmvibration das Radiohören/Fernsehschauen betreffen, gefolgt von 10-15 % Ruhe-/Schlafbelästigung bei 0.1mm/s (sehr niedrig). Öhrström und Skånberg (1996) vergleichen in ihrer Feldstudie Schienenbahnanwohnergebiete, die Vibrationseffekten ausgesetzt sind oder nicht. So zeigte sich insgesamt, dass in Vibrationsgebieten die Häufigkeit der Störungsangaben 3-4x höher war als in vibrationsfreien Gebieten. Störung von Kommunikation draußen war die häufigste Belästigungsreaktion, gefolgt von Erholung draußen, Radio/TV hören und Erholung innen. Zudem ist eine starke Steigerung der Gestörtheit bei Spitzenpegeln über 80-85 dB(A) (auch in Gebieten mit Vibration) oder auch mit steigender Anzahl der Züge (in vibrationslosen Gebieten) zu verzeichnen (siehe Abb. 73).

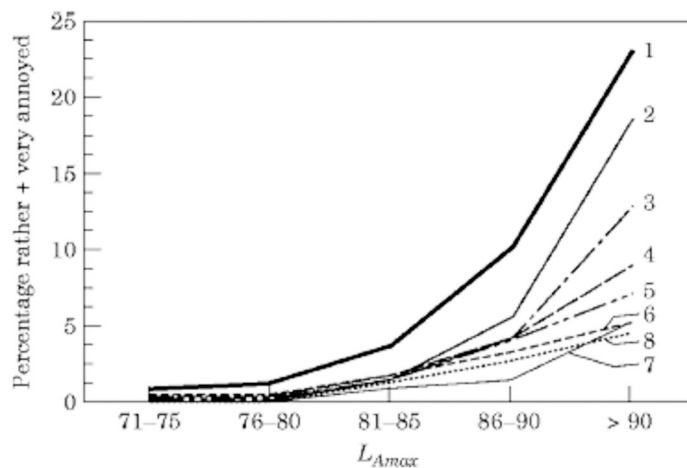


Abb. 73: Schienenlärmbedingte Gestörtheitsreaktion während verschiedener Aktivitäten (Öhrström und Skånberg 1996)

In zwei Pfadanalysen von Lam u. a. (2009; 2008) untersuchen sie das Ausmaß der empfundenen Belästigung durch die Faktoren Zufriedenheit mit der Wohnumgebung, Einfluss von Lärm auf tägliche Aktivitäten, Einstellung gegenüber Straßen- und Schienenverkehr als Transportmittel, Gebrauch der neuen Bahnlinie und wahrgenommene Lautheit.

In einem ersten (Lam und Au 2008) betrachten sie drei Messzeitpunkte (vor, unmittelbar nach und ein Jahr nach der Eröffnung einer neuen Bahnlinie), zu denen vorrangig nicht akustische Faktoren, die direkt oder indirekt über wahrgenommene Lautheit fungieren, eine Rolle für das Ausmaß an Belästigung spielen. Zum Präzeitpunkt hat die Störung alltäglicher Aktivitäten mit einem Pfadkoeffizienten von 0.68 den stärksten Effekt. Wahrgenommene Lautheit hat einen ebenfalls starken direkten positiven Effekt auf Belästigung mit 0.42. Dieses Muster bleibt erhalten in seiner Signifikanz für die Post Messung, wobei sich der Effekt der Zufriedenheit mit Lärmschutzmaßnahmen und Gestörtheit bei alltäglichen Aktivitäten vergrößert, während der Effekt durch die Qualität der Umgebung sich verkleinert. Beim Follow Up hat lediglich die wahrgenommene

Lautheit (0.42) und die Störung alltäglicher Aktivitäten (0.57) einen signifikant positiven Effekt.

In der zweiten Studie (Lam u. a. 2009) vergleichen sie drei Pfadmodelle, in denen jeweils Straßen- oder Schienenlärm als Lärmquelle dominieren mit einem dritten Modell, in denen beide Quellen gleiche Lautheit erfahren. In der Situation mit beiden Quellen gleicher Dominanz ist Belästigung stark beeinflusst durch die Störung täglicher Aktivitäten (s.+), verursacht vor allem durch Straßenlärm, weniger durch Schienenlärm. Die wahrgenommene Lautheit, verursacht vor allem durch Schienenlärm, wirkt weniger beeinflussend (s.+). In den getrennten Modellen für Straßen- und Schienenlärm sind beide Male wahrgenommene Lautheit und die Störung täglicher Aktivitäten wesentliche Einflussgrößen. Die Störung täglicher Aktivitäten ist wichtiger als die wahrgenommene Lautheit in der straßenlärmdominanten Gruppe verglichen mit jener, in der Schienenlärm dominiert; in der inversen Situation (Schienenlärm dominant) ist es umgekehrt (wahrgenommene Lautheit erscheint wichtiger als die Störung täglicher Aktivitäten), wobei in der straßenlärmdominanten Gruppe die Störung täglicher Aktivitäten vor allem auf Schienenlärm zurückgeführt wird.

Leue u. a. (2004) berichten über die Belästigung, die in einer Laborstudie durch die Vorstellung von schienenlärmgestörten Aktivitäten [1) über ein wichtiges Projekt sprechen 2) Telefonieren, 3) Radio/TV hören, 4) Lesen/konzentrieren 5) mit Freunden reden 6) Einschlafen 7) Nachts schlafen 8) Hausarbeiten verrichten] entsteht. Ohne eine detaillierte Berichterstattung der Autoren über die Angabe des jeweiligen Ausmaßes an Belästigung bei den genannten Aktivitäten zeigt sich, dass der Lärmpegel einen signifikanten Haupteffekt auf die Belästigung ($p < .01$) veranschlagt und dass Schienenlärm stärkere Belästigung auslöst als Straßenlärm ($p < 0.01$).

Zusammenfassend kann ein einheitlicher Schienenmalus für die Störung der Kommunikation in 13 Studien festgehalten werden. In allen anderen Störungsbereichen steht das Gestörtheitsurteil durch Schienenlärm zumeist hinter dem durch Straßenlärm. Insgesamt steigt die Gestörtheit mit steigendem Lärmpegel, zu empfindlichen Ruhezeiten wie am Wochenende, morgens wie abends, während des Sommers und bei offenen Fenstern.

Die Befundlage in dieser Sektion erhält das *Evidenzlevel 2 (++)* mit eindeutigen Befunden der Primärstudien in eine konkordante zweigeteilte Ergebnisrichtung. Im Vergleich Schienen- mit Straßenverkehr zeigt sich ein Schienenbonus für die allgemeine Störung der Ruhe und Erholung in der Wohnung, die allgemeine Störung über Tag und Nacht als auch die subjektiv berichteten Schlafstörungen. Ein Schienenmalus ergibt sich für die Störung der Kommunikation (Konversation, Radio Hören/TV schauen) innen und die Störung der Erholung und Kommunikation außen. Mit steigenden Pegeln steigen auch die berichteten Gestörtheitsurteile.

5.1.4 Schlaf (N=39)

Die Literaturrecherche hat 39 Einzelarbeiten ergeben, die sich mit den Folgen von nächtlichem Schienenlärm auf den Schlaf oder aus den Schlafstörungen entstandenen Konsequenzen in der Zeit nach dem Erwachen beschäftigen (siehe Tab. 17). Diese Studien werden in den folgenden Abschnitten inhaltlich zusammengefasst. Der

Datenpool kann in 20 Feldstudien, 17 Laborstudien ¹⁸, eine sekundärstatistische Auswertung einer Feldstudie und eine Metaanalyse unterteilt werden. Die Metaanalyse umfasst 24 Studien, von denen sich aber lediglich fünf Studien unter anderem auf Schienenlärm beziehen. Ein Großteil dieser Studien analysiert die Unterschiede in den Reaktionen auf die drei Verkehrslärmarten Straßen-, Schienen- und Fluglärm. Da im Rahmen dieses Reviews jedoch nur der Schienenlärm und damit vor allem der Schienenbonus von Interesse ist, wird im Weiteren hauptsächlich auf den Vergleich zwischen Schienen- und Straßenlärm eingegangen.

Tab. 17: Empirische Arbeiten zu Schlaf

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Aasvang u. a.	2008
Aasvang, Engdahl & Rothschild	1981
Ali	2005
Andersen, Kühl & Relster	1983
Basner, Elmenhorst, Maas, Müller, Quehl & Vejvoda	2008
Bonnefond u. a.	2008
Griefahn u. a.	2008
Griefahn, Damaschke, Künemund & Marks	2004
Griefahn & Marks	2006
Griefahn, Marks & Basner	2006
Griefahn, Marks & Robens	2008
Griefahn, Marks & Robens	2006
Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Moehler & Mehnert	2000
Kaku, Hiroe, Kuwano, Namba	2004
Knall & Schümer	1983
Liepert, Möhler, Schuemer & Griefahn	1999
Marks & Griefahn	2004
Marks & Griefahn	2007
Marks, Griefahn & Basner	2007
Marks, Griefahn, Künemund & Basner	2007
Miedema & Vos	2007
Möhler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000
Möhler	1985
Möhler & Knall	1983
Moehler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000
Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberger, Mehnert & Griefahn	2000

¹⁸ Bei den Primärstudien ist davon auszugehen, dass hier die Daten desselben Experimentes oder derselben Laborstudie hin und wieder in mehreren Publikationen hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte publiziert wurden. Ohne Unterstützung der Studienautoren ist es jedoch nur schwer zu unterscheiden, ob es sich bei zwei ähnlichen Studiensettings um dasselbe oder ein sehr ähnliches Nachfolgeexperiment handelt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass der vorliegende Datensatz Redundanzen enthält.

Möhler, Schuemer, Knall & Schuemer-Kohrs	1986
Öhrström	1997
Öhrström, Ögren, Jerson & Gidolf-Gunnarsson	2008
Öhrström & Skanberg	1996
Öhrström, Skanberg, Barregard, Svensson & Ängerheim	2005
Planungsbüro Obermeyer	1983
Quehl & Basner	2008
Saremi u. a.	2008
Schapkin, Falkenstein, Marks & Griefhahn	2006
Vernet	1979
Yano	1998
Yano, Murakami, Kawai & Sato	1998
Yoshida & Nakamura	1988

Diese Vorgehensweise liegt darin begründet, dass die zwei genannten Lärmarten den gleichen Immissionsgrenzwerten in der 16. Bundes Immissions-Schutzverordnung unterliegen.

Die Mehrheit der oben genannten Studien behandelt nicht nur die nächtliche Lärmbelastung und die damit verbundenen möglichen Schlafstörungen sowie deren Sekundärfolgen, sondern auch andere Lärmwirkungen wie z.B. allgemein wahrgenommene Belästigung oder die Störung der Kommunikation. Die Ergebnisse zu diesen Themen werden jedoch in den jeweiligen Kapiteln separat besprochen, so dass im Folgenden nur auf die Störungen des Schlafs eingegangen wird. Die Störung der Konzentration, der Leistung oder die Auswirkungen auf das hormonelle bzw. autonome System zählen zwar auch zu den Sekundärreaktionen, bzw. zu den Primärreaktionen der Schlafstörungen, werden allerdings in eigenen Kapiteln besprochen. Die Besprechung der Studien findet entlang der diesen Abschnitt einführenden Gliederung statt.

5.1.4.1 Feldstudien (N=20)

Die gesammelten Feldstudien wurden im Zeitraum von 1979 (Vernet 1979) bis zu den aktuellsten Studien aus dem Jahr 2008 (Aasvang, Moum und Engdahl 2008) durchgeführt. Sie befassen sich mit einem Vergleich zwischen Schienen-, Straßen- und evtl. Fluglärm bezüglich der Auswirkungen der Lärmbelastung auf den Schlaf (N=12), bzw. behandeln ausschließlich die Schlafbeschwerden durch nächtlichen Schienenlärm (N=6). Nachdem kurz allgemein auf die übergeordneten Gemeinsamkeiten der Studien und generelle, zu beachtende Anmerkungen vorweg gestellt werden, vor allem bezüglich der Messung und Umsetzung der abhängigen (Lärm) und unabhängigen Variablen (Schlaf), geht es in diesem Abschnitt vorrangig um die Ergebnisdiskussion der einzelnen Subkategorien der Schlafstörungen in vier Untersektionen (Subjektiv empfundene Schlafstörungen, berichtete Einschlafschwierigkeiten, berichtete Aufwachreaktionen, Aktimetrie zur Messung der nächtlichen Körperbewegung).

Die Studien verwenden allesamt den Mittelungspegel ($L_{24hr, day/night, 1h}$) als unabhängige Variable. Außerdem muss unterschieden werden, ob in den Studien der Außen- oder Innenpegel verwendet wird. Des Weiteren wird in einigen Studien zusätzlich der Maximalpegel, die Anzahl der Lärmereignisse und der Vorbeifahrpegel angegeben. Der direkte Vergleich der Studien auf einer quantitativen Ebene erweist sich aufgrund der unterschiedlichen Messparameter als unmöglich und kann lediglich approximativ geleistet werden.

Der Mehrheit der Feldstudien ist, im Gegensatz zu den Laborstudien mit künstlichem Setting, gemeinsam, dass die Probanden dem Verkehrslärm in ihrer Wohnung tatsächlich ausgesetzt sind. Eine Ausnahme bildet die Studie von Kaku u. a. (2004)), in der die meisten Probanden in ruhiger Umgebung lebten und der Verkehrslärm mit Hilfe eines CD-Players imitiert wurde.

Die in den restlichen Studien angegebenen Lärmpegel werden teilweise quellspezifisch errechnet (Öhrström u. a. 2005), teilweise gemessen (Moehler 1986) und bei einigen Studien sowohl berechnet, als auch mit einem stichprobenhaften, gemessenen Wert kontrolliert (Griefahn u. a. 2000). In einer dieser Studien zeigt sich, dass der gemessene Innenraumpegel nicht mit dem errechneten quellspezifischen Wert übereinstimmt, sondern diesen überschreitet (Griefahn u. a. 2000).

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Liepert u. a. (1999), die angeben, dass der gemessene Wert um bis zu 20 dB(A) über dem quellspezifischen, errechneten Wert liegt (siehe Abb. 74).

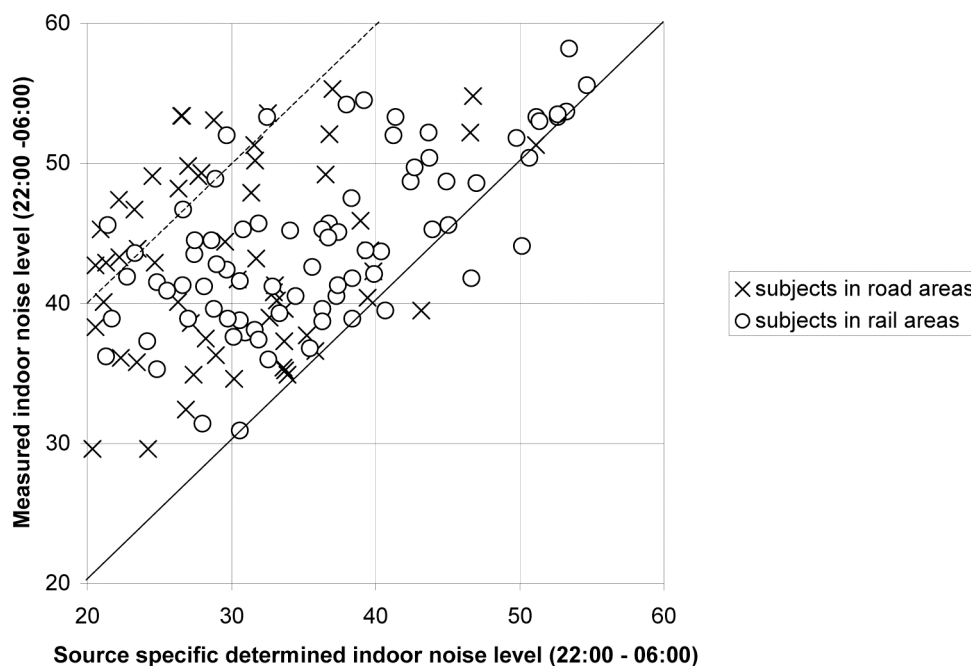
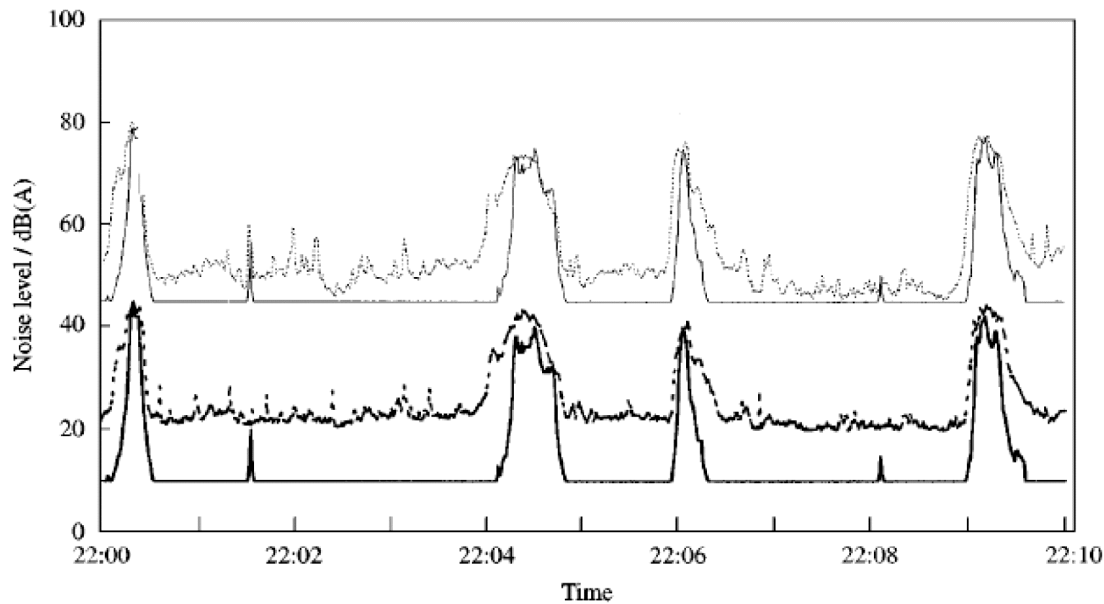


Abb. 74: Vergleich des gemessenen Wertes (innen) und des quellspezifischen berechneten Wert (innen) während der Schlafenszeit (Liepert u. a. 1999).

Dieser Aussage widersprechen Moehler u. a. (2000) mit ihrer Studie aus dem Jahr 2000, bei welcher der gemessene Wert, wenn auch nur geringfügig, im Mittel unter dem errechneten Wert liegt (siehe Abb. 75).



(oben: Außenpegel, unten: Innenpegel)

Abb. 75: Vergleich des gemessenen Wertes, und des errechneten Wertes _____, (Moehler, Liepert, Schuemer und Griefahn 2000)

Zwei weitere Studien geben an, in einigen Bereichen Kontrollmessungen durchgeführt zu haben, machen jedoch keine weiteren Angaben bezüglich des Unterschiedes zwischen den Werten (Öhrström 1997a; Yano u. a. 1998)

Ein Teil der Studien, die sich mit dem Vergleich von Schienen- und Straßenlärm befassen, beschreiben einen von der Tageszeit abhängigen Unterschied zwischen den Profil von Schienen- bzw. Straßenlärm ($N=6$). Ausnahmslos kommen sie zu dem Ergebnis, dass Schienenlärm 24 Stunden lang konstant ist, während es beim Straßenlärm in der Nacht zu einer Abnahme des Lärmpegels kommt. Der Mittelungspegel in der Nacht für Straßenlärm vermindert sich durchschnittlich um 8 bis 10 dB(A) (z.B. Griefahn u. a. 2000) (siehe Abb. 76).

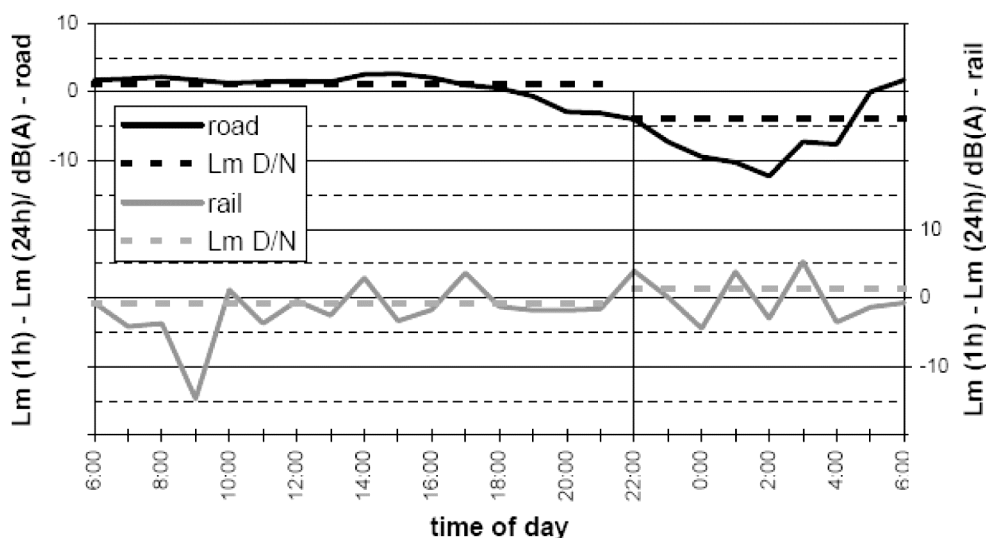


Abb. 76: Struktur des Mittelungspegels (1h) für den Tag und den Nachtzeitraum von Schienen- und Straßenlärm (Liepert u. a. 1999).

Des Weiteren schildern vier dieser Studien, dass Schienenlärm in der Nacht einen höheren Pegel aufweist als Straßenlärm. So geben Griefahn u. a. (2000) an, dass die Wohnbereiche mit dominierendem Schienenlärm bis zu 7 dB(A) lauter sind als die mit dominierenden Straßenlärm. Liepert u. a. (1999) verweisen auf Mittelungspegel in der Nacht von 50-70 dB(A) für Schienenlärmgebiete und von 40-50 dB(A) für die des Straßenlärms. In der Studie von Moehler u. a. (2000) wird der Schienenlärm nachts mit 50-70 dB(A) angegeben und für Straßenlärm mit 40-70 dB(A).

In Bezug auf die abhängigen Variablen behandeln die Studien unterschiedliche Fragestellungen, die sich zu diesem Themenkomplex in unterschiedliche Teilbereiche wie folgt gruppieren lassen:

1. Subjektiv empfundene Schlafstörungen (N=13)
2. Berichtete Einschlafschwierigkeiten (N=8)
3. Berichtete Aufwachreaktionen (N=8)
4. Aktimetrie zur Messung der nächtlichen Körperbewegung (N=4)

Die ersten drei Parameter werden zu den primären Reaktionen der Schlafstörungen gerechnet (vergleiche dazu Abschnitt 3.6.2) und werden zum Teil aus persönlichen Interviews (z.B. Liepert u. a. 1999) und zum anderen aus Fragebögen ermittelt (z.B. Ohrström u. a. 2005).

Im Bezug auf diese Ergebnisse, ist es wichtig zu erwähnen, dass sowohl die Interviews als auch die Fragebögen einmalig retrospektiv durchgeführt werden. De facto beinhalten diese Studien zumeist eine sehr große Stichprobe, wobei die Probanden über einen ein- bis zweiwöchigen Zeitraum jeden Morgen nach dem Erwachen und häufig auch abends vor dem Zubettgehen einen Fragebogen bearbeiten.

In der Studie von Griefahn (2000) beispielsweise werden 1600 Probanden unter anderem einmalig über Einschlafschwierigkeiten, nächtliches Erwachen, frühzeitiges Erwachen am Morgen und subjektive Schlafbeschwerden befragt. Von diesen füllen 377 Probanden zehn Tage lang jeden Morgen und jeden Abend Fragebögen über die quantitativen und qualitativen Schlafparameter aus. Mit Hilfe der Fragebögen berichten die Studienteilnehmer morgens über ihre Anspannung und Müdigkeit, die Einschlafzeit, das subjektive Schlafverhalten und das nächtliche Erwachen. Zusätzlich wird nach der nächtlichen Fensterstellung gefragt. In den abendlichen Fragebögen wird nach der aktuellen Anspannung und Müdigkeit, nach mentalem und emotionalem Stress, nach der Anspannung und der Müdigkeit während des Tages sowie nach Alkohol- und/oder Drogenkonsum gefragt (Griefahn u. a. 2000).

Dem gegenüber erfragen Moehler und Knall (1983) z.B. die Belästigung in der Nacht, wie die subjektiv empfundene Störung des Schlafes und der Gesundheit nur mittels einmaliger persönlichen Interviews. Ein anderes Beispiel sind Kaku u. a. (2004), in deren Studie zwölf Probanden für zehn Tage nach dem Erwachen mittels eines Fragebogens über ihren Schlaf der letzten Nacht befragt werden, jedoch zuvor kein retrospektives Interview durchgeführt wurde.

Die einzige objektive Erhebung der untersuchten Parameter in den Feldstudien kommt durch die Verwendung eines Aktimeters zu Stande, welcher die Körperbewegungen in der Nacht misst. Der Aktimeter ist ein kleines Gerät, das am Handgelenk getragen wird um die Bewegungsdaten aufzuzeichnen und zu speichern (z.B. Moehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000). Im Rahmen der Studie aus dem Jahr 2000 überprüfen Moehler u. a. (2000) die Validität des Aktimeters mit Hilfe einer Kontrollgruppe. Bei diesen Probanden wird zusätzlich eine Polysomnographie aufgezeichnet. Dabei stimmen 82 % (Sensitivität der Aktimetrie) der durch die Aktimetrie bestimmten Bewegungsaufzeichnungen mit denen der Polysomnographie überein. Die

Übereinstimmungen der Zeiten ohne registrierte Bewegungen beträgt 76 % (Spezifität des Aktimeters).

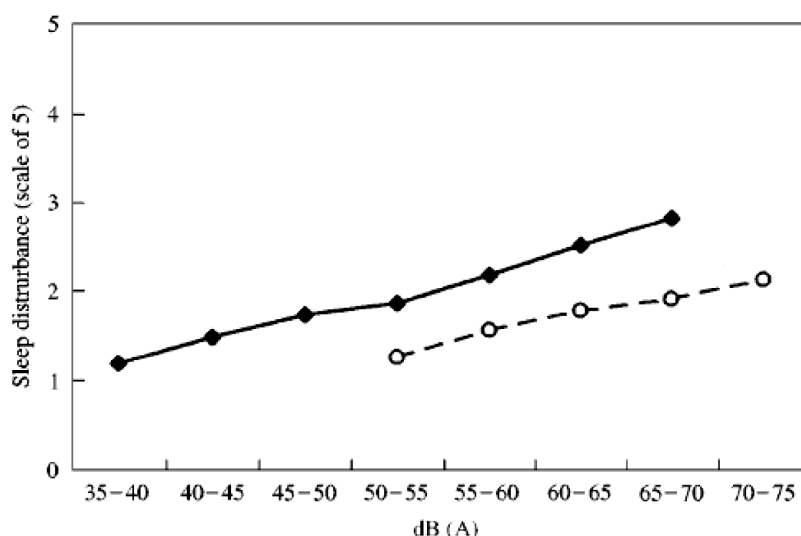
Gesondert ist die Studie von Vernet (1979) zu beachten, da diese als einzige das Polysomnogramm zur objektiven Messung der Schlafstörungen im Feldsetting verwendet. (Dieses aufwendige und kostenspielige Verfahren wird zumeist nur unter Laborbedingungen eingesetzt). So kommt diese Studie zu dem Ergebnis, dass bei dem gleichen äquivalenten Dauerschallpegel eine dreimal höhere Störung des Schlafes auf Straßenlärm zurückzuführen ist im Vergleich mit Schienenlärm. Jedoch berichtet sie ebenfalls, dass in der separaten Betrachtung von Schienenlärm unabhängig von einem Vergleich mit Straßenlärm, die ausgelöste Schlafstörung merklich mit dem Pegel sinkt (Vernet 1979).

Subjektive Schlafbeschwerden (N=13)

Der Zusammenhang zwischen der Geräuschbelastung und den subjektiv erfragten Schlafbeschwerden wird in 13 Studien behandelt. Aufgrund der heterogenen Darstellung der Ergebnisse in den einzelnen Arbeiten ist es nicht möglich die Studien, die den Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten untersuchen mit denen die sich nur mit Schienenlärm befassen, gemeinsam darzustellen, so dass diese Themengebiete getrennt voneinander erörtert werden.

Auf den Unterschied zwischen den Verkehrslärmarten bezüglich der subjektiv erfragten Schlafbeschwerden gehen sieben Studien ein.

Von diesen Studien kommen fünf zu dem Ergebnis, dass Straßenlärm den Schlaf stärker stört als Schienenlärm bei gleichem Mittelungspegel (siehe Abb. 77). In dem Sinne verweisen Griefahn (2000), Moehler (2000), Knall (1983) und die Interdisziplinäre Feldstudie II auf einen klaren Schienenbonus des Zuglärms gegenüber dem Straßenlärm, welcher zwischen 11,9 und 13,6 dB(A) schwankt (Griefahn u. a. 2000; Knall und Schuemer 1983; Moehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000; Planungsbüro Obermeyer 1983). Moehler und Knall (1983) geben einen positiven linearen Zusammenhang zwischen dem äquivalenten Dauerschallpegel und subjektiv berichteten Schlafstörungen an, wobei Straßenlärm ($r = +0,78$) bedingt korreliert und Schienenlärm ($r = +0,23$) lediglich eine geringe Korrelation aufweist.



(- - - Schlafstörung durch Schienenlärm; ——— Schlafstörungen durch Straßenlärm)

Abb. 77: Spezifische Schlafstörung durch verschiedene Lärmquellen im Zusammenhang zum äquivalenten Dauerschallpegel (Moehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000)

Es ist zu beachten, dass die Schlafbeschwerden ausnahmslos retrospektiv erfragt werden. Zum Vergleich befragen Griefahn (2000) und Moehler (2000) zusätzlich sowie Kaku u. a. (2004) ausschließlich die Probanden direkt nach dem Erwachen mittels Fragebogen. Die ersten beiden Autoren berichten über keine signifikanten Unterschiede zwischen Straßen- und Schienenlärm (Griefahn u. a. 2000; Moehler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs u. a. 2000). Moehler u. a. (2000) erklären Divergenzen in den Ergebnissen der in einmaligen Interviews erfragten Schlafstörungen und den morgendlichen Angaben der Probanden damit, dass die retrospektiven Angaben als Ausdruck der in der Wachzeit erlebten Belästigungen und Störungen durch Verkehrslärm und nicht als Schlafstörung direkt interpretiert werden müssen. Diese Annahme wird auch durch Untersuchung der Körperbewegung mittels eines Aktimeters bestätigt, in der ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verkehrslärmarten gefunden werden können.

Die sekundärstatistische Auswertung der Interdisziplinären Feldstudie II kommt zu dem Ergebnis, dass die Störung des Schlafes durch Schienenlärm geringer ist als durch Straßenlärm mit einem Bonus für den Zugverkehr von 10-20 dB(A), ohne Relevanz der Fensterstellung (Moehler 1985).

Die einzige Metaanalyse über den Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und Schlafstörungen kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass Straßenlärm störender für den Schlaf empfunden wird als Schienenlärm, sowie dass Fluglärm die subjektive Schlafempfindung am stärksten beeinträchtigt (Miedema und Vos 2007). In dieser Metaanalyse werden 24 Feldstudien aus verschiedenen, auch außereuropäischen Ländern zusammengefasst und der Prozentsatz der subjektiven Schlafbelästigung in Form einer dreistufigen Unterteilung (% Highly sleep disturbed, % sleep disturbed, % a little sleep disturbed) über dem durchschnittlichen Nachtlärmpegel $L_{\text{night},23-7h}$ von den drei Verkehrslärmquellen Flug-, Straßen- und Schienenlärm berichtet. Die Übersetzung der verschiedenen Antwortkategorien für die subjektive Schlafbelästigung aus den 28 Datensätzen in ein vergleichbares Maß, das schließlich in einer Funktion über dem Lärmpegel abgetragen werden kann, erfolgt durch die Transformation der primären Werte in eine Skala von 0 – 100. Die Cut-Off-Werte liegen bei 72 [= highly sleep disturbed], 50 [= sleep disturbed] und 28 [(at least) a little sleep disturbed]. Der Expositionsrange reicht von 45-65 dB(A) an der meist beschallten Fassade des Hauses. Alles in allem zeigt sich, dass Fluglärm mit mehr selbst berichteten Schlafstörungen assoziiert ist als Straßenlärm, gefolgt von Schienenlärm. Außerdem zeigt sich eine umgedrehte u-förmige Beziehung zwischen lärminduzierten Schlafstörungen und dem Alter, mit der stärksten Reaktion zwischen 50 und 56 Jahren.

Ergebnisse in eine entgegen gesetzte Richtung beschreibt Kaku u. a. (2004), in deren Untersuchung sich 50 % der Probanden bei 35 dB(A) (Innenpegel) durch Schienenlärm und 50 % der Probanden erst bei einem Innenpegel von 40-45dB(A) durch Straßenlärm im Schlaf gestört fühlen. Jedoch lebten die Testpersonen eher in ruhigen Gegenden und der Verkehrslärm wurde mit Hilfe eines CD-Players nachgestellt.

Auch die Studie von Öhrström u. a. (2005), welche die Schlafstörungen ebenfalls anhand retrospektiver, einmaliger Interviews erfassen, kommt zu dem Ergebnis, dass ab einem Mittelungspegel von 50 dB(A) mehr Personen durch Schienenlärm als durch Straßenlärm gestört sind. Unter 50 dB(A) fühlen sich mehr Betroffene durch Straßenlärm im Schlaf gestört.

Die Studien, die sich allein mit Schienenlärm (N=5) anstelle eines Vergleichs befassen, geben häufig lediglich Korrelationen zwischen den Lärmpegeln (L_{eq} , L_{max}) und den Schlafstörungen an. Yoshida und Nakamura (1988) berichten über eine Dosis-Wirkungsbeziehung mit einem Anstieg der Schlafstörungen ab 60dB(A) und einer stärkeren Steigung der Kurve ab 70dB(A). Dagegen sehen Andersen u. a. (1983) nur eine geringe Korrelation zwischen den beiden Variablen. Öhrström (1997b) schildert in ihrer Studie, dass nur wenige Probanden über Schlafstörungen klagen; die untersuchten Pegel

liegen für den äquivalenten Dauerschallpegel zwischen $L_{eq} = 40-70$ dB(A) und für den Maximalpegel zwischen $L_{max} = 65-95$ dB(A). Aasvang, Moum und Engdahl (2008) sowie Ali (2005) geben beide den Prozentsatz (8 %; bzw. 35,4 %) der Probanden an, die bei den untersuchten Lärmpegeln ($L_{eq} = >44 - <65$ dB(A); bzw. $L_{eq} = 82,7 - 93,7$ dB(A)) über Schlafstörungen berichten.

Berichtete Einschlafschwierigkeiten (N=8)

Der Unterschied in den Einschlafschwierigkeiten zwischen Schienen- und Straßenlärm wird zwar häufig erfragt, jedoch wird ebenso oft der Ergebnisbericht ausgespart (Öhrström u. a. 2005; Yano 1998), oder es wird in Kombination mit dem nächtlichen Erwachen in einem Index zu subjektiven Schlafstörungen zusammengefasst. So z.B. bei der Interdisziplinären Feldstudie II, in welcher der Parameter „Schlafstörung“ aus den Kategorien 1. „*Hindert am Einschlafen*“ und 2. „*Weckt einen Nachts auf*“ (Planungsbüro Obermeyer 1983) bestimmt wird. Wenn auch nicht immer genauere Ergebnisse für die einzelnen Fragestellungen angegeben werden, zeigt sich dennoch eine klare Tendenz in Richtung Schienenbonus, indem sich zeigt, dass in der IF II z.B. die berichteten Einschlafschwierigkeiten durch Straßenlärm stärker ausgeprägt sind als durch Schienenlärm (Planungsbüro Obermeyer 1983). Lediglich die Studie von Griefahn u. a. (2000) geben einen genauen Wert (10,7 dB(A)) für den Schienenbonus bei Einschlafschwierigkeiten an.

Anders liegt dies bei den Studien, die sich nur mit dem Schienenlärm befassen. Aasvang u. a. stellen in ihren Studien von 2007 und 2008 Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen den Lärmpegeln (L_{eq} , L_{max}) und den selbst berichteten Einschlafschwierigkeiten auf.

Öhrström und Skånberg (1996) berichten, dass die Probanden ab einem Maximalpegel von 81 dB(A) über Einschlafschwierigkeiten klagen, und dass diese mit der Anzahl der Züge proportional steigen. Ebenso beschreiben Yoshida und Nakamura (1988), dass bei einem äquivalenten Dauerschallpegel von 70-79 dB(A), 15,5 % der Probanden über Einschlafschwierigkeiten klagen.

Berichtete Aufwachreaktionen (N=8)

Die berichteten Aufwachreaktionen werden zumeist gemeinsam mit den Einschlafschwierigkeiten behandelt. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass in der Überzahl der Studien, die einen Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten anstreben, keine separaten Angaben über die Ergebnisse gemacht werden. Nichts desto trotz kann auch hier eine ähnliche Tendenz festgestellt werden in dem Sinne, dass Aufwachreaktionen durch Straßenlärm im Vergleich mit Schienenlärm häufiger berichtet werden. Darüber hinaus gibt gleichwohl auch nur die Studie von Griefahn (2000) einen exakten Schienenbonus von 11,1 dB(A) an.

Vier Referenzen in diesem Unterabschnitt befassen sich ausschließlich mit dem Zusammenhang zwischen Aufwachreaktionen und Schienenlärm ohne einen direkten Vergleich mit anderen Quellen anzustellen. Alle diese Studien berichten über lärmbedingte Aufwachreaktionen bei den Probanden. So geben Aasvang, Engdahl und Rothschild (1981) an, dass insgesamt 4 % der 307 Probanden über Aufwachreaktionen berichten, wobei ab einem Innenpegel von über 42 dB(A) die Zahl auf 30 % ansteigt. Ab einen Maximalpegel von 81-85 dB(A) bestehen in der Studie von Öhrström und Skånberg (1996) signifikante Aufwachreaktionen und Yoshida und Nakamura (1988) stellen bei 19 % (N=830) der Probanden nächtliches Aufwachen ab einem Außenpegel von 70-79 dB(A) fest, ebenso wie eine hohe Korrelation des Lärmpegels mit der subjektiven Bewertung der Gesundheit.

Vermehrte Körperbewegung/Aufwachreaktionen (Aktimeter)

Ein Aktimeter zur Erfassung der nächtlichen Körperbewegungen wird in vier Studien verwendet. All diese behandeln den Vergleich zwischen Schienen- und Straßenlärm. Zwei dieser Arbeiten stellen keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der Aufzeichnungen des Aktimeters zwischen den Verkehrsarten fest (Griefahn u. a. 2000; Moehler, Liepert, Schuemer und Griefahn 2000). Des Weiteren berichten Moehler u. a. (2000) zusätzlich, dass durch die Messungen des Aktimeters keine pegelabhängigen Schlafstörungen ermittelt werden können. Dagegen steigt in der Studie von Kaku u. a. (2004) die Inzidenzrate für Aufweckreaktionen, die mit Hilfe des Aktimeters gemessen werden, bei einem äquivalenten Dauerschallpegel von 50dB(A) an. Ein vergleichbares Ergebnis kann bei Straßenlärm nicht festgestellt werden. Liepert u. a. (1999) berichten im Methodenabschnitt ihrer Feldstudie aus dem Jahr 1999 zwar über Aktimetermessungen, jedoch nicht über deren Ergebnisse.

5.1.4.2 Laborstudien N=(17)

Die 17 identifizierten Laborstudien weisen in ihrem (methodischen und implementierten) Design überwiegend Ähnlichkeiten auf. Die Studienteilnehmer werden gebeten für einen bestimmten Zeitraum im Schlaflabor zu übernachten und schließlich morgens und eventuell abends standardisierte Fragen über ihre subjektive Gesundheit, ihr allgemeines Wohlbefinden und ihren Schlaf zu beantworten. Zur objektiven Erfassung der gewünschten Parameter dient die Polysomnographie (z.B. Basner u. a. 2008). Der Verkehrslärm als unabhängige Variable wird über Lautsprecher in ein isoliertes Schlaflabor eingespielt. Oftmals gibt es im Gegensatz zu den Feldstudien eine Kontrollgruppe in Form expositionsfreier Ruhenächte, die einen intra-individuellen Vergleich der Lärm- und Ruhenächte erlauben, um die lärmbedingten Auswirkungen auf den Schlaf zu beobachten. Ähnlich wie in den Feldstudien behandelt ein Großteil der Laborstudien den Unterschied der Effekte auf den Schlaf, die auf die drei Verkehrslärmarten Schienen-, Straßen- und Flugverkehr (N=13) (z.B. Quehl und Basner 2008) zurückzuführen sind, und lediglich ein kleinerer Teil (N=4) befasst sich ausschließlich mit den Auswirkungen des Schienenlärms (z.B. Bonnefond u. a. 2008).

Als unabhängiges Maß wird der Mittelungspegel eingesetzt, ebenso wie unterschiedliche Maximalpegel. Des Weiteren sind in einigen Studien außerdem die Anstiegssteilheit des Lärmprofils, die Dauer der Lärmereignisse sowie die lärmfreien Intervalle angegeben (Griefahn u. a. 2008). Griefahn und ihre Arbeitsgruppe am Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (Griefahn, Marks und Robens 2006) beispielsweise untersuchen 24 Probanden über drei Wochen, je 4 Tage im Schlaflabor mit eingespieltem Lärm über Lautsprecher. Als Hintergrundgeräusch wird jede Nacht, auch in den leisen Kontrollnächten, ein Rosa-Rauschen (32 dB(A)) abgespielt. In den restlichen Nächten wird je eine Woche entweder Schienen-, Straßen- oder Fluglärm mit wechselnden Lärmpegeln (39, 40, 50 dB(A)) und Maximalpegeln im Bereich zwischen 50-62, 56-68 und 62-74 dB(A) simuliert. Als weitere Kontrollparameter dienen die Anzahl der Lärmereignisse während der Nacht (Autos= 262, Überflüge=196, Züge= 172).

Die Auswirkungen auf den Schlaf als abhängige Variable werden mittels subjektiven (Fragebogen) und objektiven (Polysomnographie) Untersuchungsmethoden ermittelt. In den Fragebögen werden unter anderem nach der persönlich empfundenen Schlafqualität der letzten Nacht und der Müdigkeit (auf einer numerischen Punkteskala) gefragt. In wieder anderen Studien wird für die allgemeine subjektive Schlafqualität ein Summenindex aus mehreren Items ermittelt. So z.B. bei Griefahn (2006, 2008), die morgens sechs Parameter (Einschlafschwierigkeiten, Ruhe des Schlafs, Schlaftiefe, Schlafdauer, Erholung und Körperbewegung) mit Hilfe einer 10 Punkte Skala erfragt und die aufaddierten Punktwerte der Unterskalen ergeben schließlich die subjektive Schlafqualität der Probanden (z.B. Griefahn, Marks und Robens 2008).

Eine überaus objektive Untersuchungsmethode stellt die bereits oben erwähnte Polysomnographie dar, welches sich aus zwei EEGs (Elektroencephalogramm) zur Messung der Gehirnströme, zwei EOGs (Elektrookulogramm) zur Messung der Augenbewegungen und einem EMG (Elektromyogramm) zur Messung der Muskelspannung zusammensetzt. Auf diese Weise kann der Schlaf untersucht werden und damit die Gesamtschlafzeit, die Dauer der einzelnen Schlafzyklen und die Struktur des Schlafs bestimmt werden. Diese Angaben ermöglichen eine objektive Beurteilung der Schlafqualität der Probanden. Die Aufzeichnung und die Auswertung des Polysomnogramms wird hauptsächlich nach den international anerkannten Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1968) durchgeführt und registriert (Marks und Griefahn 2005). Genannte Autoren publizierten die Ergebnisse der 1960 gegründeten *Association for the Psychophysiological Study of Sleep (APSS)* zur Standardisierung und Vereinheitlichung der Schlafstadien. Mit Hilfe dieser Auswertung des Polysomnogramms werden in der Mehrheit der Studien übereinstimmend die folgenden Schlafparameter angegeben:

1. Einschlafdauer (min)
2. Aufwachreaktionen bzw. Gesamtwachzeit (%)
3. Gesamtschlafzeit (Schlafzeit + intermitt. Wach) TST (%)
4. Reine Schlafzeit SPT (%)
5. Schlaffeffizienz-Index SPT / TST
6. Stadium 1 (%)
7. Stadium 2 (%)
8. Tiefschlaf SWS (%)
9. REM- Schlaf (%)
10. Latenz bis zum Tiefschlaf (min)
11. Dauer 1. Schlafzyklus (min)

Da nicht in allen Studien die gesamten Parameter in der Ergebnisdarstellung aufgelistet werden und auch im Sinne einer angemessenen Übersicht berichten wir in diesem Abschnitt lediglich vier der genannten Schlafparameter (Aufwachreaktionen, Schlaffeffizienz-Index sowie die Dauer des Tief- und REM-Schlafes).

Somit können die Ergebnisse in die nachstehenden fünf Themenkomplexe unterteilt werden:

1. Subjektive Schlafqualität (N=13)
2. Erfragte Müdigkeit (N=9)
3. Dauer des Tiefschlafes und des REM-Schlafes (N=11)
4. Aufwachreaktionen (N=11)
5. Schlaffeffizienz-Index (N=8)

Die Punkte eins und zwei stellen subjektive Parameter dar und werden mittels Fragebögen erfasst. Die Dauer der Schlafzyklen, die Aufwachreaktionen wie auch der Schlaffeffizienz-Index werden mit Hilfe des Polysomnogramms (einige nutzen dafür auch das weniger genaue Aktigramm) ermittelt und sind demnach objektive Parameter. Der Schlaffeffizienz-Index ist der Quotient aus der reinen Schlafzeit durch die Gesamtschlafzeit.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass zwei der Studien, die den Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten untersuchen, ebenfalls die Reaktionen der Probanden

auf verschiedene Kombinationen zweier oder dreier Lärmarten testen. Die Ergebnisse werden ebenfalls in den Abschnitten der jeweiligen Variablen besprochen.

Subjektive Schlafqualität (N=13)

Die subjektive Schlafqualität wird in 13 Referenzen erfragt. Ausnahmslos stellen alle Studien eine signifikante Reduktion der subjektiven Schlafqualität durch Schienenlärm fest.

Von den genannten Studien behandeln neun den Vergleich zwischen den Verkehrsarten Schienen-, Straßen- und evtl. Flugverkehr. Von jenen stellen wiederum fünf Referenzen keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Verkehrslärmarten in Bezug auf die subjektive Schlafqualität fest (Griefahn u. a. 2004; Griefahn und Marks 2006; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn, Marks und Robens 2008; Griefahn, Marks und Basner 2006; Öhrström u. a. 2008). Jedoch berichten mehrere Studien, dass die Schlafqualität signifikant mit dem Lärmpegel korreliert ist (siehe Abb. 78) (z.B. Griefahn, Marks und Robens 2006).

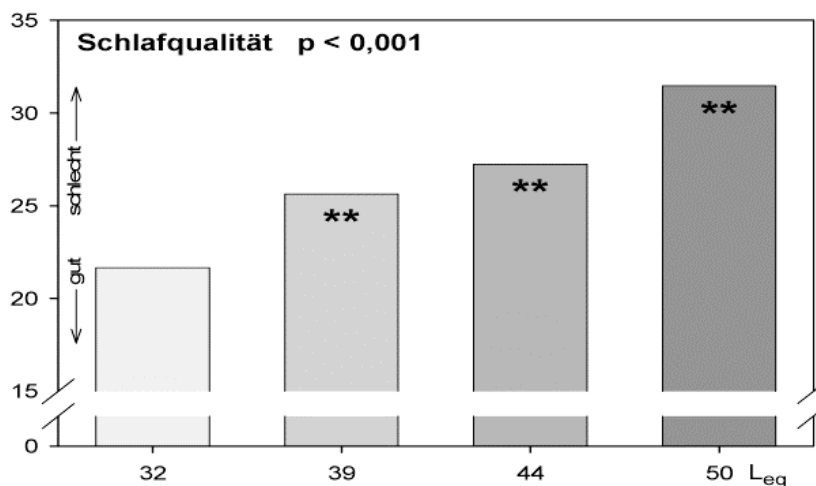
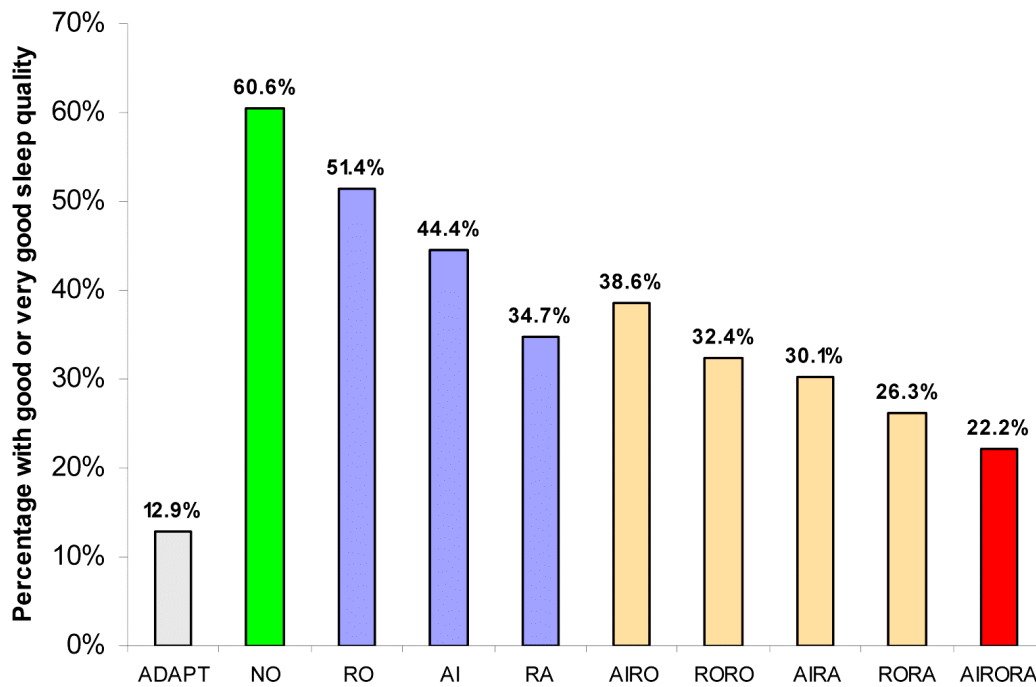


Abb. 78: Der Effekt von Lärmpegeln auf die subjektive Schlafqualität (Griefahn, Marks und Robens 2006)

Ein kleiner Teil der Studien (N=2) behandelt nicht nur den Vergleich zwischen den Einzelnen Lärmarten, sondern untersucht außerdem die kumulative Wirkung auf die subjektive Schlafqualität von zwei oder sogar drei simultan auftretenden Lärmquellen. So kommen Basner u. a. (2008) zu dem Ergebnis, dass zum einen die Schlafqualität durch Verkehrslärm in der Reihenfolge Straßen-, Flug- und Schienenlärm sinkt und zum anderen, dass die kumulative Wirkung aller drei Verkehrslärmarten den größten negativen Effekt auf die Schlafqualität ausübt (siehe Abb. 80).



Verkehrslärm (ADAPT=Gewöhnungsnacht; NO= ruhige Nacht (30 dB(A)); AI= Fluglärm (39,7 dB(A)); RO= Straßenlärm (36,9 dB(A)); RA= Schienenlärm (39,7 dB(A)); RORO (39,7 dB(A)); AIRO (41,2 dB(A)); RORA (41,2 dB(A)); AIRO (43,3 dB(A)); AIRORA (43,3 dB(A))

Abb. 79: Die Abhängigkeit der subjektiven Schlafqualität von Lärmquelle und Pegel (Basner u. a. 2008)

Ebenfalls einen kumulativen Effekt berichten Quehl und Basner (2008), wobei Straßenlärm und Fluglärm einzeln und kombiniert die Schlafqualität signifikant weniger beeinträchtigen als Doppel- oder Dreifachexpositionen zusammen mit Schienenlärm. Jedoch besteht in Bezug auf die Einzelexposition mit Schienenlärm kein signifikanter Unterschied zwischen den Lärmquellen.

In der Studie von Öhrström u. a. (2008) wird zum einen die allgemeine Schlafqualität der letzten Nacht erfragt, sowie der Zusammenhang der Schlafqualität mit dem Lärmpegel. Zum Vergleich werden drei unterschiedliche Lärmpegel untersucht, ein Schienenlärmpegel und zwei Straßenlärmpegel in verschiedener Stärke. Wenn auch kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Lärmexpositionen vorhanden ist, besteht dennoch die Tendenz, dass Schienenlärm die Schlafqualität am stärksten beeinträchtigt.

Eine Studie macht keine Angaben bezüglich der Lärmquellen (Marks, Griefahn und Basner 2007).

Die Studie von Marks und Griefahn (2005) , die alleinig den Schienenlärm untersucht, stellt eine signifikant erhöhte Belastung in den Lärmnächten verglichen mit der Kontrollnacht bezogen auf die subjektive Schlafqualität ab einem äquivalenten Dauerschallpegel von 50 dB(A) fest, jedoch keinen Unterschied zwischen den Nächten mit einem äquivalenten Dauerschallpegel von 40 dB(A) und denen mit einem Pegel von 44 dB(A). Ebenso behandeln die Studien von Bonnefond u. a. (2008) und Schapkin (2006; 2008) ausschließlich die Wirkung von Schienenlärm und berichten ausnahmslos eine signifikante Senkung der Schlafqualität mit zunehmender Lärmbelastung.

Erfragte Müdigkeit (N=9)

Die subjektiv empfundene Müdigkeit wird mit Hilfe von Fragebögen erhoben, so z.B. in der Studie von Griefahn, Marks und Robens (2006), die eine 10 Punkte Skala verwenden, um die Müdigkeit persönlich einzuschätzen und zu veranschaulichen. Alle neun Studien

kommen einheitlich zu dem Ergebnis, dass die Probanden nach den Expositions Nächten wesentlich müder sind als nach ruhigen Nächten.

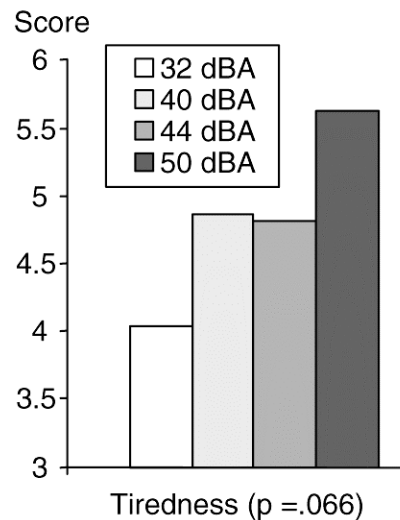


Abb. 80: Der Effekt von Lärmpegeln auf erfragte Müdigkeit (Marks und Griefahn 2005).

Die Studien, die sich mit dem Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten befassen (N=6), stellen allesamt keinen signifikanten Unterschied zwischen Straßen-, Schienen-, oder Fluglärm fest (Griefahn u. a. 2004; Griefahn und Marks 2006; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn, Marks und Basner 2006; Griefahn, Marks und Robens 2008; Öhrström u. a. 2008). Die restlichen Studien (N=3) behandeln die Wirkung von unterschiedlichen Schienenlärmpegeln (z.B. Bonnefond u. a. 2008). Von diesen berichten Marks und Griefahn (2005) zwar von einem signifikanten Unterschied zwischen der Kontrollnacht und den Lärmnächten (bei 50 dB(A)), sie findet jedoch keinen Unterschied bezogen auf die Müdigkeit zwischen der Exposition bei 40dB(A) und bei 44dB(A) (siehe dazu Abb. 80). Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangen Saremi u. a. (2008), welche feststellen, dass die Probanden nach den Lärmnächten müder sind als nach den Kontrollnächten, jedoch finden sie keinen Unterschied innerhalb der Lärmnächte (40dB(A) und 50dB(A)).

Dauer des Tiefschlafes und des REM-Schlafes (N=11)

Die Dauer beider Schlafstadien ist in allen aufgelisteten Studien in den Lärmnächten verglichen mit den Ruhenächten tendenziell verkürzt. Bis auf drei Studien ist diese Reduktion des Tiefschlafes wie des REM-Schlafes signifikant. Eine Studie von Griefahn, Marks und Robens (2008) berichtet für Schienenlärm eine tendenzielle Verkürzung der genannten Schlafstadien, kann jedoch keine Signifikanz feststellen. In der Studie von Marks und Griefahn (2004) wird angegeben, dass ein signifikanter Unterschied nur zwischen der leisesten Nacht (32dB(A)) und der lautesten Nacht (50dB(A)) besteht. Der Teil der Studien, die den Vergleich zwischen der Verkehrslärmarten in Bezug auf die Dauer des SWS (Slow Wave Sleep, Tiefschlafstadien)- und REM (Rapid Eye Movement)-Schlafes untersuchen (N=9) kommt zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich des Vergleichs. So geben drei Studien keinen signifikanten Unterschied zwischen den untersuchten Lärmquellen an (Griefahn, Marks und Basner 2006; Griefahn, Marks und Robens 2008; Marks und Griefahn 2004). Eine Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Dauer des Tiefschlafes sowie des REM-Schlafes in der Reihenfolge Straße, Flug und Schiene sinkt (Marks, Griefahn und Basner 2007). Zwei Papers von Griefahn u. a. (2006; 2006) gelangen zur gleichen Reihenfolge für die Dauer des Tiefschlafes in ihren Ergebnissen aus derselben Untersuchung. Dagegen wird in einer anderen Studie von Griefahn u. a. (2004) für den Paarvergleich von Expositions Nächten mit Ruhenächten

beschrieben, dass die Dauer der beiden Schlafstadien bei Schienenlärm am stärksten und bei Fluglärm am geringsten reduziert wird (siehe Abb. 81).

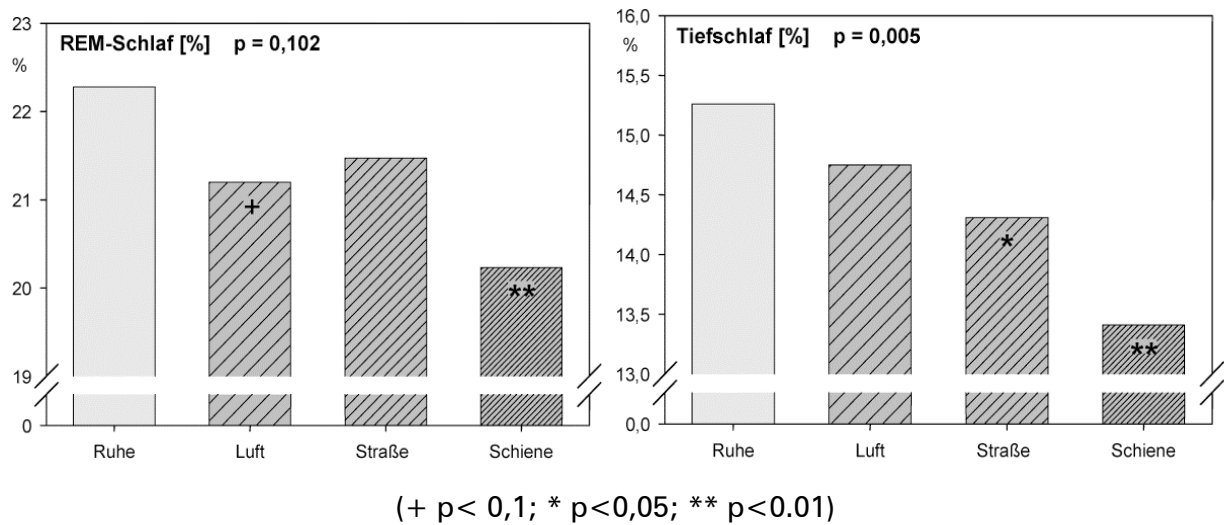


Abb. 81: Änderung physiologischer Schlafparameter durch verschiedene Verkehrslärmarten. (Griefahn u. a. 2004)

In zwei Studien werden keine genaueren Angaben bezüglich der separaten Effekte durch die einzelnen Lärmquellen in Bezug auf die untersuchten abhängigen Parameter gemacht (Basner u. a. 2008; Marks und Griefahn 2007b), wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die Studie von Basner u. a. (2008) den kumulativen Effekt von Schienen-, Straßen- und Fluglärm untersuchen und zu dem Ergebnis kommen, dass der REM-Schlaf ebenso wie der Tiefschlaf durch eine dreifach Lärmexpositionen stärker reduziert wird als durch Doppelexpositionen und diese wiederum einen größeren Effekt hervorrufen als singuläre Lärmexpositionen (siehe Abb. 82).

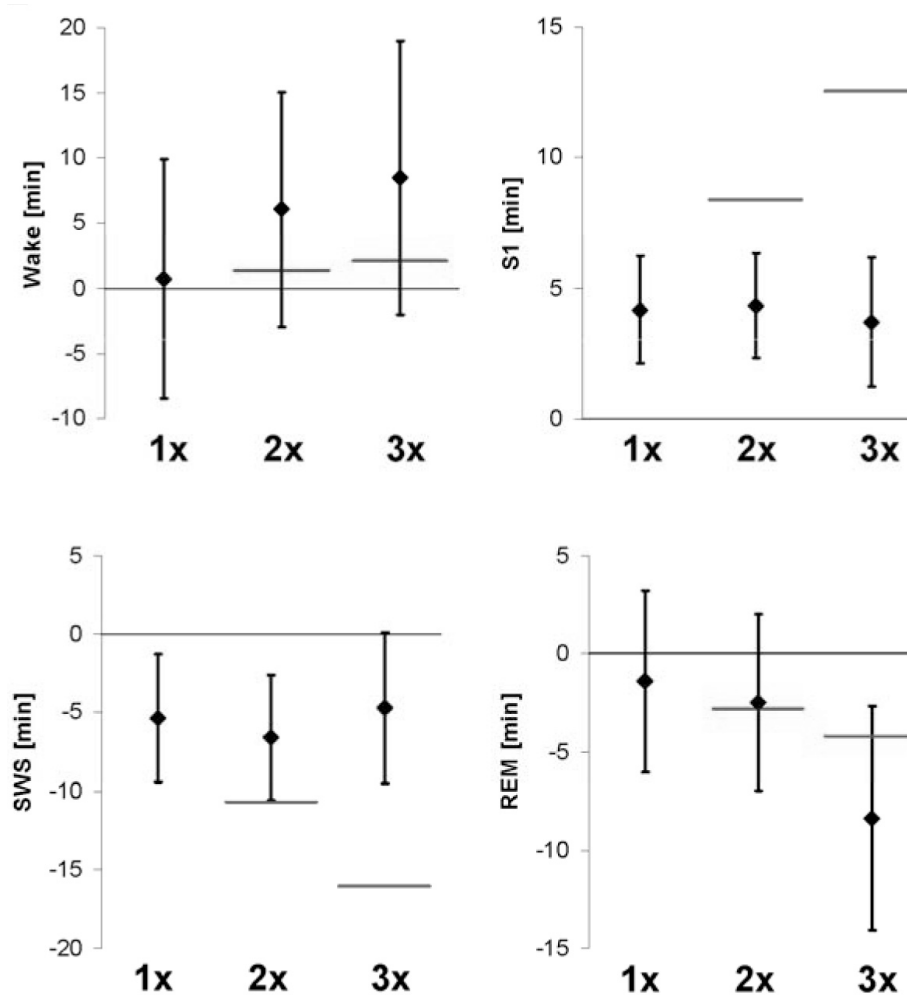


Abb. 82: Kumulative Effekte von Verkehrslärm in Einzel (1x), Doppel (2x) und Dreifach (3x) Expositions Nächten. Die Y-Achse zeigt den Unterschied zu der lärmfreien Kontrollnacht (Basner u. a. 2008).

Die restlichen Studien behandeln ausschließlich die Effekte von Schienenlärm auf den Schlaf. Bezogen auf die Dauer des Tiefschlafes wie auch des REM-Schlafes findet Marks (2005) im Vergleich zwischen einer Kontrollgruppe, welche die gesamte Zeit unter der Ruhebedingung (32dB(A)) geschlafen hat, und der Experimentalgruppe unter Lärmexposition keinen signifikanten Unterschied. Wird jedoch die leise Nacht (32dB(A)) mit den Lärmnächten (40, 44, 55 dB(A)) der Experimentalgruppe verglichen, besteht für den Anteil des Tiefschlafes an dem Gesamtschlaf ein signifikant verkürzter Trend, nicht jedoch für den REM-Schlaf (Marks und Griefahn 2005). Die Studie von Saremi u. a. (2008) kann keinen signifikanten Unterschied für die zwei Parameter zwischen der Kontrollnacht (35 dB(A)) und den Lärmnächten (40, 50 dB(A)) entdecken abgesehen von einer eindeutigen Tendenz Richtung Reduktion Schlafstadiendauer.

Aufwachreaktionen (N=11)

Die Angaben zu diesen Themenkomplex sind sehr heterogen, so dass sich eine Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisse aus den Studien als komplex erweist, da repräsentativ für die Aufwachreaktionen in vier Studien der Anteil des ersten und nullten Schlafstadiums (S1 & S0 > entspricht dann der Wachphase) gemeinsam und in zwei Studien der prozentuale Anteil des nullten Stadiums angegeben wird. Im nullten Stadium

ist der Proband wach. Nichts desto trotz ist fast allen Studien gemein, dass sie einen signifikanten Unterschied zwischen den leisen Nächten und den Lärmnächten aufweisen in dem Sinne, dass die Studienteilnehmer in den Lärmnächten signifikant öfter aufwachen.

Neun der genannten Studien befassen sich mit dem Unterschied zwischen den einzelnen Verkehrslärmarten. Wenn auch die Reihenfolge der Verkehrslärmarten nicht einheitlich und in einigen Studien keine Signifikanz vorliegt, bzw. keine Angaben über die Signifikanz bezüglich des Unterschiedes zwischen den Lärmquellen gemacht wird, kann ein klarer Trend festgestellt werden. Sieben der genannten Studien berichten für Schienenlärm die meisten Aufwachreaktionen (die längste Zeit in den Stadien null und eins) bzw. den höchsten prozentualen Anteil in dem Stadium null (Basner u. a. 2008; Griefahn u. a. 2004; Griefahn und Marks 2006; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn u. a. 2008; Marks und Griefahn 2007b; Marks, Griefahn und Basner 2007) (siehe Abb. 83).

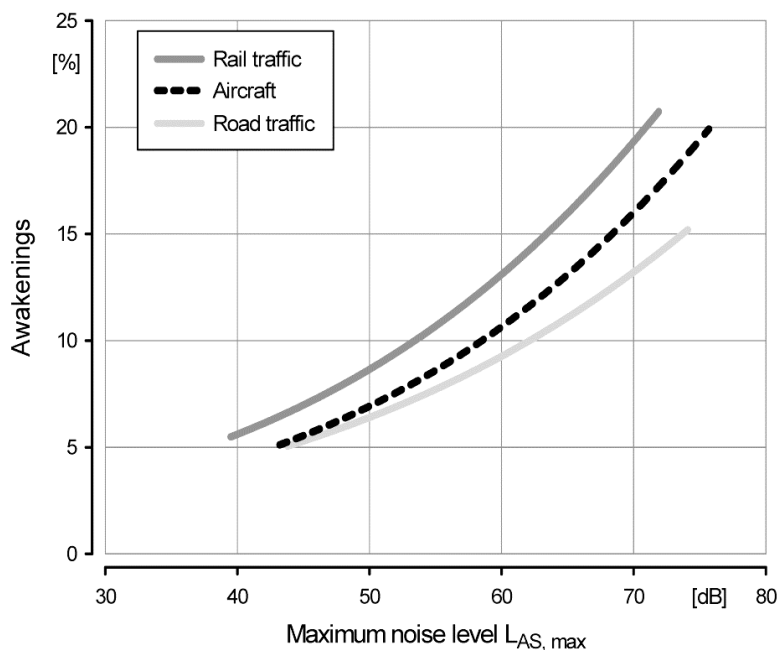


Abb. 83: Dosis-Wirkungsbeziehung für Aufwachreaktionen bezogen auf den Maximalpegel (Griefahn und Marks 2006).

Nur die Studie von Marks und Griefahn (2004) stellt keinen Unterschied zwischen den Lärmquellen (Schiene, Straße und Flug) fest. Eine Studie von Griefahn u. a. (2004) beschreibt zwar einen Unterschied, jedoch ist dieser nicht signifikant. Marks u. a. (2007) machen in ihrer Studie bezogen auf diese Fragestellung keine Angaben hinsichtlich der einzelnen Lärmquellen.

Zwei der Studien befassen sich allein mit Schienenverkehrslärm. Davon beschreibt eine Studie einen signifikanten Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und der Experimentalgruppe bezüglich des prozentualen Anteils des Wachzustandes der Probanden, jedoch keinen intraindividuellen signifikanten Unterschied zwischen der Ruhenacht (32 dB(A)) und den Lärmnächten (40, 44, 50 dB(A)) (Marks und Griefahn 2005). Saremi u. a. (2008) dagegen berichten keine Signifikanz für Aufwachreaktionen (>10s) während der Gesamtschlafzeit, wobei sie aber eine signifikante Erhöhung der Mikro-Erweckungen (3-10s) während der Gesamtschlafzeit feststellen.

Schlafeffizienz-Index (N=8)

Der Schlafeffizienz-Index (SEI) ist der Quotient aus der reinen Schlafzeit durch die Gesamtschlafzeit und somit ein guter Indikator für die Schlafqualität, jedoch beinhaltet dieser Quotient keine Informationen über die Schlafstruktur und ist damit alleinig nicht ausreichend zur Bewertung.

Alle Studien, die diesen Parameter anführen, weisen die klare Tendenz einer Minderung des SEI durch Schienenlärm für die Ruhenächte im Vergleich mit den Lärmnächten auf (Griefahn u. a. 2004; Griefahn und Marks 2006; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn, Marks und Robens 2008; Marks und Griefahn 2004; Marks und Griefahn 2005; Marks und Griefahn 2007b; Saremi u. a. 2008) (siehe Abb. 84).

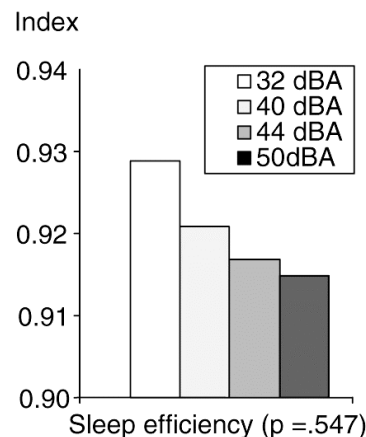


Abb. 84: Zusammenhang zwischen dem äquivalenten Dauerschallpegel und dem Schlafeffizienz-Index (Marks und Griefahn 2005).

Bis auf die Arbeiten von Griefahn (2008) und Saremi (2008) stellen alle einen signifikanten Unterschied fest. Von den genannten Studien behandeln sechs zusätzlich den Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten (Schiene, Straße und Flug). Für keine dieser Quellen kann ein signifikanter Unterschied im Schlafeffizienz-Index festgestellt werden. Jedoch berichten drei der Studien von einer einheitlichen Tendenz in Richtung der stärksten Beeinträchtigung des SEI bei Schienenlärm und der geringsten bei Fluglärm (Griefahn u. a. 2004; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn, Marks, und Robens 2008).

Alles in allem sind den Studienergebnissen im Abschnitt über lärmbedingte Schlafstörungen der *Evidenzstufe 2 (+ +)* mit eindeutigen Ergebnissen der Primärstudien zuzuordnen, allerdings unter dem Hinweis, dass die Resultate in den Labor- und Feldstudien eindeutig divergieren. Dies meint genauer, dass berichtete Laborstudien eher einen Schienenmalus im Vergleich mit den anderen Verkehrslärmquellen (Straße und Flug) und die Feldstudien einen Schienenbonus hinsichtlich verkehrslärmbedingter Schlafbeeinträchtigungen berichten.

5.1.5 Leistung (N=29)

In dem Ergebnisteil über den Bereich der Leistung wird der Frage nachgegangen, wie und in welchem Umfang das kognitive Leistungsvermögen betroffener Schienenlärmwohner beeinflusst wird. Mit dem Thema befassen sich 29 Studien aus dem gesamten Datenpool, wobei diese Fragestellung sowohl im Feldsetting (N=5+2) als auch im Laboratorium (N=22) untersucht wird (siehe Tab. 18).

Tab. 18: Empirische Arbeiten zu Leistung

Referenz	Jahr
Bonnefond u. a.	2008
Bronzaft & McCarthy	1975
Di Nisi, Muzet & Weber	1987
Evans, Lercher, Meis, Ising & Kofler	2001
Griefahn, Damaschke, Künemund & Marks	2004
Griefahn, Marks & Basner	2006
Griefahn, Marks & Robens	2006
Griefahn, Schuemer-Kohrs, Schuemer, Moehler & Mehnert	2000
Hambrick-Dixon	1988
Heft	1979
Hygge	1992
Izumiyama	1964
Klatte, Meis, Sukowski & Schick	2007
Kuhnt u. a.	2008
Lercher, Evans & Meis	2003
Marks & Griefahn	2004
Marks & Griefahn	2005
Marks & Griefahn	2007
Maruyama	1964
Maruyama	1964
Moehler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000
Möhler, Liepert, Schuemer & Griefahn	2000
Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberger, Mehnert & Griefahn	2000
Ohkubo	1964
Öhrström, Gunnarson & Ögren	2007
Paulsen & Kastka	1995
Schapkin, Falkenstein, Marks & Griefahn	2006
Schapkin & Griefahn	2004
Schütte, Wenning & Griefahn	2006

5.1.5.1 Feldstudien (N=5+2)

Nur fünf der genannten Referenzen sind Feldstudien, die übrigen Untersuchungen werden im Labor durchgeführt. Mit Hilfe von zwei kombinierten Feld- und Laborstudien werden die Langzeitfolgen durch Schienenlärm für die Leistung angegeben, indem die Auswahl der Probanden entsprechend des Lärmpegels des erfassten Verkehrslärms im persönlichen Wohnumfeld getroffen wird (Evans u. a. 2001; Lercher, Evans und Meis 2003). So untersucht Evans (2001) 115 Kinder, wobei die Hälfte der Kinder in ruhiger Nachbarschaft mit einem äquivalenten Dauerschallpegel von unter 50 dB(A) lebt. Dagegen lebt die andere Hälfte der Kinder in der näheren Umgebung von Straßen- oder Schienenwegen, was einen äquivalenten Dauerschallpegel von über 60 dB(A) zur Folge

hat. Zur Untersuchung der Kinder wird ein mobiles Labor aufgebaut (Evans u. a. 2001). Lercher, Evans und Meis (2003) untersuchen 123 Kinder, von denen ebenfalls 50 % in ruhigen Gegenden ($L_{eq} < 50 \text{ dB(A)}$) und 50 % in lauterer Gegenden ($L_{eq} > 60 \text{ dB(A)}$) leben. Gleichfalls untersuchen sie die Kinder in einem mobilen Labor.

Von den genannten Feldstudien befassen sich drei Referenzen ebenso mit Kindern. So berichten Bronzaft und McCarthy (1975) über die Lesefähigkeit von Schulklassen in lauter und leiser Umgebung. In der Studie werden die Schüler in einem Klassenraum zur Westseite (ruhige Seite) mit denjenigen Schülern verglichen, deren Klassenraum zur Ostseite ($L_{eq} = 59 \text{ dB(A)}$, $L_{max} = 89 \text{ dB(A)}$) ausgerichtet ist. Hambrick-Dixon (1988) untersucht ebenfalls Schulklassen mit unterschiedlichen Lärmpegeln an Schulen. Des Weiteren gibt sie an, dass alle untersuchten Kinder normalerweise in ruhiger Umgebung wohnhaft sind. In einer Studie von Heft (1979) wird die Aufmerksamkeit von 94 Kindern untersucht. Als unabhängige Variable wird der Umgebungslärm angegeben. Da der Lärmpegel weder gemessen noch berechnet wird, sondern subjektiv von den Eltern der Kinder mithilfe eines Fragebogens bestimmt wird, ist die Angabe der Pegel mit Vorsicht in Bezug auf gefundene Ergebnisse zu evaluieren. Darüber hinaus ist es nicht möglich anhand der undifferenzierten Ergebnisdarstellungen quellspezifische Angaben bezüglich der Lärmauswirkungen anzuführen (Heft 1979). Der Rest der Feldstudien untersucht die Probanden in der eigenen Wohnung. In einer Studie von Griefahn u. a. (2000) besteht ein Selektionskriterium zur Auswahl der Studienteilnehmer in einer mindestens 12-monatigen Wohndauer in der lärmbeeinträchtigten Umgebung. Moehler u. a. (2000) machen diesbezüglich keine Angaben. Zu beachten ist, dass beide Studien im Wesentlichen Schlafstudien sind und diesem zum Hauptuntersuchungsgegenstand haben, wobei die Leistung morgens wie abends zusätzlich getestet wird. Tab. 19 gibt einen Überblick über die Feldstudien und deren erfasste Parameter.

Tab. 19: Feldstudien: Probanden der Studien, lebten in durch Schienenlärm belastetem Umfeld

<i>Autor</i>	<i>Stichprobe (N)</i>	<i>Unabhängige Variable</i>	<i>Abhängige Variable</i>
Bronzaft (1975)	212	Lärmpegel im Klassenraum: $L_{eq} = 59 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 89 \text{ dB(A)}$ Anzahl der Züge: 80	Lesefähigkeit
Griefahn (2000)	377	Lärmpegel (innen): Schiene: $L_{m, night} = 56,3 \text{ dB(A)}$ Straße: $L_{m, night} = 50,1 \text{ dB(A)}$	Reaktionstest
Hambrick-Dixon (1988)	102	Lärmpegel im Klassenraum: $L_{max} = 90-108 \text{ dB(A)}$ Anzahl der Züge: 132	Visuelle Daueraufmerksamkeit
Heft (2003)	94	Lärmpegel zu Haus: Keine genauen Angaben	Visuelle und auditorische Aufmerksamkeit Zufällige Erinnerung
Möhler (2000)	377	Lärmpegel (innen) Schiene: $L_{eq} = 20-57,5 \text{ dB(A)}$ Straße: $L_{eq} = 20-52,5 \text{ dB(A)}$	Wahlreaktionstest
Evans (2001)	115	Lärmpegel zu Hause: $L = 52-71 \text{ dB(A)}$ $L = 34-50 \text{ dB(A)}$ Hintergrundrauschen während der Aufgaben $< 35 \text{ dB(A)}$	Motivation und Ausdauer
Lercher (2003)	123	Lärmpegel zu Hause: $L_{dn, 24h} = 60 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 74 \text{ dB(A)}$ $L_{dn, 24h} < 50 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 57 \text{ dB(A)}$ Hintergrundrauschen während der Aufgaben $< 35 \text{ dB(A)}$	Aufmerksamkeit Bewusste Erinnerung Zufällige Erinnerung

5.1.5.2 Laborstudien (N=19-2)

Die 17 gefundenen Laborstudien in diesem Themenkomplex sind vornehmlich daraufhin zu unterscheiden, ob diese Schlafstudien sind oder nicht. Das bedeutet genauer, dass Lärm während der Nacht eingespielt wird und die mögliche Leistungsminderung auf die durch Lärm verursachte Schlafstörung zurückzuführen ist. Dem gegenüber stehen die Studien, in denen die Leistung der Probanden während der durchzuführenden Testaufgaben im Labor unter Lärmbedingungen direkt beurteilt wird.

Die Schlaflaborstudien (N=9) ähneln sich überwiegend im Studiendesign. Die Probanden verbringen zwischen vier und 13 Nächten im Labor mit einer Habituationsnacht, welcher der Testphase vorweg gestellt ist. Die Leistungstests werden morgens, teilweise auch abends ohne Verkehrslärm nach einer exponierten Nacht durchgeführt. Die Studien beschäftigen sich entweder mit einem Vergleich zwischen den Verkehrslärmarten Schiene, Straße und Flug in Bezug auf unterschiedliche Lärmpegel (z.B. Griefahn, Marks und Robens 2006), oder aber sie beschäftigen sich ausschließlich mit Schienenverkehrslärm in ansteigender Schallbelastung für die Studienteilnehmer (z.B. Bonnefond u. a. 2008). Tab. 20 gibt einen Überblick über die Schlaflaborstudien.

Tab. 20: Laborstudien I: Schlaflaborstudien, Lärmbelastung während der Nacht, nicht jedoch während der Testung.

<i>Autor</i>	<i>Stichprobe (N)</i>	<i>Unabhängige Variable</i>	<i>Abhängige Variable</i>
Bonnefond (2008)	38	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene) L _{eq} = 37-53 dB(A); 48 Züge/Nacht L _{eq} = 40-66 dB(A); 48 Züge/ Nacht Leise Nacht: 35 dB(A) Alter der Probanden Schichtarbeit (ja/nein)	Aufmerksamkeit
Basner (2009)	72	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene, Straße, Flug) L _{max} = 45, 50, 55, 60, 65 dB(A) 9 unterschiedliche Lärmszenarien (Einzel-, Doppel- und Dreifachexposition) Leise Nacht: 30 dB(A)	Gedächtnis Wahlreaktion Hand-Augen-Koordination
Griefahn (2004)	32	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene, Straße, Flug) L _{eq} = 30, 40, 50 dB(A); Leise Nacht: 35 dB(A)	Aufmerksamkeit
Griefahn, Marks & Basner (2006)	24	Nächtlicher Lärmpegel (Sch, Str., Flug) L _{eq} = 39 dB(A); L _{max} = 50-62 dB(A) L _{eq} = 44 dB(A); L _{max} = 56-68 dB(A) L _{eq} = 50 dB(A); L _{max} = 62-74 dB(A) Je 196 Flüge, 262 Autos, 172 Züge/ Nacht Leise Nacht: 32 dB(A)	Aufmerksamkeit
Griefahn, Marks & Robens (2006)	32	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene, Straße, Flug) L _{eq} = 39 dB(A); L _{max} = 50-62 dB(A) L _{eq} = 44 dB(A); L _{max} = 56-68 dB(A) L _{eq} = 50 dB(A); L _{max} = 62-74 dB(A) Je 195 Flüge, 261 Autos, 172 Züge/ Nacht Leise Nacht: 32 dB(A)	Aufmerksamkeit
Marks (2005)	32	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene) L _{eq} = 40 dB(A); L _{max} = 45,3-62,3 dB(A) L _{eq} = 44 dB(A); L _{max} = 51-67,8 dB(A) L _{eq} = 50 dB(A); L _{max} = 57,6-74,1 dB(A) Leise Nacht: 32 dB(A)	Aufmerksamkeit

Marks (2007)	24	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene, Straße, Flug) $L_{eq} = 39, 44, 50 \text{ dB(A)}$; Leise Nacht: 32 dB(A)	Aufmerksamkeit
Schapkin (2004)	23	Nächtlicher Lärmpegel (Schiene) $L_{max} = 62 \text{ dB(A)}$ $L_{max-} = 68 \text{ dB(A)}$ $L_{max} = 74 \text{ dB(A)}$	Aufmerksamkeit Ereigniskorrelierte Potenziale
Schapkin (2006)	22	Nächtlicher Lärmpegel (Sch, Str., Flug) $L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 50-62 \text{ dB(A)}$ $L_{eq} = 44 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 56-68 \text{ dB(A)}$ $L_{eq} = 50 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 62-74 \text{ dB(A)}$ Leise Nacht: 32 dB(A)	Aufmerksamkeit Ereigniskorrelierte Potenziale

Den Schlaflaborstudien stehen 8 Referenzen gegenüber, die die direkten Auswirkungen von Schienenlärm auf die Leistung untersuchen. Während der Ausführung der gestellten Testaufgaben wird Verkehrslärm eingespielt. Als Kontrolle dient den Studien entweder eine Kontrollgruppe, die die gleiche Aufgabenstellung ohne jegliches Verkehrsgeräusch absolviert und/oder eine Gruppe, die vergleichbare oder gleiche Aufgaben einmal mit und einmal ohne Lärm bearbeiten muss (z.B. Hygge 1992). Tab. 21 gibt einen Überblick über diese Studien.

Tab. 21: Laborstudien II: Verkehrslärm während der Testung

<i>Autor</i>	<i>Stichprobe (N)</i>	<i>Unabhängige Variable</i>	<i>Abhängige Variable</i>
Hygge (1992)	417	Verkehrslärm (Schiene, Straße, Flug) $L_{eq} = 66 \text{ dB(A)}$; $L_{max} = 76 \text{ dB(A)}$ für Schiene & Flug $L_{max} = 72 \text{ dB(A)}$ für Autos	Langzeitgedächtnis
Izumiyama (1964)	8	Schienenlärm $L_N = 40-80 \text{ Phon}$ Stimme: $L = 40-80 \text{ dB(A)}$	Sprachverständlichkeit
Klatte (2007)	89	Schienenlärm: 59 dB(A) Hintergrundgespräch: 57 dB(A) Kontrolllärm: 36 dB(A) Sprecher: 60 dB(A)	Sprachverständnis Kurzzeitgedächtnis Satzverständnis
Maruyama (1964)	51	Schienenlärm: 65-80 Phon (in 5 Phon Schritten) Konstantes Rauschen: 56-59 Phon	Rechenleistung
Nagatsuka (1964)	122	Schienenlärm: 74 Phon Altersgruppe Schwierigkeitsgrad der Aufgaben	Rechenleistung
Ohkubo (1964)	60	Schienenlärm: 74 Phon Alter Geschlecht	Orientierungsprozesse
Öhrström (2007)	24	Verkehrslärm (Sch.& Str.) $L_{eq} = 53 \text{ dB(A)}$ (Schiene oder Straße) $L_{eq} = 56 \text{ dB(A)}$ (Schiene+Straße) Radiosprecher: 60 dB(A)	Sprachwahrnehmung
Schütte (2006)	70	Verkehrslärm (Schiene, Straße, Schiene+Straße) $L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$ $L_{eq} = 50 \text{ dB(A)}$	Kombinationsfähigkeit

5.1.5.3 Ergebnisse

Wenn auch bezüglich des Studiendesigns eine Aufteilung in Feld- und Laborstudien sinnvoll erscheint soll die Darstellung der Ergebnisse entlang der breit gefassten Operationalisierung des Konstruktes Leistung erfolgen. In den 23 genannten Referenzen werden 22 unterschiedliche Tests durchgeführt, wobei in einigen Studien von jedem einzelnen Proband mehr als ein Test bearbeitet wird. Die Studien können anhand der untersuchten Fragestellung in acht Untergruppen aufgeteilt werden, in denen allerdings Überschneidungen auftreten. Diese Gruppen lauten wie folgt:

- Aufmerksamkeit (N=15)
- Gedächtnis (N=4)
- Lesefähigkeit (N=2)
- Verständnis (N=2)
- Rechenaufgaben (N=2)
- Textverständnis (N=2)
- Sprachverständlichkeit (N=3)
- Motivation (N=1)

Durch die unterschiedlichen Fragestellungen ist es sinnvoll, die Ergebnisdarstellung entlang der eben angeführten Auflistung zu gestalten.

Aufmerksamkeit (N=15)

Von den 22 Tests befassen sich 14 mit den Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Aufmerksamkeit. Von allen Tests wird lediglich der Go/NoGo-Test (N=5) und der Switch-Test (N=5) in mehreren Studien verwendet. In vier der Referenzen bearbeiten die Probanden beide Tests. Diese genannten Studien sind Schlaflaborstudien (N=8) und werden in dem folgenden Abschnitt näher besprochen. Weitergehend können die Studien über Aufmerksamkeit in visuelle Aufmerksamkeit (N=4), Reaktionstestung (N=2) und Kombinationsfähigkeit (N=2) aufgeteilt werden.

Aufmerksamkeit in Schlaflaborstudien (N=9)

Im Folgenden soll es nun um Ergebnisse hinsichtlich der Aufmerksamkeitsleistung nach einer lärmbelasteten Nacht gehen. All diese Studien weisen einen ähnlichen Versuchsaufbau auf, wobei sieben der Studien ein nahezu identisches experimentelles Design benutzen. Die Probanden schlafen für 13, bzw. in einer Studie für vier Tage in einem Laborraum. Der Verkehrslärm wird über Lautsprecher während der gesamten Nacht mit einem äquivalenten Dauerschallpegel von 39-40, 44 oder 50 dB(A) eingespielt. Ebenfalls in den meisten der genannten Studien sind die Maximalpegel ($L_{\max}$: 50-52, 56-68 und 62-74 dB(A)) (z.B. Griefahn, Marks und Basner 2006) angegeben. Die Probanden kommen gegen 21 Uhr ins Institut und gehen nach der abendlichen Durchführung der Leistungstests ins Bett. Der Schlaf wird mittels eines Polysomnogramms überwacht. Nach dem Erwachen am nächsten Morgen um 7.00 Uhr wird wiederum ein Leistungstest durchgeführt (Griefahn u. a. 2004). Besonders hervorzuheben sind die Studien von Schapkin u. a. (2004, 2006), da hier während der Durchführung der Tests die Gehirnströme der Probanden Mittels eines EEGs gemessen werden, im Besonderen die ereigniskorrelierten Potenziale, welche Wellenformen im EEG darstellen und die durch kognitive Prozesse ausgelöst werden können (Schapkin u. a. 2006; Schapkin und Griefahn 2004). Eine weitere Gemeinsamkeit der sieben Studien besteht darin, dass Babara Griefahn bei allen Studien Mitautorin ist, was den experimentell ähnlichen Aufbau der Studien plausibel macht.

In den Schlaflaboruntersuchungen wird nicht die Auswirkung der Schallbelastung durch Lärm auf die Leistung direkt gemessen, sondern vielmehr die Leistungseinbußen aufgrund von Schlafstörungen nach einer lärmbelasteten Nacht. Zur Erfassung der Aufmerksamkeitsleistung werden mehrere Tests verwendet, die nachstehend kurz erläutert werden sollen.

Beim Go/NoGo-Test erscheinen auf einem Bildschirm die Worte „drück“ oder „stopp“. Der Proband bekommt zuvor die Instruktion, nur auf das Wort „drück“ mit einem Knopfdruck so schnell wie möglich zu reagieren. Im zweiten Teil des Tests erscheinen die gleichen Wörter in Klein- oder Großbuchstaben. Der Proband erhält während dieses Versuchsabschnittes die Anweisung bei „drück“ und „STOPP“, nicht jedoch bei „DRÜCK“ und „stopp“ taktile Antwort zu geben. Zur Bewertung des Tests wird zum einen die Reaktionsgeschwindigkeit und zum anderen die Fehlerrate gemessen (z.B. Marks und Griefahn 2005).

Der Switch-Test wird in fünf Studien durchgeführt. Bei diesem Test erscheint auf einem Bildschirm eine zweistellige Zahl. Der Proband erhält die Anleitung die gerade Ziffer der beiden Zahlen zu benennen, sofern die Zahl über der fiktiven Mittellinie erscheint, oder aber die größere Ziffer zu benennen, wenn sie unterhalb der Mittellinie erscheint. Ebenfalls erfolgt die Bewertung anhand der Reaktionsgeschwindigkeit und der Fehlerrate (z.B. Marks und Griefahn 2007).

Eine Studie von Bonnefond u. a. (2008) befasst sich ebenfalls mit der Auswirkung von lärmbedingten Schlafstörungen auf die Aufmerksamkeit. Zur Operationalisierung dienen der Stroop- sowie der Attentional Network Test (ANT). Der Stroop-Test, auch Farb-Wort-Interferenz-Test genannt, wird durch die zweite Bezeichnung adäquat beschrieben, da der Proband die Aufgabe hat, sich in Farbe- und Wortbezeichnung widersprechende Informationen zu verarbeiten. Ihm wird eine Liste mit unterschiedlich farbigen Farbbezeichnungswörtern (z.B. rot, grün, gelb oder blau) vorgelegt, wobei die Farben zumeist nicht mit den Wortbezeichnungen übereinstimmen (siehe Abb. 85). Nun hat der Proband die Aufgabe, die Farbe der Wörter zu nennen. Zur Auswertung werden die Anzahl der Fehler und die Reaktionszeit bedacht.



Abb. 85: Stroop-Test

Der ANT ist eine Kombination aus dem „cued reaction task“ und dem „flanker task“ und befasst sich mit drei Komponenten der Aufmerksamkeit, sprich Wachsamkeit, Orientierung und Handlungskontrolle.

Basner u. a. (2009) benutzen in ihrem Design einen Wahlreaktionstest und einen Hand-Augen-Koordinationstest zur Messung der Aufmerksamkeitsleistung nach einer lärmbelasteten Nacht im Schlaflabor. Beide Tests führen die Probanden morgens unmittelbar nach dem Erwachen durch.

Von den genannten 8 Studien befassen sich fünf mit dem Vergleich zwischen den drei Verkehrslärmarten Schienen-, Straßen und Flugverkehr. Von diesen kann lediglich die Studie von Basner u. a. (2009) einen Unterschied in der Aufmerksamkeitsleistung zwischen den verschiedenen Lärmquellen feststellen. Dieser Unterschied zeigt sich in der Reaktionszeit während eines durchgeführten Leistungstests bei nächtlicher Belastung durch Flug- und Schienenlärm. Für die Wahlreaktionsaufgaben kann dieses Ergebnis wiederum nicht bestätigt werden (siehe Abb. 86). Im Allgemeinen scheinen die Probanden bei der Bearbeitung der Leistungstests folglich nur wenig beeinflusst.

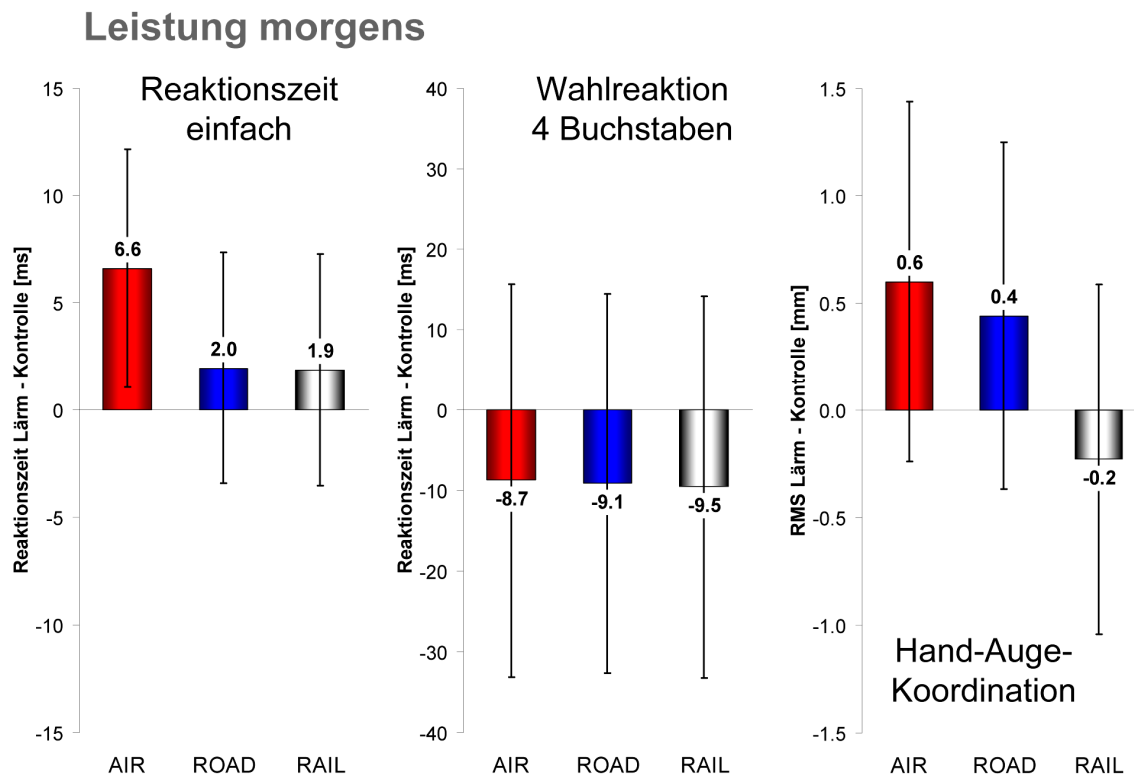


Abb. 86: Leistung der Probanden, nach nächtlicher Lärmbelastung durch Flug (AIR), Straßen (ROAD) und Schienenlärm (RAIL) (Basner u. a. 2009)

Von den übrigen vier Studien, welche keinen Unterschied zwischen den Lärmquellen feststellen, beobachten drei dennoch eine verzögerte Reaktionszeit im Switch-Test (Griefahn u. a. 2004; Griefahn, Marks und Robens 2006; Marks und Griefahn 2007b). In der Studie von Griefahn (2006) wird dagegen dieser Effekt nicht gefunden.

Die fehlenden vier Schlaflaborstudien befassen sich alleinig mit Schienenverkehrslärm. Ausschließlich in der Studie von Marks und Griefahn (2005) kann eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit im Switch-Test festgestellt werden, wobei diese als einzige diesen Test als Erfassungsinstrument einsetzt. Die Studien von Schapkin u. a. (2006; 2004) benutzen den Go/NoGo-Test und können wie alle Untersuchungen, die diesen Test verwenden, keinen Lärmefekt bestätigen. Bonnefond u. a. (2008) berichten über die Zunahme der Reaktionszeit im Stroop-Test nach nächtlicher Lärmbelastung. Für den ANT können sie jedoch keinen vergleichbaren Effekt ermitteln. Schapkin u. a. (2004; 2006) kommen mit der Verwendung ereigniskorrelierter Potenziale während der Leistungstestung zu dem Ergebnis, dass im Go/NoGo Test eine signifikante Reduktion der N2 und P3 Komponenten der ereigniskorrelierten Potentiale mit nächtlicher Lärmbelastung einhergeht. So kann abschließend festgehalten werden, dass eine einmalige, bzw. kurzzeitige nächtliche Lärmbelastung ganz gleich durch welche Quelle in

diesen Pegelbereichen keine schwerwiegenden Effekte auf die Aufmerksamkeit der Probanden bewirkt. Allerdings können physiologische Kosten in Form der Hemmung einer Aktion nach nächtlichem Lärm verzeichnet werden, wie man an den Ergebnissen in den Untersuchungen zu ereigniskorrelierten Potenzialen von Schapkin u. a. (2004) erkennt.

Visuelle Aufmerksamkeit (N=4)

Ebenso in die Kategorie der Aufmerksamkeit reihen sich vier Studien, die die visuelle Aufmerksamkeit zum Untersuchungsgegenstand haben. So z.B. Hambrick-Dixon (1988), die in ihrer bereits erwähnten Feldstudie verschiedene Schulklassen unter Schallbelastung untersucht. Den Schülern werden für 100 ms Karten vorgelegt, auf welchen 1, 2, 3 oder 4 verschiedene Motive dargestellt sind (siehe Abb. 87). Insgesamt sind den Schülern zehn unterschiedliche Motive bekannt. Die Aufgabe besteht nun in einer verbalen (oder taktilen) Mitteilung, ob der „grüne Ball“ auf der Karte zu sehen ist oder nicht (Hambrick-Dixon 1988).

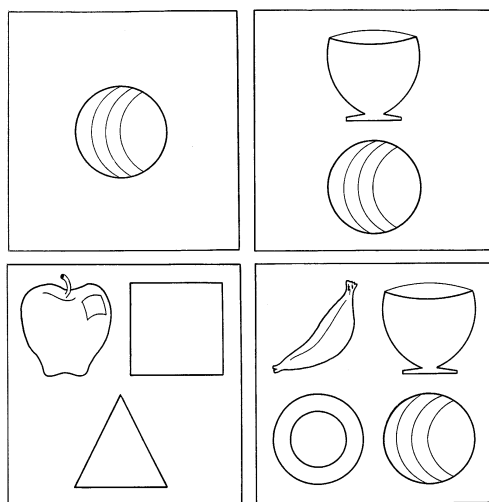


Abb. 87: Beispielhaftes Exemplar der Karten mit 1, 2, 3 und 4 Motiven (Hambrick-Dixon 1988)

Auch Heft (1979) untersucht in seiner Feldstudie unter anderem die visuelle Aufmerksamkeit, wobei das untersuchte Kind im Besitz von 20 unterschiedlichen Karten ist. Im Abstand von max. 10 Sekunden werden diesem auf einem Bildschirm zehn Bilder gezeigt. Dabei erhält es die Anweisung so schnell wie möglich diejenige Karte aus dem Satz ihm vorliegender Karten vorzuzeigen, die mit der Abbildung auf dem Bildschirm übereinstimmt. In der weiteren Versuchsdurchführung wird auf das zufällige Gedächtnis der Kinder wie auch auf die auditorische Aufmerksamkeit eingegangen.

Beide Feldstudien stellen fest, dass Kinder aus lauten Klassen bzw. lauter Wohnumgebung bezüglich der visuellen Aufmerksamkeit im Vergleich mit Kindern aus leiser Umgebung verlangsamt sind. In dem Sinne berichtet Hambrick-Dixon (1988), dass Kinder, welche der Lärmexposition länger als zwei Jahre ausgesetzt sind, Kindern aus leiseren Klassen in der Aufgabe im verbalen Antwortmodus unterlegen sind. Dieser Effekt kann bei Schülern mit einer Lärmexposition unter zwei Jahren nicht festgestellt werden. Im taktilen Antwortmodus schneiden die Kinder leiser Schulen unabhängig von der Expositionsdauer in beiden Gruppen (lang oder kurz exponiert) besser ab. Heft (1979) bestätigt diese Tendenz insofern, als dass Kinder aus lauten Heimen für eine visuelle Suchaufgabe mehr Zeit benötigen als Kinder aus vergleichsweise leiseren Wohnungen.

Lercher, Evans und Meis (2003) untersuchen neben der bewussten und zufälligen Erinnerung die visuelle Aufmerksamkeit, indem sie Grundschüler auffordern, die Strichzeichnung eines Fisches als spiegelverkehrte Darstellung wieder zu finden. Bei dieser Aufgabe können sie keinen Lärmeffekt feststellen, wobei in allen Gruppen eine relativ geringe Fehlerrate vorhanden ist. Als letzte der vier Studien zu visueller

Aufmerksamkeit befasst sich Ohkubo (1964) mit Schulkindern, denen jeweils wechselnd eine komplexe und eine weniger komplexe Figur auf dem Bildschirm gezeigt wird. Die Kinder erhalten die Instruktion am Ende der Testung die für sie interessanteste Figur zu benennen, wobei die eigentliche Untersuchung allerdings in der Registrierung der Augenbewegungen besteht. So kann zum einen bestimmt werden, welche Figur zuerst fixiert wird und zum anderen kann die „die verlorene Zeit“ (die Zeit in der keine Figur fixiert wird) erfasst werden. Diese Zeit steigt mit fallender Aufmerksamkeit. Komplexe Figuren werden signifikant länger fixiert als weniger komplexe Figuren, jedoch gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen der lärmbelasteten Gruppe und der Kontrollgruppe. Im Bezug auf die verlorene Zeit kommt Ohkubo zu dem Ergebnis, dass diese in der lärmbelasteten Gruppe verlängert ist.

Reaktionstest (N=2)

In den Feldstudien von Griefahn u. a. (2000) und Moehler, Liepert, Schuemer und Griefahn (2000) wird mit Hilfe von Reaktionstests die Aufmerksamkeit von Probanden morgens und abends untersucht. In beiden Studien stehen Probanden im Vergleich mit vornehmlich Schienenverkehrslärm in ihrer Wohnumgebung gegenüber Probanden aus überwiegend straßenverkehrslärbelasteter Umwelt. Griefahn gibt bezogen auf die Testperformanz keinen signifikanten Unterschied zwischen den Lärmquellen an. Möhler hingegen kann zwar bezüglich der Fehlerrate ebenfalls keine gebietsbezogenen Unterschiede feststellen, jedoch berichtet er, dass sich die Leistung bei den Probanden aus den Straßenverkehrsgebieten von morgens nach abends verbessert; für die Probanden aus den Schienenverkehrsgebieten hingegen nicht.

Kombinationsfähigkeit (N=2)

Abschließend sei im Zusammenhang mit Aufmerksamkeit noch die Testung von Heft (1979) angegeben, in der die untersuchten Kinder sich überlappende Figuren benennen sollen, deren Umrisse nur teilweise zu erkennen sind; ebenso wie die Studie von Schütte, Wenning und Griefahn (2006), welche die Leistungsqualität von 70 Studenten mit Hilfe des Grammatical Reasoning Test (GRT) aus dem Criterion Task Set testet. Hierbei widmen sich die Studienteilnehmer der Aufgabe die Reihenfolge einer Symbolfolge (z.B. #, &, *) mit zwei zuvor sprachlichen Aussagen zu vergleichen (z.B. & folgt #, & geht * vor raus) um nachfolgend zu bestimmen, ob eine Übereinstimmung vorliegt oder nicht. Ein Durchgang dauert fünf Minuten. Während dieser Zeit wird Verkehrslärm eingespielt, wobei es drei verschiedene Szenarien (Schiene, Straße, Schiene und Straße) gibt, die nacheinander durchgeführt werden. Beide Studien können keine Leistungsminderung durch Verkehrslärm feststellen. Schütte betont, dass das Ausmaß der Schallbelastung und die Kombination der Verkehrslärmarten bei leichten Aufgaben, bedingt durch die nicht vollständige gebundene Verarbeitungskapazität, ablenkend wirken können. Dies hat zu Folge, dass die Durchführung der Aufgabe bei Lärm schwerer wahrgenommen wird (Schütte, Wenning und Griefahn 2006).

Gedächtnis (N=5)

Mit dem Themenbereich Gedächtnis befassen sich fünf Referenzen, von welchen eine im Feld und vier im Labor durchgeführt werden. Die meisten dieser Studien (N=4) erforschen die Gedächtnisleistung von Kindern. In den Studien von Heft (1979) wie auch von Lercher u. a. (2003) leben die Kinder in lauten Umgebungen, wobei während der Testung kein Lärm eingespielt wird. Heft (1979) befasst sich mit der zufälligen Erinnerung von Kindern, denen zehn noch nicht verwendete, jedoch schon bekannte Motivkarten gemischt mit zehn neuen nicht bekannten Karten vorgelegt werden. Die Aufgabe besteht nun darin, diese zu unterscheiden. Lercher u. a. (2003) befassen sich ebenfalls mit der zufälligen Erinnerung und darüber hinaus mit der bewussten Gedächtnisleistung. Die teilnehmenden Kinder haben die Aufgabe, einen Text zu lesen in dem Wissen, dass sie

nach zehn Minuten Fragen über den Text gestellt bekommen. Die zufällige Erinnerung wird mit Hilfe geometrischer Puzzle (lösbar, wie auch nicht lösbar) erfasst, indem die Kinder während des Ausfüllens von physiologischen Fragebögen nach den geometrischen Puzzeln befragt werden. Beide Studien beschrieben, dass die Erinnerung der Kinder aus leiser Nachbarschaft besser ist als die der Kinder aus lauter Nachbarschaft sowohl für die zufällige als auch für die bewusste Erinnerungsleistung (Heft 1979; Lercher, Evans und Meis 2003).

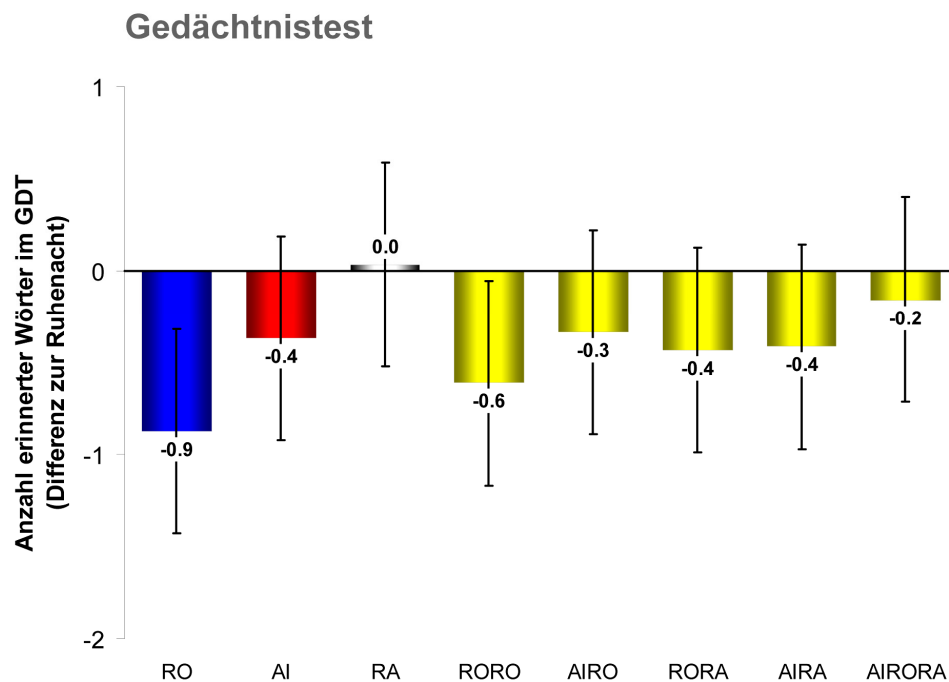
Im Gegensatz zu den beiden genannten Referenzen können die folgenden zwei Studien keinen signifikanten Effekt von Schienenlärm bezüglich Gedächtnisleistungen feststellen. So berichtet Hygge (1992) zwar von einer Beeinträchtigung des Erinnerungsvermögens bei Straßen- und Fluglärm, nicht jedoch bei Schienenlärm.

Sowohl in der Untersuchung von Klatte u. a. (2007) als auch in der von Hygge (1992) wird die Lärmbelastung via Lautsprecher eingebracht, womit einhergeht, dass die untersuchten Kinder nicht langfristig durch Schienenlärm belastet sind. So präsentiert Klatte (2007) während der Testung Schienenverkehrslärm mit einem äquivalenten Dauerschallpegel von 59 dB(A) bzw. ein Distraktor-Gespräch im Hintergrund mit 57 dB(A). Dabei wird das phonologische Kurzzeitgedächtnis getestet, indem den Kindern immer paarweise Nicht-Wörter (z.B. giboda-guboda) genannt werden. Das Kind soll nun unterscheiden, ob die genannten Nichtwörter gleich oder verschieden sind. Hygge (1992) spielt in seiner Studie ebenfalls Verkehrslärm (Schiene, Straße und Flug) ein ($L_{eq}=66$ dB(A)). Hier erhalten die Kinder die Anweisung einen Text zu lesen, um genau eine Woche später darüber fünf offene Fragen und neun Multiple-Choice-Fragen zu beantworten. Insgesamt wird der Versuch dreimal wiederholt, davon einmal unter Lärmbelastung.

Lediglich die Studie von Basner u. a. (2009) untersucht 72 erwachsene Probanden. Eine weitere Besonderheit dieser Studie besteht darin, dass nicht nur der Vergleich zwischen den drei Verkehrslärmarten (Schiene, Straße und Flug) herangezogen wird, sondern auch die kumulativen Effekte der Lärmquellen berechnet werden. Darüber hinaus handelt es sich um eine Schlaflaboruntersuchung, in der die Probanden während der Testung keiner Lärmexposition ausgesetzt sind, sondern in der Nacht vor der Leistungstestung unter Schallbelastung stehen.

In dem angewandten Gedächtnistest werden am Abend 24 Wortpaare (z.B. Fahrrad/Klingel) solange gelernt bis bei der Abfrage (Fahrrad/?) mindestens 16 Wörter erinnert werden. Am nächsten Morgen werden die Wortpaare dann erneut abgefragt.

Wie in der Abb. 88 erkenntlich, ist die mittlere Anzahl der erinnerten Wortpaare nur in der Expositionsnacht mit Schienenverkehr nicht reduziert, wohl aber in den Nächten der anderen Schallbelastungssituationen.



Straße=RO, Flug=AI; Schiene=RA

Abb. 88: Gedächtnistest; (Basner u. a. 2009)

Lesefähigkeit (N=2)

Der Metropolitan Achievement Reading Test untersucht den Wortschatz, das Textverständnis und die allgemeine Lesefähigkeit. Bronzaft und McCarthy (1975) verwenden diesen in ihrer Feldstudie, um Schüler aus lauten und leisen Klassen miteinander zu vergleichen. Ihre Ergebnisse zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Klassen in dem Sinne, dass Kinder aus der lauten Klasse ein signifikant schlechteres Lesevermögen im Test aufweisen als die der leisen Klasse. Des Weiteren berichteten die Kinder aus der Klasse der Ost-Seite (laute Klasse) signifikant häufiger, dass es für den Lehrer schwer sei sie zu hören, dass es in der Klasse zu laut sei und dass der Zuglärm sie nicht nur ärgere, sondern sie auch beim Lernen und Denken störe. Hygge (1992) untersucht zwar nicht direkt die Lesefähigkeit der Kinder, dennoch erwähnt er, dass sich die Anzahl der gelesenen Seiten unter Schienenverkehrslärmbelastung signifikant mindere.

Rechenleistung (N=2)

Zwei japanische Studien aus dem Jahr 1964 vergleichen die mathematischen Leistungen von Schülern aus drei unterschiedlichen Klassenstufen mit und ohne Störung durch Schienenverkehrslärm. Maruyama (1964b) testet 51 Schüler. Alle müssen einfache Additions- und Subtraktionsaufgaben innerhalb von sechs Sekunden lösen. Die Aufgaben bestehen je nach Klassenstufe aus unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden (z.B. 2nd Grad: 4+3, 9-6; 4th Grad: 8+7, 13-9; 6th Grad: 5+16, 22-7). Die Schüler werden in 15 Gruppen eingeteilt, zum einen nach Klassenstufen und zum anderen in fünf unterschiedliche Lärmpegelklassen (kein Lärm, 65 Phon, 70 Phon, 75 Phon und 80 Phon). In den Lärmgruppen werden die ersten vier Aufgaben in Ruhe gestellt, während der Aufgabe fünf bis acht wird Schienenlärm eingespielt, um anschließend mit einer Ruhephase auszulaufen. Die Studie von Nagatsuka (1964) hat ein ähnliches Design. Grundschüler aus der 2., 4., und 6. Klasse werden getestet, wobei die Testung der Experimentalgruppe unter Schienenlärm mit 74 Phon stattfindet. Die zwei Studien beurteilen die Daten hinsichtlich Fehlerrate, dem Fehlen einer Antwort, oder einer verzögerten Antwort. Die

Fehlerrate steigt durch den Lärm signifikant an, wobei jüngere Schüler stärker durch den Lärm beeinflusst werden als ältere (Nagatsuka 1964). Weiterhin wird in der 2. und 4. Klasse ein signifikanter Unterschied zwischen der Experimentalgruppe und der Kontrollgruppe gefunden. Die Experimentalgruppe der 2. Klasse ist selbst unter der abschleißenden Ruhebedingung noch beeinträchtigt (Nagatsuka 1964). Dieser Nacheffekt von Lärm findet sich in der Studie von Maruyama nicht (siehe Abb. 89).

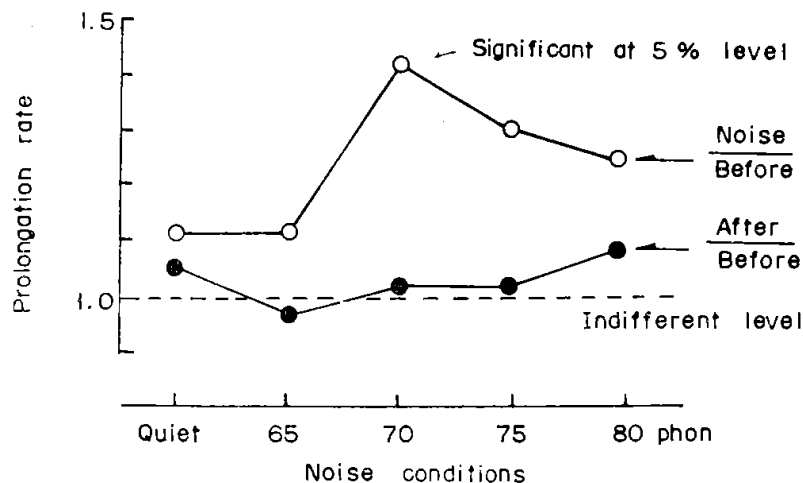


Abb. 89: Quotient aus der Zeit *bis* zur Lösungsangabe (vor der Lärmphase) und der Zeit bis zur Lösungsangabe (während bzw. nach der Lärmphase) (Maruyama 1964b)

Des Weiteren zeigt sich, dass die Ergebnisse nahezu identisch sind, wenn die Rechentestaufgaben nicht visuell, sonder auditorisch präsentiert werden (Maruyama 1964b).

Textverständnis (N=2)

Die zwei Studien, die sich mit dem Text- bzw. mit dem Satzverständnis bei Schienenverkehrslärm befassen, können beide keinen Effekt durch Schienenlärm feststellen, weder Bronzaft und McCarthy (1975) mit Hilfe des Metropolitan Achievement Reading Test (Durost et al 1971) noch Klatte u. a. (2007), in deren Studie die Probanden verbale Instruktionen (z.B. „Tu das Kreuz unter das Buch, welches neben dem Stuhl liegt“) ausführen sollen.

Sprachverständnis (N=3)

Die Sprachverständlichkeit ist besonders in Schulen wichtig, da der Unterricht zum großen Teil auf Kommunikation aufbaut. So befassen sich die folgenden drei Studien mit der Verständlichkeit von Silben und Wörtern und der Sprachwahrnehmung unter Verkehrslärmbelastung. So untersucht Izumiyama (1964) den Zusammenhang zwischen Schienenlärm (40-80 Phon) und Silbendeutlichkeit bei unterschiedlicher Stimmlautstärke (40-80 dB(A)). Eine Interpretation der Ergebnisse gestaltet sich in soweit schwierig als der Autor für die Angabe des Schienenlärms den Lautstärkepegel wählt, für die Angabe der Stimmlautstärke jedoch den Schallpegel. Diese Pegel entsprechen sich allerdings nur bei einer Frequenz von 1000Hz. Ferner macht er keine Angaben über die Messung der Silbendeutlichkeit. Bei der Darstellung der Ergebnisse verwendet Izumiyama einen Artikulationsindex, der ohne Lärmbelastung 82,4 % beträgt, welches einem Silbenverständnis von 100 % entspricht. Eine der wichtigsten Erkenntnisse stellt der trotz steigendem Lärmlautstärkepegel und steigendem Stimmpegel sinkende Artikulationsindex dar.

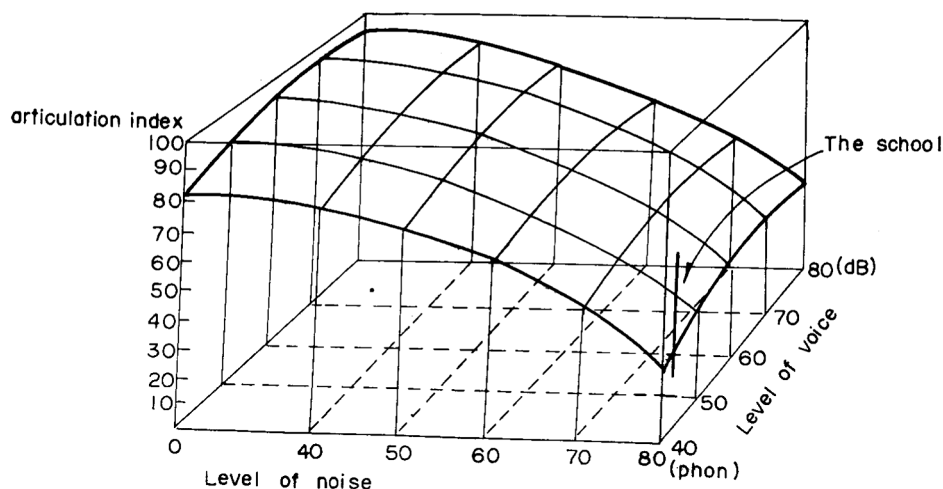


Abb. 90: Die dreidimensionale Darstellung des Artikulationsindexes (Izumiyama 1964)

Um die Relevanz seiner Ergebnisse zu veranschaulichen beschreibt Izumiyama (1964) eine Beispielschule, in der ein Lärmpegel von 74 Phon vorherrscht und die Stimmlautstärke des Lehrers 65 Phon in der Mitte des Klassenraums beträgt. Aus diesen Werten resultiert ein Artikulationsindex von 56,3%. (Siehe auch den Balken in der Abb. 90). Schlussfolgernd gibt er einen Schwellenwert für den Lärmlautstärkepegel von 50 Phon an, da bei diesem ein Artikulationsindex von 80 % bestehen bleibt. Klatte u. a. (2007) untersuchen ebenfalls die Sprachverständlichkeit bei unterschiedlichen Lärmpegeln von Schienenverkehrslärm (59 dB(A)) oder Hintergrundgesprächen (57 dB(A)) bzw. dem Kontrolllärm (36 dB(A)). Dies bewerkstelligen sie durch das Vorlegen von Bildern, die ähnlich klingende Worte repräsentieren (z.B. Arzt, Axt, Ast). Die Testteilnehmer werden angeleitet das Bild zu zeigen, das dem zuvor genannten Wort entspricht. Die schienenlärmbelastete Gruppe weist ein signifikant schlechteres Sprachverständnis auf im Vergleich mit der lärmfreien Kontrollgruppe (Klatte u. a. 2007).

Öhrström, Gunnarsson und Ögren (2007) hingegen testen nicht nur die Verständlichkeit der Sprache, sondern erfragen außerdem die subjektive Wahrnehmung dieser unter Schienen- und Straßenverkehrslärm. Während der Durchführung werden zum einen unterschiedliche Verkehrslärmsituationen und zum anderen ein Radiosprecher abgespielt. Nach jedem Durchlauf wird der Proband mittels eines Fragebogens hinsichtlich der Wahrnehmungsvariablen erfasst. Die subjektive Sprachwahrnehmung ist in der kombinierten Situation bei 56 dB(A) am stärksten beeinträchtigt, unter singulärer Schienenlärmexposition am geringsten beeinträchtigt.

Alles in Allem weisen die berichteten Studienergebnisse darauf hin, dass Schienenverkehrslärm die Sprachverständlichkeit beeinträchtigt und dies vor allem in der Schule längerfristig zu leistungsbehindernden Lerneffekten führen kann.

Motivation (N=1)

In der Studie von Evans u. a. (2001) wird die Motivation wie auch die Ausdauer der Kinder aus lauter und leiser Nachbarschaft während der Bearbeitung geometrischer Puzzle untersucht. Die Aufgabe besteht darin, die Linien mit dem Stift nachzuzeichnen ohne diesen abzusetzen. Die Kinder sollen so lange ein Puzzle bearbeiten bis sie es gelöst hatten. Für jeden Versuch erhalten sie eine Kopie des Puzzles. Des Weiteren ist es ihnen erlaubt, ein neues Puzzle zu erhalten und zu bearbeiten, falls sie das Gefühl haben die Aufgabe nicht lösen zu können. Das erste Puzzle ist unlösbar, wobei die Anzahl der Versuche das Problem zu lösen als Index für die Motivation dient.

In Bezug auf die Leistung wie auch auf die Motivation hinterlässt die Lärmexposition keinen Haupteffekt. Dennoch kann festgestellt werden, dass die Leistung der Mädchen aus lauten Gebieten sinkt, nicht aber die der männlichen Studienteilnehmer.

Der Leistungsabschnitt erhält die *Evidenzstufe 3 (+ +/-)*, da viele Störungsbereiche lediglich geringe Evidenz aufweisen oder aber lediglich mit zu kleiner Studienanzahl vertreten sind, um von einer ausreichend replizierten Unmissverständlichkeit der Ergebnisse in Form von Methodenartefakten (usw.) ausgehen zu können.

5.1.6 Kinder (N=14)

Im Bereich der Kinderstudien haben sich 14 empirische Untersuchungen zusammentragen lassen, mit zehn experimentellen Laborstudien und vier epidemiologischen Feldstudien, alle im Querschnittsdesign.

Tab. 22: Empirische Arbeiten zu Schienenlärnwirkungen bei Kindern

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Bronzaft & McCarthy	1975
Evans, Lercher, Meis, Ising & Kofler	2001
Hambrick-Dixon	1988
Heft	1979
Hygge	1992
Izumiyama	1964
Klæboe, Turunen-Rise, Hårvik & Madshus	2003
Klatte, Meis, Sukowski & Schick	2007
Lercher, Evans & Meis	2003
Lercher, Evans, Meis & Kofler	2002
Maruyama	1964
Nagatsuka	1964
Niemann u. a.	2006
Ohkubo	1964

In zehn Fällen wird die Experimentalgruppe mit einer Kontrollgruppe verglichen, in fünf Fällen gibt es keine Vergleichsgruppe. Der Altersbereich der Kinder beläuft sich zwischen 4.5 bis maximal 14 Jahren. Bei den untersuchten Konstrukten handelt es sich überwiegend um Leistungsvariablen, sprich die Lesefähigkeit (Bronzaft und McCarthy 1975), Vokalisation (Maruyama 1964a), (Text-/Sprach-)Verständnis (Izumiyama 1964; Klatte u. a. 2007), Gedächtnis- und Erinnerungsaufgaben (Hygge 1992; Klatte u. a. 2007; Lercher, Evans und Meis 2003), (Dauer-)Aufmerksamkeit (Hambrick-Dixon 1988; Heft 1979; Lercher, Evans und Meis 2003; Ohkubo 1964), Rechnen (Maruyama 1964b; Nagatsuka 1964), psychophysischer Stress (Evans u. a. 2001; Lercher, Evans und Meis 2003) und Motivation (Evans u. a. 2001).

In den Feldstudien werden zumeist verkehrslärmexponierte (meist Schienen- und Straßenverkehr) Schulzentren untersucht, in denen diejenigen Kinder in einem lauter beschallten Klassenraum mit denjenigen aus weniger beschallten (in andere Richtungen ausgerichtete) Klassenräumen in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit verglichen werden

(Intra-Schulen-Vergleich), oder aber diejenigen aus an Schienenwegen dichter gelegenen Schulen mit denen, die in größerer Distanz liegen (Inter-Schulen-Vergleich).

Die Effekte in allen Studien sind gering, unter anderem aber auch auf eine geringe Teststärke durch kleine Stichproben zurückzuführen.

In Abhängigkeit von der Expositionsdauer (über vs. unter zwei Jahre), vom Antwortmodus (verbale vs. taktile Antwort auf die Präsenz eines kritischen Stimulus während der Präsentation einer verschiedenen hohen Anzahl von Distraktoren) und dem Geschlecht von 102 Kindern in weniger lauten und lauter exponierten Schulzentren durch Schienenverkehr zeigt sich in einer Faktorenanalyse, dass lediglich Mädchen in dem verbalen Antwortmodus signifikant durch Schienenlärm beeinflusst werden in der visuellen Aufmerksamkeitsreaktion nach einer Exposition über zwei Jahre (Hambrick-Dixon 1988). Wenn die Exposition unter zwei Jahren bleibt, schneiden die Kinder der lauten Schulen besser ab als die der weniger stark exponierten im verbalen Antwortmodus; im taktilen Antwortmodus kehrt sich dieses Verhältnis für die Schulzentren um. Heft (1979) zeigt in einer Feldstudie in den Heimen von 94 Kindern zwischen 4.5 und 6.5 Jahren, dass Kinder unter hohen Lärmpegeln für eine visuelle Suchaufgabe verzögerte Antwortlatenzen aufweisen und folglich weniger zufällige Aspekte registrieren während der Aufgabe als Kinder aus leiser beschallten Wohnungen. Allerdings zeigen sich lauter exponierte Kinder weniger ablenkbar durch einen auditorischen Distraktor im Vergleich mit geringer exponierten Kindern. Lercher, Evans und Meis (2003) dagegen finden für zwei divergierende Pegelbereiche (Hoch = L_{dn} im Mittel 62 dB(A) vs. nieder = L_{dn} im Mittel 46.1 dB(A)) keinen Unterschied für 123 Grundschüler in der Aufmerksamkeitsleistung.

Hygge, Evans und Bullinger (2002) zeigen in einer experimentellen Laborstudie, dass Schienenlärm keinen Effekt auf das Erinnerungsvermögen von 7. Klässlern zwischen 12 und 14 Jahren hat, Flug- und Straßenlärm wirkt sich jedoch signifikant aus, allerdings nur für schwierige Gedächtnisaufgaben. Bei leichten Wiedererkennungsaufgaben zeigt keine der drei Quellen einen Effekt (intraindividuell). In einer interindividuellen Analyse bestätigt sich, dass Fluglärm, nicht aber Schienen- und Straßenlärm, signifikant die Leistung in den schwierigen Gedächtnisaufgaben beeinträchtigt. Die Straßenlärmgruppe hat größere Schwierigkeiten unter Lärmbedingungen zu lesen und zu lernen als die Fluglärm- und Schienenlärmgruppe.

Klatte u. a. (2007) vergleichen das phonologische Kurzzeitgedächtnis, das Sprach- und Satzverständnis von 6- bis 8-jährigen Grundschulern unter Bedingungen von Zuglärm, fremdsprachiger Sprachinterferenz und einer Kontrollbedingung (kein Lärm). Es stellt sich heraus, dass sowohl das verbale Kurzzeitgedächtnis wie auch das Satzverständnis durch Hintergrundlärm mit einer Fremdsprache signifikant beeinträchtigt wird. Das Sprachverständnis ist hoch und zeigt keinen signifikanten Unterschied zur Kontrollbedingung. Zuglärm zeigt dagegen bei gleichen Lärmpegeln lediglich signifikante Auswirkungen auf Wortidentifikation, nicht aber auf orale Instruktionen (Satzverständnis) oder das Kurzzeitgedächtnis im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Im direkten Vergleich zwischen Zuglärm und der Interferenz durch eine Fremdsprache zeigt sich, dass ein nicht signifikanter Trend der schlechteren Leistung im Sprachverständnis für Schienenlärm bestätigt werden kann. Für das Satzverständnis und das Kurzzeitgedächtnis schneidet beide Male die Sprachinterferenz signifikant schlechter ab als Schienenlärm bei gleichen Pegeln (siehe Abb. 91).

Auch Lercher, Evans und Meis (2003) bestätigen, dass sowohl die freie ebenso wie die intentionale, explizit vorher angekündigte Erinnerungsleistung bei lauterem Schallpegeln von Grundschulern im Altersdurchschnitt von 9.7 Jahren signifikant mehr beeinflusst wird als bei leiseren Schallpegeln.

Izumiyama (1964) stellt in seinem Laborexperiment heraus, dass mit steigendem Lärmpegel auch der Silbendeutlichkeitsindex (entspricht dem Sprachverständnis) trotz steigender Stimmlautstärke sinkt. Bei 74phon Klassenlautstärke und 65phon Lehrerlautstärke resultiert ein Artikulationsindex von 56.3 %, wobei 80 % einem

hundertprozentigen Verständnis entsprechen. Maruyama (1964a) berichtet in seinem Laborexperiment mit sechs Studenten ebenfalls einen Stimmlautstärkeanstieg ab 70phon, wobei ein Nacheffekt in dem Sinne zu verzeichnen ist, dass die Stimme nach einem Spitzenpegel von 80phon und abnehmender Lautstärke erhoben bleibt.

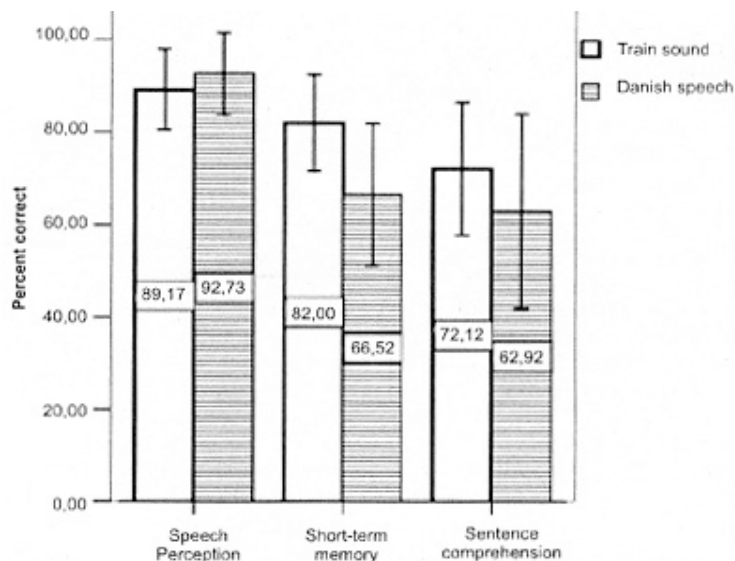


Abb. 91: Vergleich der Leistungsbeeinträchtigung durch Schienenlärm und Sprachinterferenz (Klatte u. a. 2007)

In zwei Experimenten im Labor zu mentalen Berechnungen unter Schallbelastung durch Schienenverkehr von 2th, 4th und 6th Graden in Sendai zeigen sich in Lärmperioden ab 70phon signifikant verlangsamte Antwortreaktionen in den Rechenaufgaben (Maruyama 1964b), auch die Anzahl falscher Antworten und Nichtantworten steigt bei 70 und 75phon. Bei Nagatsuka (1964) schneidet die Experimentalgruppe unter Schienenlärm (70phon) signifikant schlechter ab als die Kontrollgruppe ohne Schienenlärmbelastung, im Besonderen die 2th und 4th Grader; bei den 6th Graden gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen Experimental- und Kontrollgruppe. Intraindividuell zeigt sich, dass die Fehlerrate in der Lärmbedingung signifikant höher ist als während der lärmfreien Intervalle, wobei jüngere Schüler mehr beeinflusst sind als ältere. Die 2nd Grader scheinen sogar in der Ruhebedingung beeinflusst.

Bronzaft und McCarthy (1975) bestätigen, dass lärmexponierte Kinder in einem lauten Klassenraum im Vergleich mit einem leiseren signifikant schlechtere Leistungen erbringen in einem Achievement Test, in dem die Lesefähigkeit getestet wird. Außerdem geben sie häufiger an, dass es für den Lehrer schwer sei, sie zu hören, dass es zu laut sei in der Klasse, dass der Lärm die Arbeit erschwere, dass der Zuglärm sie ärgere und das Denken behindere.

Lercher u. a. (2002) können in ihrer österreichischen Feldstudie mit 123 Grundschulern (dritte und vierte Klasse) zeigen, dass Kinder ohne biologische Risikofaktoren (geringes Geburtsgewicht <2500g oder Frühgeburt, Alter der Mutter, Geburtsfolge) keine Lärmefekte in ihrer selbst berichteten psychischen Gesundheit (KINDL Test) und dem vom Lehrer berichteten Verhalten im Klassenraum aufweisen. Der durch die Kinder berichtete mentale Gesundheitsstatus wie auch das schlechtere Verhalten im Klassenraum ist bei Kindern mit biologischen Risikofaktoren signifikant mit dem Lärmausmaß verbunden (siehe Abb. 92).

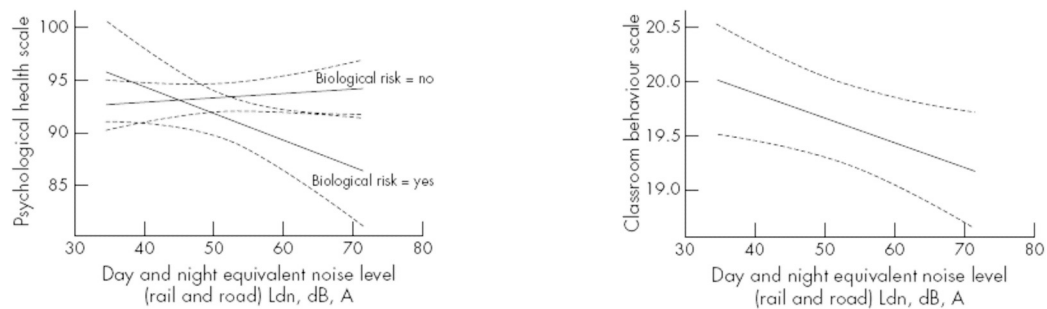


Abb. 92: Dosis-Wirkungskurven für psychische Gesundheit und Verhalten im Klassenraum als Funktion der Schallbelastung (Lercher u. a. 2002)

Zu beachten ist, dass Lercher keine quellspezifischen Lärmeffekte berichtet, sondern einen Gesamtlärmindex über die drei Hauptverkehrsquellen Schienen-, Straßen- und Fluglärm bildet.

Ähnlich wie im Bereich der lärmbedingten Leistungseinbußen, findet sich im Abschnitt über Schienenlärmauswirkungen bei Kindern oft nur mangelnde Evidenz oder aber ungenügend häufig replizierte Ergebnisse aus einzelnen Primärquellen. Dies führt zu der Vergabe der *Evidenzstufe 3(+ +/–)*.

5.1.7 Physiologische Reaktionen (N=10)

Die im folgenden Abschnitt besprochenen Studien befassen sich mit physiologischen Reaktionen des Körpers, welche unter Umständen durch Schienenverkehrslärm ausgelöst werden. Aus dem Datenpool befassen sich zehn Referenzen mit diesem Themengebiet, angefangen im Jahr 1964 (Maruyama 1964a; Maruyama 1964b) bis hin zu aktuelleren aus dem Jahr 2009 (Graham u. a. 2009) (siehe Tab. 23).

Tab. 23: Empirische Arbeiten zu physiologischen Parametern

<i>Referenz</i>	<i>Jahr</i>
Ali	2005
Basner, Elmenhorst, Maas, Müller, Quehl & Vejvoda	2008
Di Nisi & Muzet	1989
Di Nisi, Muzet & Weber	1987
Evans, Lercher, Meis, Ising & Kofler	2001
Graham, Janssen, Vos & Miedema	2009
Griefahn u. a.	2008
Maruyama	1964
Maruyama	1964
Yoshida & Nakamura	1988

Da die dieser Gruppe zugehörigen Studien sehr heterogen sind und viele unterschiedliche Fragestellungen behandeln, gestaltet sich eine quantitative, zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse recht schwierig. Dennoch soll versucht

werden, die Studien wie auch ihre Ergebnisse, logisch strukturiert aufzubereiten. So kann zuerst eine Unterteilung in Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt werden. Des Weiteren ist ebenfalls wichtig festzuhalten, ob sich die Studien alleinig mit Schienenlärm befassen oder aber die Folgen des Schienenlärms mit denen anderer Lärmquellen verglichen werden.

5.1.7.1 Feldstudien (N=3-1)

Lediglich drei der hier behandelten Studien sind Feldstudien. Hinzu kommt, dass nur zwei Studien ein ähnliches Studiendesign aufweisen und somit miteinander vergleichbar sind. Diese beiden Studien verwenden zur Operationalisierung retrospektive Fragebögen und behandeln einheitlich die subjektiv empfundenen Reaktionen des Körpers auf Schienenverkehrslärm (Ali 2005; Yoshida und Nakamura 1988). Dem gegenüber steht die Studie von Graham u. a. (2009), die zwar ebenfalls im Feld durchgeführt wurde, jedoch zur Erfassung der Konstrukte objektive Messverfahren verwendet. Die Probanden werden über einen Zeitraum von sechs aufeinander folgenden Nächten untersucht, in denen der Vergleich zwischen Schienen- und Straßenlärm genauer beleuchtet wird. Aufgrund dessen erscheint eine Darstellung der Ergebnisse im Zusammenhang mit den anderen Laborstudien sinnvoller, so dass Grahams Studie erst im nachfolgenden Abschnitt besprochen wird.

Auf die schon genannten zwei Feldstudien soll nun genauer eingegangen werden. Zum einen hat Ali (2005) 714 an Schienenwegen lebende Probanden in Assiut City (Ägypten) befragt. Der angegebene Lärmpegel, Day-Night-Pegel (L_{dn}), wird sowohl gemessen als auch zusätzlich quellspezifisch berechnet. Die Studienteilnehmer leben in fünf unterschiedlichen Gegenden mit differierender Lärmbelastung zwischen 82.7 bis hin zu 93.7 dB(A). Mit Hilfe von Fragebögen erfasst er unter anderem die Annahme der Testpersonen, ob Schienenverkehrslärm ihr Hörvermögen schädige und ob dieser Kopfschmerzen verursache. Zum anderen existiert eine Felduntersuchung von Yoshida und Nakamura (1988), welche 830 verheiratete Frauen mit Hilfe eines Fragebogens über physiologische Symptome befragen, so etwa Magen-Darm-Erkrankungen, Tinnitus oder Ohrschmerzen, Kopfschmerzen und Herzklopfen. Die Frauen sind alle in der Nähe von Schienenwegen sesshaft; der angegebene Lärmpegel wird für die einzelnen Bereiche abgeschätzt. Der Autor gibt einen Lärmpegelbereich von 30 bis 79 dB(A) an und verwendet dazu wie in der Studie von Ali (2005) den Day-Night-Pegel.

Beide Studien geben an, dass der Prozentsatz der Probanden, die Schienenlärm als Auslöser für Kopfschmerzen angeben, mit dem Lärmpegel ansteigt. So beichtet Ali (2005), dass 21 % der Probanden glauben, dass Schienenlärm Kopfschmerzen verursache (Ali 2005). In der Studie von Yoshida (1988) sind bei einem Lärmpegel von 70-79 dB(A) nur 8,6 % der gleichen Ansicht; bis zu 60 dB(A) sogar unter 1 % der Befragten (Yoshida und Nakamura 1988).

Erkrankungen des Ohres wie Schädigung des Hörvermögens, Tinnitus und Ohrschmerzen werden nur von wenigen Probanden angegeben (Ali 2005; Yoshida und Nakamura 1988). Dies deckt sich mit der Annahme im Abschnitt 3.6.1 über die aurale Wirkung von Schall, dass die aurale Wirkung von Schall im Zusammenhang mit Verkehrslärm vernachlässigt werden kann, da die Spitzenpegel kritische Grenzwerte selten überschreiten.

Wie bereits erwähnt befragen Yoshida und Nakamura (1988) die Studienteilnehmerinnen ebenso nach Magen-Darm-Erkrankungen und Herzklopfen, welche möglicherweise einen Mitverursacher im anliegenden Schienenlärm finden. Bei einem Schallpegel von 70 bis 79 dB(A) klagen 8,6 % der Frauen über die genannten Symptome, jedoch gibt bis 60dB(A) keine der Frauen eine so geartete Antwort.

Abschließend sei noch anzumerken, dass Yoshida und Nakamura (1988) eine Lärmpegelschwelle von 70 dB(A) angeben, ab welcher sich die Gesundheit in Form

gehäufte Beschwerden über auftretende Symptome verschlechtert und die Aussagen bezüglich der Störungen im hohen Maße zunehmen.

Tab. 24: Feldstudien zu physiologischen Parametern

<i>Referenz</i>	<i>Stichprobe</i>	<i>Unabhängige Variable</i>	<i>Abhängige Variable</i>
Ali (2005)	714 (58 % Männer)	<i>Lärmpegel</i> : gemessen & berechnet L_{dn} : 82,7-93,7 dB Alter: 5 Gruppen 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, >60 Jahre	Kopfschmerzen Geschädigtes Hörvermögen
Yoshida (1988)	830 (verheiratete Frauen)	<i>Lärmpegel</i> : geschätzt in 15 Gebieten L_{dn} : 30-79 dB(A);	Magen-Darm-Erkrankungen Tinnitus, Ohrschmerzen Kopfschmerzen Herzklopfen

5.1.7.2 Laborstudien (N=7+1)

Für die Untersuchung der physiologischen Reaktionen des Körpers bieten sich Laborstudien an, da die subjektive Einschätzung körperlicher, autonomer und damit unwillkürlicher und teilweise auch unterhalb der Bewusstseinschwelle ablaufender Reaktionen für die Probanden die Existenz dieser körperlichen Veränderungen nicht verlässlich erfasst. Andererseits ist die Verwendung von objektiven Messverfahren im Feldsetting mit einem großen Aufwand verbunden. Dennoch untersuchen Graham u. a. (2009) 36 Probanden in ihrem gewohnten Umfeld. Zur Operationalisierung dienen die Impedanzkardiographie und das Echokardiogramm. Somit können die Autoren die Respiratorische Sinus Arrhythmie (RAS) und die Pre-Ejektions-Periode (PEP) der Probanden aufzeichnen. Mit Hilfe dieser Parameter können Aussagen über die Regulationsfähigkeit des vegetativen Nervensystems gemacht werden.

Die restlichen in diesem Abschnitt genannten Studien sind Laboruntersuchungen, welche zumeist objektive Messverfahren einsetzen. Die hier genannten Studien werden in Tab. 25 dargestellt. Wie die tabellarische Darstellung erkennen lässt, variieren die abhängigen Variablen. Dennoch überschneiden sich inhaltlich einige Fragestellungen in mehreren Studien, so dass die nachfolgende Gruppierung sinnvoll erscheint:

- Herzfrequenz
- Katecholaminkonzentration im nächtlichen Urin
- Kortisolkonzentration im nächtlichen Urin
- Fingerpulsamplitude
- Hautwiderstand
- Respiratorische Sinusarrhythmie
- Pre-Ejektions-Periode
- Blutdruck

Des Weiteren sei noch zu erwähnen, dass die acht Parameter eine Aussage über den Sympathikotonus erlauben und somit zum Ende dieses Abschnittes noch einmal auf diese Gemeinsamkeit eingegangen werden soll, um die Ergebnisse auf diesen Aspekt hin zu beurteilen. Wie im Folgenden festzustellen ist, ist eine eindeutige Tendenz vorhanden, dass durch Schienenverkehrslärm eine körperliche Reaktion zu erwarten ist. So deuten alle untersuchten Parameter auf eine Aktivierung des Sympathikus hin.

Tab. 25: Laborstudien zu physiologischen Parametern

<i>Referenz</i>	<i>Stichprobe</i>	<i>Unabhängige Variable</i>	<i>Abhängige Variable</i>
Basner u. a. (2008/2009)	72 (18-72 Jahre)	Nächtlicher Lärmpegel (Sch., Str., Flug) $L_{\max}=45, 50, 55, 60, 65 \text{ dB(A)}$ 9 unterschiedliche Lärmszenarien (Einzel-, Doppel- und Dreifachexposition) Leise Nacht: 30 dB(A)	Herzfrequenz Cortisol-Konzentration Noradrenalin-Konzentration
Evans (2001)	115 (Kinder)	Lärmpegel zu Hause: $L = 52-71 \text{ dB(A)}$ $L = 34-50 \text{ dB(A)}$ Hintergrundrauschen während der Messungen < 35 dB(A)	Kathecolamin-Konzentration Cortisol-Konzentration Blutdruck Herzfrequenz Subjektives Stresssymptome
Griefahn u. a. (2008)	24	Nächtlicher Lärmpegel (Sch., Str., Flug) $L_{\text{eq}} = 39 \text{ dB(A)}$; $L_{\text{eq}} = 44 \text{ dB(A)}$; $L_{\text{eq}} = 50 \text{ dB(A)}$; Je 195 Flüge, 261 Autos, 172 Züge/ Nacht Leise Nacht: 32 dB(A)	Herzfrequenz
Maruyama (1964)	51 (Kinder)	Schienenlärm: 65-80 Phon (in 5-Phon-Schritten), während der Messung Konstantes Rauschen: 56-59 Phon	Hautwiderstand
Maruyama (1964)	9	Schienenlärm: 65-80 Phon (in 5 Phon Schritten), während der Messung Konstantes Rauschen: 56-59 Phon	Hautwiderstand
Di Nisi & Muzet (1989)	96 (Frauen)	Fluglärm: $L_{\max}=90\text{dB(A)}$ Schienenlärm: $L_{\max}=80,5\text{dB(A)}$	Herzfrequenz Finger-Puls-Amplitude
Di Nisi, Muzet & Weber (1987)	80	Lärmquellen: Flug: $L_{\max}=86\text{dB(A)}$, LKW: $L_{\max}=81 \text{ dB(A)}$, Motorrad: $L_{\max}=71 \text{ dB(A)}$, Zug: $L_{\max}=76,6 \text{ dB(A)}$ Telefon: $L_{\max}=74,5\text{dB(A)}$ (für je 20 min., zum Teil mit Video)	Herzfrequenz Finger-Puls-Amplitude
Graham u. a. (2009)	36	Lärmpegel Innen: $L=15-48 \text{ dB(A)}$ Lärmpegel Außen: $L=50-65 \text{ dB(A)}$	Respiratorische Sinus Arrhythmie (RAS) Pre-Ejektions-Periode (PEP)

Herzfrequenz (N=5)

Die Messung der Herzfrequenz erfolgt in allen Referenzen mit der Hilfe eines Elektrokardiogramms (EKG). Dies ist eine häufig angewendete und sichere Messmethode.

Zwei dieser Referenzen sind Schlaflaborstudien. Der Schlaf der Probanden wird mit Hilfe eines Polysomnogramms überwacht; auf diese Weise wird vor allem der Anstieg der Herzfrequenz bei Aufwachreaktionen durch Verkehrslärm beobachtbar. Des Weiteren geben beide Untersuchungen an, dass diese Aufwachreaktionen durch Schienenverkehrslärm gehäuft auftreten (Basner u. a. 2008; Griefahn u. a. 2008). Die Studie von Griefahn u. a. (2008) berichtet darüber hinaus ebenfalls von einem signifikanten Anstieg der Herzfrequenz ohne Erwachen nach der Einspielung von

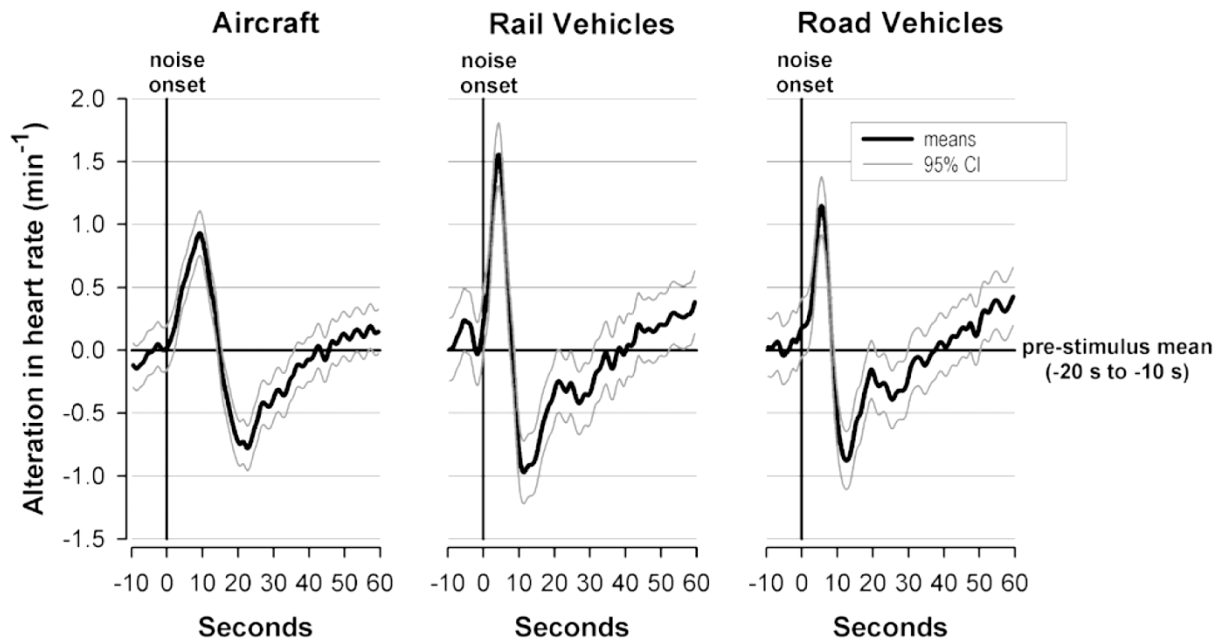


Abb. 93: Mittelwert inkl. Konfidenzintervalle (95 %) für die Herzfrequenz nach Verkehrslärm ohne Erwachen (Griefahn u. a. 2008)

In der Studie von Evans u. a. (2001) wird bei Kindern aus lauter, beziehungsweise leiser Umgebung die Herzfrequenz gemessen. Dieser kommt zu dem Ergebnis, dass Kinder aus lauten Gebieten eine höhere reaktive Herzfrequenz vorweisen als Kinder aus leisen Wohngebieten.

Wenn auch die Studien von di Nisi, Muzet und Weber (1987) und di Nisi und Muzet (1989) unterschiedliche Fragestellungen behandeln, können beide Studien bezogen auf die Herzfrequenz in Abhängigkeit zum Verkehrslärm keinen Unterschied zwischen den einzelnen Lärmquellen feststellen. Im Allgemeinen ist jedoch eine Reaktion auf Verkehrslärm zu beobachten. Wenn auch ein direkter Vergleich der einzelnen Studien durch die unterschiedliche Methodik und Fragestellung nicht möglich ist, wird eine klare Tendenz deutlich, da alle genannten Studien über einen Anstieg der Herzfrequenz durch Schienenverkehrslärm berichten.

Katecholamin- und Kortisol-Konzentration (N=2)

In einer Studie von Basner u. a. (2008) werden die Probanden für elf aufeinander folgende Nächte im Schlaflabor untersucht. Der Katecholamin- und Kortisol-Anstieg durch den nächtlichen Verkehrslärm soll anhand der nächtlichen Ausscheidungsrate der Hormone im Urin festgestellt werden. Hierbei können keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Expositions-, Kontroll-, Anpassungs- und Erholungsnächten herausgestellt werden; weder für Adrenalin und Noradrenalin, noch für Kortisol. Alle gemessenen Werte bleiben im Normbereich. Nichts desto trotz betonen Basner u. a. (2008), dass eine nächtliche Aufwachreaktion mit einer kurzfristigen Ausscheidung von Stresshormonen assoziiert ist und die in der Studie durchgeführte Methode zu wenig sensitiv sei, um diese abzubilden. Dagegen können Evans u. a. (2001) bei Kindern aus lauten Gebieten im Unterschied zu Kindern aus leisen Wohngebieten eine signifikante Erhöhung des freien Kortisols feststellen. Bei der Katecholamin-Messung im nächtlichen Urin findet sich jedoch kein vergleichbares Ergebnis. Schlussendlich stellen Evans u. a. (2001) wie auch Basner u. a. (2008) keinen Unterschied zwischen den einzelnen Lärmquellen fest.

Anzumerken sei jedoch, dass die Probanden in der Studie von Basner u. a. (2008) dem Verkehrslärm nur für eine Dauer von 11 Nächten ausgesetzt sind, wohingegen die Kinder in der Untersuchung von Evans u. a. (2001) in den jeweiligen Gebieten für eine weitaus längere Zeit leben. Der Anstieg des freien Kortisols kommt in dem Sinne als eine dauerhafte Reaktion des Körpers auf die ständige Lärmbelastung durchaus in Betracht, wobei - dieses Argument verstärkend - bei kurzzeitiger Lärmbelastung eine ähnliche Reaktion nicht nachgewiesen werden kann.

Fingerpulsamplitude (N=2)

Di Nisi u. a. (1987, 1989) untersuchen in ihren Studien unter anderem die Fingerpulsamplitude, durch welche das Finger-Puls-Volumen angezeigt werden kann, welche wiederum die Funktion eines Markers für die periphere Durchblutung einnimmt. So zeigt zum Beispiel eine Senkung des Volumens eine periphere Vasokonstriktion an. Wenn auch in den Studien unterschiedliche Personengruppen untersucht werden, kann in beiden Untersuchungen eine Reaktion durch Lärm festgestellt werden. In Bezug auf verschiedene Lärmquellen wird in beiden Referenzen kein signifikanter Unterschied angegeben.

Hautwiderstand (N=2)

In den Studien von Maruyama (1964a; 1964b) wird die Hautleitfähigkeit bei Schulkindern gemessen. Während der Messung lösen die Kinder Rechenaufgaben oder haben die Aufgabe die Zahlen 3 (sλn) und 4 (jon) laut auszusprechen. Bei der Durchführung werden unterschiedliche Verkehrslärmpegel eingespielt. In beiden Studien wird berichtet, dass die Kinder ab 75 Phon eine Reaktion des Hautwiderstandes zeigen (Maruyama 1964a; Maruyama 1964b).

Respiratorische Sinusarrhythmie und Pre-ejektions-Periode (N=1)

In der bereits zuvor erwähnten Feldstudie von Graham u. a. (2009) wird die Respiratorische Sinus- Arrhythmie und die Pre-Ejektions-Periode der Probanden untersucht. Beide Parameter dienen als Indikator für den Sympathikotonus. In den Ergebnissen beschreiben Graham u. a. einen klaren Zusammenhang zwischen dem Innenraumlärmpegel und dem sympathischen Tonus am Herzen.

Blutdruck (N=1)

Alleinig die Studie von Evans u. a. (2001) untersucht bei 115 Kindern aus lauten und leisen Schienenlärmwohngebieten den Blutdruck. Die Messungen werden unter Ruhebedingungen ($L_{eq}=35\text{dB(A)}$) durchgeführt, unter welcher kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Gruppen festgestellt wird.

Aufgrund mangelnder empirischer Untersuchungen und der bisweilen ausschließlich geringen Effekte in den Querschnittsstudien selbst, liegt das *Evidenzniveau* des Studienabschnitts zu lärmbedingten physiologischen Reaktionen auf der *Stufe 4 (+/-)*.

6. Diskussion

Der Diskussionsteil des Berichts beginnt mit einem kurzen Resümee, eine (auch methoden)kritische Auseinandersetzung mit den in den Reviews berichteten Studienergebnissen. Dem folgt die Skizze eines ‚optimierten Studiendesigns‘ in Hinblick auf den festgestellten Forschungsbedarf zu möglichen gesundheitlichen Langzeitfolgen von Schienenlärm: Hier sollen unter Beachtung der Eigenheiten der verschiedenen Lärmarten im Wege von Analogieschlüssen Ergebnisse aus besser beforschten Lärmbereichen wie Straßen- und Flugverkehr fruchtbar gemacht werden. Den Schluss bildet eine Kritik des Schienenbonus auf Basis der aktuellen Befundlage insbesondere zu medizinisch-physiologischen Reaktionen auf Schienenlärm im Vergleich mit anderen Verkehrslärmquellen und der Verengung des Gesundheitsschutzes vor Schienenlärm ausschließlich auf die Betrachtung des Beurteilungspegels ohne Spitzenpegelkriterium.

6.1 Schlussfolgerungen aus den Reviews

Der Review umfasst 119 empirische Primärarbeiten über die Auswirkungen von Schienenlärm auf die sieben bereits mehrmals erörterten Aspekte eines ganzheitlichen Gesundheitsbegriffs (siehe Abb. 94). Diese erstrecken sich auf einem Kontinuum von eher subjektiv-psychischen, selbst berichteten Konstrukten wie etwa der Belästigung und dem Gestörtheitsempfinden bis hin zu manifesten, medizinisch-biologischen Aspekten im Bereich der physiologischen und endokrinen Reaktionen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. In dem Strukturbaum der Abb. 94 wird die offensichtlich spärlicher werdende wissenschaftliche Evidenz mit zunehmender objektiver Erfassbarkeit der untersuchten Konstrukte deutlich sichtbar.

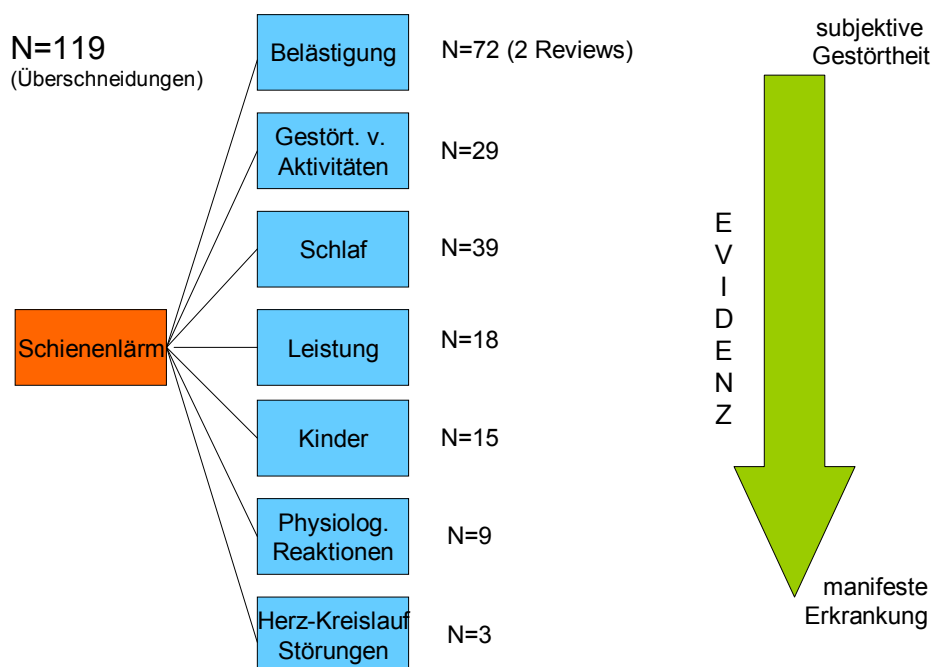


Abb. 94: Überblick über die Struktur empirischer Primärarbeiten

Die Darstellung veranschaulicht, dass eine Vielzahl empirischer Forschungsarbeiten im Bereich der subjektiven Gestörtheit durch Schienenlärm, demnach auf einer psychischen Ebene, vorliegt; ein klaffender Mangel hingegen im Bereich medizinisch „harter“, objektiver Endpunkte. Gerade diese somatisch-biologischen Endpunkte sind es aber, bei welchen mit Sicherheit Beeinträchtigungen durch Schienenlärm zu erwarten sind und die auf einer medizinisch-versorgungstechnischen (im besten Falle präventiven) und damit

auch gesetzlich-politischen Ebene (z.B. in der Festsetzung geeigneter Immissionsgrenzwerte) mehr Beachtung finden müssen. Die mangelnde Untersuchung manifester Gesundheitsauswirkungen mag daran liegen, dass sich die Auswertung und Umsetzbarkeit epidemiologischer Feldforschung mit Fragebögen im Querschnittsdesign bei weitem ökonomischer gestalten als apparativ unterstützte (z.B. durch die Polysomnographie in Schlaflaborstudien) Laborforschung oder längsschnittlich ausgerichtete Felduntersuchungen zur Bestimmung lärmbedingter Langzeitgesundheitsfolgen. Diese Forschungslücke wiegt umso schwerer, als sich der hier zu diskutierende Schienenbonus ausschließlich auf Studien zu Belästigungswerten betroffener Anwohner stützt.

Im Folgenden seien ein kurzes Fazit und eine kritische Beurteilung der zusammengetragenen Forschungsergebnisse aus den einzelnen Reviews gegeben.

6.1.1 Belästigung

Mit 72 gefundenen empirischen Arbeiten macht der Belästigungsreport den quantitativ aussagekräftigsten Teil des Reviews aus. Dieser lässt sich in sechs Bereiche unterteilen, die im Zusammenhang mit dem subjektiv erfragten Belästigungsempfinden durch Schienenlärm eine Rolle zu spielen scheinen (siehe Abb. 95).

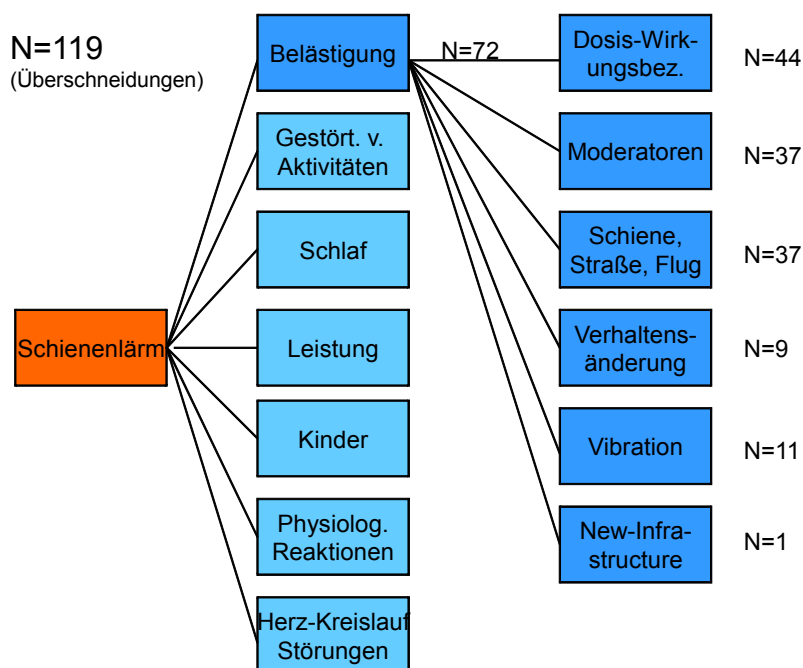


Abb. 95: Struktur der Belästigungsdaten

Zum einen zeigt sich in 44 Studien eine klare Dosis-Wirkungsbeziehung (1) in Form einer positiven nicht linearen Beziehung der Belästigten (zumeist operationalisiert als der Prozentsatz der *Highly Annoyed People*) zu den teils gemessenen, teils berechneten Schallpegeln. Diese reichen von einem äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq,24h}$ von 30 bis 88 dB(A). Die Variation der aufgestellten Regressionskurven dieses Zusammenhangs und ihrer Funktion ist mit der divergierenden Anwendung folgender Faktoren zu erklären:

- Pegelmaße ($L_{eq,24hr}$, L_{max} , $L_{day/night}$) als unabhängige Variablen
- Messung und Berechnung von Lärm
- Erfassung der Belästigung (unterschiedliche, verschieden gut validierte Fragebögen, Interviews, differierende Skalenformate usw.)
- Darstellung der abhängigen (analoge oder in Prozentangaben transformierte Darstellung der Skalenwerte) und unabhängigen Variablen (Pegelmaß) im Koordinatensystem
- Einbezogene Moderatoren/Mediatoren
- Messung und/oder Berechnung des Lärmindezes

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich eine aus verschiedenen Studienergebnissen resultierende einheitliche Dosis-Wirkungsbeziehung der Belästigung als Funktion des Schallpegels auf der Grundlage empirischer Daten *nicht* festschreiben lässt, in der fixe Belästigungsausmaße über einem steigenden Schallpegel abzulesen sind. Unter Einbezug relevanter, konfundierender Faktoren kann lediglich von einer bzw. mehreren (in Anbetracht unterschiedlicher individueller Schallbelastungssituationen) Muster-Regressionsfunktionen ausgegangen werden, die eine grobe Schätzung bzw. Vorhersage der Belästigung bei gegebener Geräuschbelastung zulassen, um sich daran in der Immissionsschutzgrenzwertsetzung zu orientieren.

Im Weiteren hängt das individuelle lärmbedingte Belästigungsausmaß von einer Reihe von Moderatoren (2) ab, die sich in demographische, persönliche, akustische und nicht akustische Faktoren unterteilen lassen. Die wichtigsten darunter mit einer starken empirischen Evidenz sind die akustisch bedingten Faktoren der Distanz zum Gleis und der Schallpegel mit einem positiven Einfluss. Eine moderate Evidenz, auch aufgrund einer teilweise dünnen Datenlage, im Zusammenhang mit steigendem Belästigungsausmaß erbringen die nachfolgend aufgeführten Faktoren (für „+“ bei positivem Zusammenhang und „-“ bei negativem Zusammenhang)

- Anzahl der Lärmereignisse (+)
- persönliche Lärmempfindlichkeit (+)
- Tageszeit (besonders in natürlichen menschlichen Erholungszeiten wie nachts, im Sommer und am Wochenende)
- Beschäftigung während der lärmbedingten Störung.

Die Moderatorfunktion verschiedenster Faktoren wird in den Studien oft unzureichend mit einbezogen bzw. berichtet. Demographische Parameter scheinen außer dem Alter kaum einen Einfluss zu haben, obwohl oft eine nicht repräsentative junge, gesunde Stichprobenauswahl an betroffenen Anwohnern untersucht wurde. Hinzuweisen sei auf die Interaktion verschiedenster Moderatorvariablen, wobei in den Pfadmodellen von Lambert, Champelovier und Vernet (1993; 1996) sichtbar wird, dass es über- und untergeordnete Einflussgrößen zu geben scheint. Da Belästigung ein subjektives Maß des persönlichen Empfindens ist, sind vor allem die individuelle Lärmempfindlichkeit und damit die wahrgenommene Lautheit wesentliche Einflussgrößen, so dass bei vergleichbarem Schallpegel eine große interindividuelle und auch in Abhängigkeit von anderen persönlichen und Umgebungsfaktoren eine intraindividuell schwankende Belästigungsreaktion resultieren kann.

Im dritten Bereich des Belästigungsabschnitts geht es um den Vergleich (3) quellenpezifischer Belästigungswerte. Hier konnten 37 Studien ausfindig gemacht werden, die einen Vergleich zwischen den drei Hauptverkehrslärmarten Straßen-, Flug- und Schienenverkehr berichten. Dabei haben sich drei wesentliche Trends herausgestellt.

In 14 Untersuchungen zeigt sich Schienenlärm weniger belästigend als Straßen- und Flugverkehrslärm. Genau diese Studien sind es, die einen Schienenbonus von 5 dB(A) gerechtfertigt erscheinen lassen. In neun Arbeiten hingegen stellt sich Schienenlärm als störender als die beiden anderen Lärmquellen heraus. In wiederum neun weiteren Untersuchungen kommt es zu gemischten Befunden, in welchen die Reihenfolge des Belästigungsempfindens durch die drei Quellen je nach untersuchtem Störungsbereich, Schallpegel, Kombination der Belastungssituation und berücksichtigten Moderatoren variiert. Weiterhin kann bestätigt werden, dass Güterzüge belästigender wirken als Passagierzüge sowie Hochgeschwindigkeitszüge in drei Untersuchungen stärker belästigen als konventionelle Zuglinien. All diese Lästigkeitsunterschiede lassen sich neben methodischen Artefakten aufgrund unterschiedlicher Untersuchungsdesigns in den Studien unter anderem auf die verschiedenen Lärmcharakteristika und -profile der Lärmproduzenten zurückführen:

- *Frequenzzusammensetzung*: Schienenlärm weist hohe und mittlere Frequenzen (eigentlich als unangenehmer empfunden), Straßenlärm tieffrequente Töne von 100-200 Hz auf. Wenn die Geschwindigkeit des Straßenverkehrs steigt, übertönen Rollgeräusche die Motorengeräusche und die Frequenz steigt auf 1000-2000 Hz wie beim Zug.
- *Geräuschhomogenität und –konstanz/Informationsgehalt*: Schienenlärm hat immer einen ähnlichen Klangcharakter und ist relativ homogen, bei Straßenlärm gibt es, je nach Fahrzeugtyp und Fahrweise, erhebliche Variationen in Klangfarbe und Schallpegel (bis zu 20dB(A)). Schienenlärm zeigt sich mit geringerem Informationsgehalt, bei Straßenlärm treten viele überlagernde Einzelschallquellen auf.
- *Regelmäßigkeit*: Schienenlärm tritt fahrplanmäßig auf; dies erleichtert die Gewöhnung, weil er damit vorhersehbar ist.
- Die *Anzahl der Schallereignisse* ist bei Schienenlärm geringer.
- Schienenlärm weist deutlich lautere *Maximalpegel* bei gleichem äquivalentem Dauerschallpegel auf.
- *Geräuschpausen*: mehr Pausen beim Schienenlärm; Straßenlärm existiert zumeist ununterbrochen; Schienenlärm hat außerdem geringere Lärmwirkungszeiten.
- *Pegelanstieg*: schnellere Anstiegszeiten der Einzelschallpegel beim Schienenlärm (insbesondere bei schnellen Zügen), Züge haben aber eine lange Vorwarnzeit, weil sie schon lange vorher zu hören sind.
- Die *Dauer des vorbeifahrenden Zuges* ist größer als eines Einzelereignisses beim Straßenverkehr.
- *Beeinflussbarkeit* der Geräusche durch den Fahrzeugführer und Vermeidbarkeit von Störungen (Geräusche vom Zug können durch Lokführer kaum beeinflusst werden, Autogeräusche aber durch die Fahrweise schon).
- Die *Abgasbelastung* ist höher beim Straßenlärm und dadurch auch Geruchsbildung.

- *Entfernung zur Quelle* bzw. Abstand zwischen Emmissions- und Immissionsort: bei Straßenlärm im Durchschnitt geringerer Abstand zwischen Verkehrsweg und Wohnbebauung.
- *Quellen- und Geräuschbewertung:* Bewertung der Geräusche beeinflusst Belästigungsurteil, Schienenlärm wird als umweltfreundlicher, weniger gefährlich und weniger ungesund, aber auch als weniger bequem und umständlicher angesehen, für ältere Menschen ist die Bahn mit Nostalgie verbunden.
- *Längerfristige Entwicklungen:* Die Verkehrsmenge hat beim Straßenlärm zugenommen, beim Schienenlärm ist ein Ausbau der Hochgeschwindigkeitszüge, Verlagerung des Güterverkehrs in die Abend und Nachtstunden mit entsprechendem Anstieg der nächtlichen Belastung zu verzeichnen.

Zudem sollte in der Betrachtung lärmbedingter Belästigung Beachtung finden, dass Schienenlärm im realen Setting selten allein, sondern meist zusammen mit anderen Geräuschquellen (z.B. Straßen- und anderem Verkehrslärm) auftritt und je nach Geräuschbelastungssituation im Verbund mit anderen Quellen die Belästigung durch Schienenlärm variiert. Dies zeigt sich beispielhaft in den Pfadmodellen von Lam u. a. (2009; 2008), in denen das Ausmaß der Belästigung durch Schienenlärm auch durch den simultanen Geräuschpegel des Straßenlärms mit beeinflusst wird. Ist Straßenlärm dominant (mindestens 5 dB(A) lauter als Schienenlärm oder sind beide Quellen gleich laut, zeigt sich, dass mit steigendem Schienenlärmpegel die Belästigung abnimmt, die wahrgenommene Lautheit allerdings zunimmt. Ist Schienenlärm dagegen dominant, wirkt er sich beide Male in einer positiven Beziehung zur Belästigung und wahrgenommenen Lautheit aus. Wie oben bereits erwähnt, scheint Straßenlärm bei gleichem äquivalentem Dauerschallpegel durch sein Lärmprofil teilweise belästigender zu wirken als Schienenlärm, so dass die zusätzliche bzw. separat erfragte Belästigung durch zusätzlichen Schienenlärm nicht ansteigt - wenn Straßenlärm ebenso laut oder sogar lauter als Schienenlärm simultan vorherrscht -, sondern eher sinkt, da sich die Wahrnehmung eher auf den störender wirkenden Straßenlärm zu fixieren scheint.

In einer Laborstudie von Basner u. a. (2008) zeigte sich, dass die subjektiv berichtete Schlafqualität in Nächten mit Lärm aus drei simultan eingespielten Lärmquellen (Flug-, Straßen- und Schienenlärm) am schlechtesten beurteilt wird im Vergleich mit Nächten mit Geräuschkombinationen aus einer Doppel- oder singulärer Belastung. Auch ändern sich je nach Kombination der Lärmquellen die Belästigungswerte. Diese Ergebnisse deuten klar darauf hin, dass individuelle Reaktionen wie das subjektive Belästigungsempfinden und folglich auch weitere physiologische Reaktionen, die indirekt über den Pfad der Belästigung im Sinne des Lärms als psychosozialer Stressor eingeleitet werden, in ihrem Ausmaß variieren können. Die Kette von Lärm als psychosozialer Stressor (indirekt über den Belästigungspfad) kann sich fortziehen über spontane unwillkürliche somatische Folgeerscheinungen und damit eventuell langfristig auch chronische Veränderungen im peripheren autonomen Nervensystem je nach Kombination der Geräuschbelastung, wie sie in diversen Formen in einer höchst motorisierten und damit nicht nur schalltechnisch komplexen Umwelt vorkommt.

Verhaltensänderungen (4), die durch Belästigung vermittelt werden, sind mit moderater Evidenz in neun Studien vorwiegend in rein deskriptiver Form berichtet. Darunter fallen vor allem die Fensterstellgewohnheit (Fenster werden mit steigendem Pegel eher geschlossen), wobei Straßenlärmanwohner bedeutend häufiger das Fenster schließen als Schienenlärmanwohner. Ab einem Außenpegel von $L_{eq,24h} > 80$ dB(A) halten bis zu 40 % der Schienenlärmanwohner das Fenster geschlossen. Gleichwohl scheinen die befragten Lärmbelasteten eine Störung durch den intermittierenden Schienenlärm zu Gunsten

frischer Luft durch ein geöffnetes Fenster eher in Kauf zu nehmen als durch den dauerhaft rauschenden Straßenlärm. Verhaltensänderungen wie etwa das Wechseln/Verlassen eines gerade besetzten Raumes oder auch Umzugspläne bzw. konkrete Umzüge, persönlich veranlasste Lärminderungsmaßnahmen (z.B. Doppelfenstereinbau) spielen in den gefunden Untersuchungen eine geringere Rolle.

Im fünften Bereich des Abschnitts über Belästigung zeigt sich, dass Lärm und simultane Vibration (5) bezüglich der Belästigungsreaktion interagieren. Mehrere Befunde weisen darauf hin, dass bei abnehmender Distanz zum Gleis Vibration eine zunehmende Rolle spielt, wobei bei hohem Lärmpegel Vibration einen untergeordneten Einfluss zu haben scheint. Bei niedrigeren Lärmpegeln steigt die Vibration mit steigendem Pegelmaß. Auch hier muss mit dem Einfluss verschiedener Moderatorvariablen (z.B. der Schlafzimmerausrichtung, der Geschwindigkeit und technischen Beschaffenheit der Züge und der Distanz zum Gleis) gerechnet werden.

Der New-Infrastructure-Effekt (6), der eine stärkere Belästigung gegenüber neu gebauten Verkehrswegen verglichen mit bereits vorhandenen verzeichnet, wird in zwei Studien bestätigt. Diese Begebenheit lässt sich mit einer verminderten Kontrollwahrnehmung und einer Verärgerung über diesen Kontrollverlust verstehen, die sich belästigungssteigernd auswirkt. Durch diesen Effekt wird einmal mehr die einschneidende Bedeutung subjektiver (Moderator)Variablen auf das persönliche Belästigungsempfinden deutlich; so etwa die Einstellung betroffener Anwohner gegenüber dem Verkehrsmittel an sich oder als in Anspruch genommenes Transportmittel, aber auch die Einstellung gegenüber Verantwortlichen und Autoritäten. Darüber hinaus können Faktoren wie die Zufriedenheit mit getätigten Lärmschutzmaßnahmen, der Gebrauch des Transportmittels oder auch die Beurteilung der Lärmquelle als gefährlich das Belästigungsausmaß beeinflussen.

So lässt sich festhalten, dass Belästigung ein subjektives Maß ist, das in vielfältiger Weise mit anderen psychischen und teils auch objektiven Parametern interagiert und demnach inter- und intraindividuell in und ohne Abhängigkeit vom Schallpegel schwanken kann. Demnach sollte dieses Konstrukt nicht alleiniger Bewertungsmaßstab für gesetzlich verankerte Schallschutzgrenzen darstellen, da einer breit gefächerten, heterogenen Bevölkerungsschicht, die durch Schienenlärm betroffen ist, damit nicht fair Rechnung getragen werden kann.

6.1.2 Gestörtheit von Aktivitäten

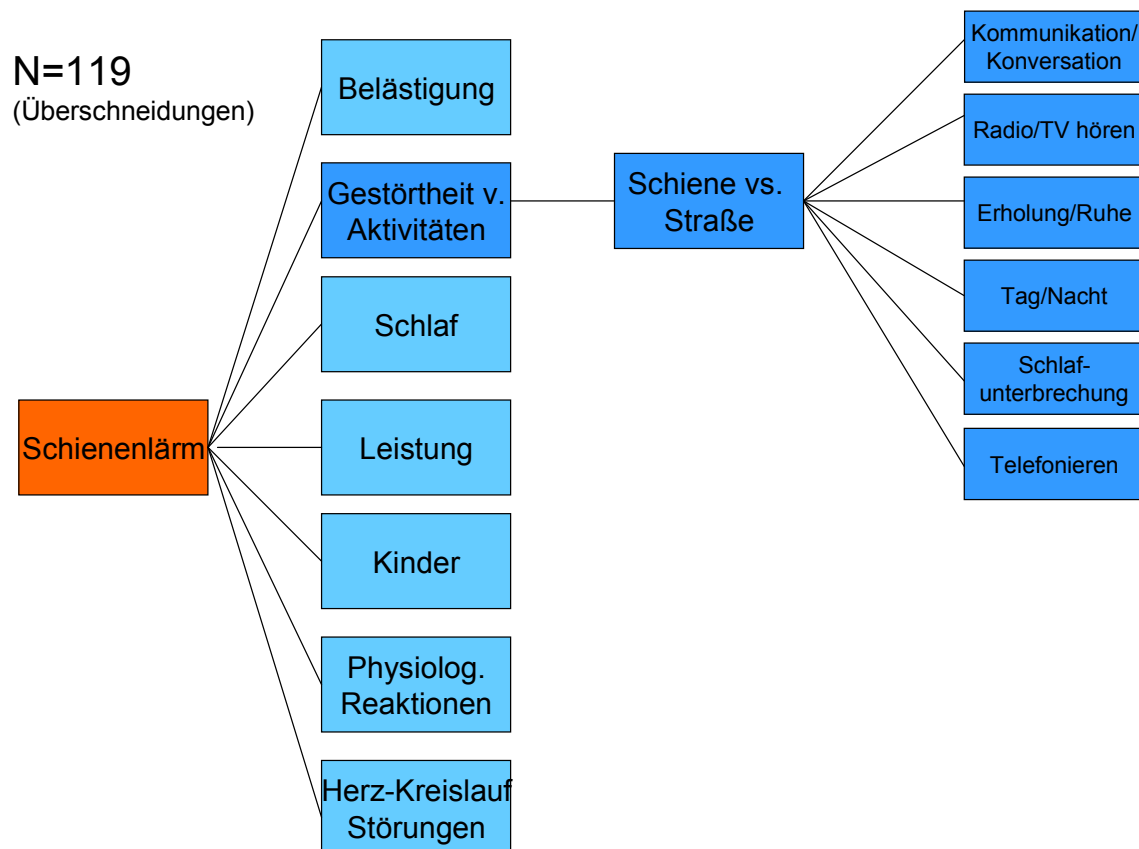


Abb. 96: Struktur der Daten zu gestörten Aktivitäten

Die erfragte *Belästigung* wird durch die fehlende Verwendung klar definierter Konstruktbeschreibungen und eindeutiger Items in den Fragebögen begrifflich oft unzureichend getrennt vom Aspekt der subjektiven *Störung* durch Schienenlärm, vor allem während alltäglicher Aktivitäten. In diesem Konstruktbereich (siehe Abb. 96) wird zumeist ein Vergleich zwischen Schienen- und Straßenlärm angeführt. Dabei kristallisiert sich in vier Studien ein Schienenbonus für die allgemeine Störung der Ruhe und Erholung in der Wohnung, für die allgemeine Störung über Tag und Nacht und auch für die subjektiv berichteten Schlafstörungen heraus. In 13 Studien bestätigt sich ein klarer Schienen*malus* für die Störung der Kommunikation (Konversation, Radio und TV hören/sehen) im Innenbereich, aber auch die Störung der Ruhe und Erholung außerhalb der Wohnung. Dies scheint durch die deutlich höheren Spitzenpegel bei Schienenlärm plausibel, die eine Unterbrechung der Verständlichkeit des gesprochenen Wortes verursachen können. Im Allgemeinen scheint Schienenlärm aber aufgrund seines intermittierenden Lärmcharakters weniger störend als Straßenlärm. Insgesamt steigt die Gestörtheit mit steigenden Pegeln, bei offenen Fenstern, im Sommer und am Wochenende, sowie morgens und abends verglichen mit der Mitte des Tages. Darüber hinaus kann die Störung von Aktivitäten erneut zu einem gesteigerten Belästigungsempfinden führen, wie Lam u. a. (2008; 2009) in ihren Pfadmodellen verdeutlichen. Hier wird die Interaktion dieser beiden Konstrukte deutlich, die sich nicht nur auf der Ebene einer begrifflichen und messtechnischen Vermischung der erwähnten Parameter abspielt, sondern auch auf einer realen phänomenalen Wirklichkeitsebene.

6.1.3 Kinder

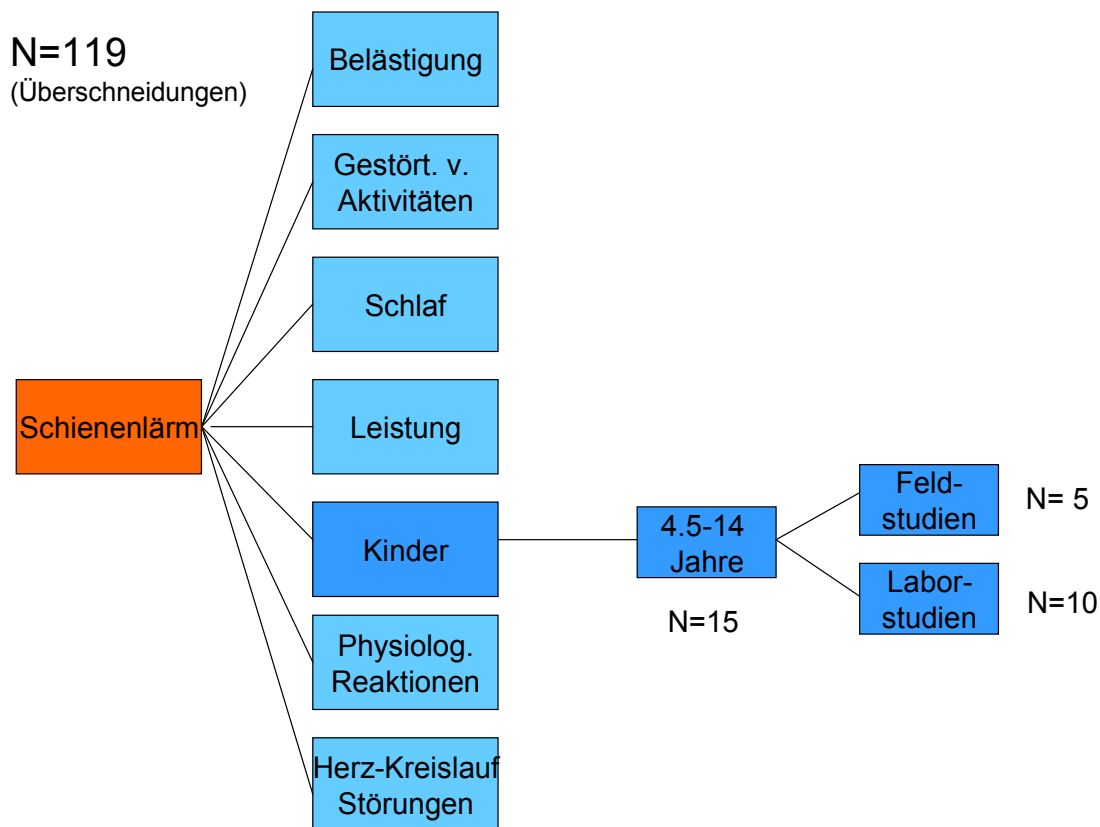


Abb. 97: Struktur der Daten zu Lärmwirkungen bei Kindern

In zehn Labor- und fünf Feldstudien wurde für den Altersbereich von 4.5 bis 14 Jahren der Einfluss von Schienenlärm vor allem auf Leistungsfaktoren untersucht (siehe Abb. 97). In den Bereichen der Lesefähigkeit, der Vokalisation, des Text- und Sprachverständnisses, von Gedächtnis- und Erinnerungsaufgaben, der Daueraufmerksamkeit sowie des Rechnens und auch der Motivation und des psychophysischen Stresses können zumeist lediglich geringe oder gar keine Effekte entdeckt werden. Zuerst sei hier aber auf die geringen Stichprobengrößen im teilweise einstelligen Bereich und das mit Sicherheit störend wirkende künstliche Laborsetting der meisten Untersuchungen zu Leistungsvariablen bei Kindern hingewiesen. Darüber hinaus fehlen die deutlich aussagekräftigeren Längsschnittstudien, vor allem für harte gesundheitsspezifische Endpunkte, um das Risikopotential für die heranwachsende Bevölkerung adäquat einschätzen zu können. Insgesamt zeigt sich weiterhin, dass jüngere Kinder stärker beeinträchtigt scheinen als ältere. Lerchers Untersuchung (Lercher u. a. 2002) verweist auf die Wichtigkeit der Berücksichtigung von genetischen und sozial bedingten Risikofaktoren bei Kindern, deren Vorhandensein das Ausmaß von Schienenlärmwirkungen potenzieren kann.

6.1.4 Schlaf

Unter 39 gefundenen Studien befinden sich 20 Feldstudien, 17 Laborstudien, eine sekundärstatistische Auswertung sowie eine Metaanalyse (siehe Abb. 98).

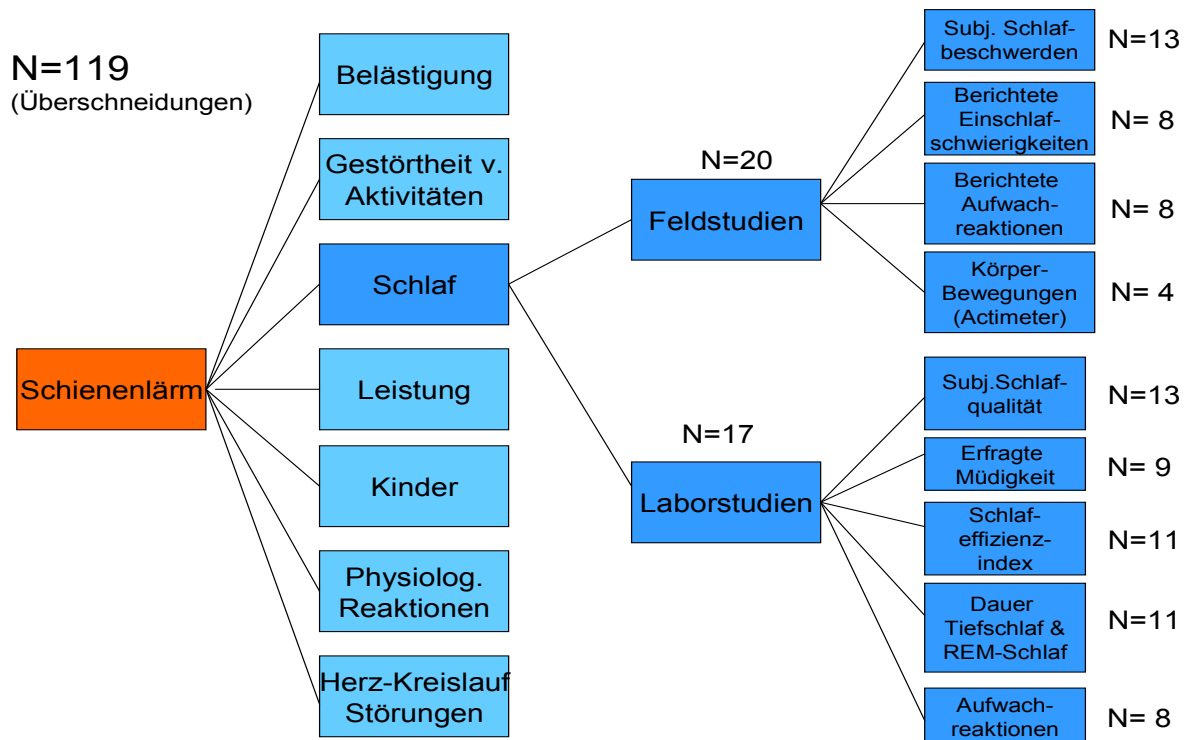


Abb. 98: Struktur der Daten zu Schlaf

In den Felduntersuchungen wurden in Fragebögen sowie Interviews subjektive Schlafbeschwerden, Einschlafschwierigkeiten und nächtliches Erwachen erfasst. Objektiv erhob man die nächtlichen Körperbewegungen durch einen Aktimeter. In der Erfassung der Schlafstörungen mittels Fragebogen und Interviews muss vor allem die Retrospektivität und Subjektivität der Erhebung bedacht werden, welche Gefahr laufen, verzerrt beurteilt zu werden durch Erinnerungslücken und sämtliche andere moderierende Faktoren (z.B. persönliche Faktoren wie etwa die Stimmung, das psychische Befinden, das Belästigungsempfinden oder auch Umgebungsfaktoren und/oder objektive Parameter wie gesundheitliche Probleme, die bspw. zu Schlafstörungen unabhängig vom Schienenlärm führen können). Zudem sind die Angaben zum Messinstrumentarium nicht nur oft mangelhaft und damit ungenau, sondern es handelt sich bei den eingesetzten Bögen häufig auch um nicht validierte, teilweise von den Autoren selbst erstellte Erhebungsmittel.

Wie sich beispielhaft in dem Datenpool über lärmbedingte Schlafstörungen widerspiegelt, besteht in der bisherigen Lärmwirkungsforschung eine große Heterogenität in der Messung und auch Berechnung der Lärmpegelmaße in den verschiedenen Untersuchungen, und somit ist es wichtig für die Analyse von Lärmwirkungen in unterschiedlichen Studien, nicht nur die Korrektheit der Erhebung der Schallbelastung als unabhängige Variable zu verifizieren, sondern auch den divergierenden Schallbelastungssituationen in den angeführten Settings der Untersuchungen in der Schlussfolgerung und Interpretation aus differierenden Ergebnissen Beachtung zu schenken.

In mehreren Studien konnte zugunsten der Schiene gegenüber dem Straßenverkehr ein Bonus zwischen 12.9 und 13.6 dB(A) im Bereich der subjektiven Schlafbeschwerden ausgemacht werden. Vor allem die groß angelegte, methodisch saubere Interdisziplinäre Feldstudie II (Planungsbüro Obermeyer 1983) und auch die Metaanalyse von Miedema und Vos (2007), die 24 Feldstudien aggregiert, sprechen eine klare Sprache zugunsten des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr. Lediglich eine Studie stellte einen Schienen*malus* heraus, zwei andere lassen keine Unterschiede erkennen. Obwohl die Korrelationen zwischen dem Lärmpegel und den subjektiv erfragten Schlafbeschwerden zumeist gering sind, lässt sich eine einheitliche Tendenz der durch Schienenlärm verursachten Schlafbeschwerden in den Feldstudien festhalten. Moderate Evidenz leisten die Aktimeterstudien, in denen nur eine Studie vermehrtes Aufwachen ab einem Lärmpegel von 50 dB(A) äquivalentem Dauerschallpegel für Schienenlärm herausstellt. Ansonsten lassen sich keine Unterschiede zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm finden.

Für die subjektiv erfassten Aufwachreaktionen und Einschlafschwierigkeiten zeigen sich in Abhängigkeit vom Spitzen- oder Dauerschallpegel einheitlich für alle Feldstudien ein schienenlärmbedingtes erhöhtes nächtliches Erwachen und die vergrößerte Schwierigkeit einzuschlafen. Für beide Variablen kristallisiert sich ein Schienenbonus gegenüber der Straße von 10.7 bis 11.1 dB(A) heraus. Ein ernstzunehmendes Problem für die Beurteilung der berichteten Ergebnisse stellen die häufig lückenhaften Angaben zu genauen Outcomewerten bei den Vergleichsstudien dar.

In den 17 Laborstudien wurden ebenso in Fragebögen und Interviews die subjektive Schlafqualität (oft verwendete Griefahn einen Summenindex aus sechs Parametern, zu welchen Einschlafschwierigkeiten, Ruhe des Schlafs, Schlaftiefe, Schlafdauer, Erholung und Körperbewegungen zählten) und die Müdigkeit erhoben; objektiv wurden mit Hilfe der Polysomnographie die Tiefschlaf- und REM-Schlafdauer sowie die Aufwachreaktionen im EEG (nicht zu verwechseln mit den subjektiv berichteten Aufwachreaktionen) aufgezeichnet. Zudem erhebt vor allem die Arbeitsgruppe um Barbara Griefahn in ihren methodisch qualitativ hochwertigen Studien für die lärmbedingten Schlafstörungen Parameter wie etwa die Anstiegssteilheit und Dauer der Lärmereignisse wie auch die lärmfreien Intervalle und die beim Schienenverkehr deutlich höher ausgeprägten Maximalpegel. Diese Aspekte spielen vor allem für autonome, physiologische Reaktionen im menschlichen Organismus sogar noch unterhalb der Aufwachschwelle und damit der bewussten Wahrnehmung durch das Individuum eine wesentliche Rolle. Wie im Theorieteil zu verfolgen ist, sind es gerade diese unbemerkten, doch deshalb nicht weniger folgenreichen körperlichen Reaktionen, die unter chronischen Bedingungen zu ernststen biologischen Veränderungen im autonomen Nervensystem führen können und damit zu Risikofaktoren für wesentliche gesundheitliche Erkrankungen (z.B. im Herzkreislauf- und Aktivierungssystem, wie auch der Stressabwehr) werden. Der qualitativen Güte dieser Laborstudien zum Trotz sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl der gefundenen Untersuchungen unter Mitarbeit/Leitung von Frau Prof. Dr. Griefahn durchgeführt wurde. Um von gesicherten, auf fundierter objektiver Basis ruhenden Erkenntnissen mit einem Anspruch von Objektivität und Inter-Rater-Reliabilität auszugehen, bedarf es der unabhängigen Replikation dieser Befunde durch andere Autoren.

Auf der einen Seite bringt das standardisierte Setting im Labor den Vorteil einer objektiveren und genaueren Erfassung verschiedenster Parameter wie auch der Kontrolle vieler feldbedingter konfundierender Störvariablen und ermöglicht damit eine bessere Vergleichbarkeit der Studienergebnisse untereinander, die bei homogener Tendenz eine größere Aussagekraft nach sich ziehen. Zum anderen bleibt die Situation im Labor aber immer eine künstliche, ungewohnte Umgebung für die Studienteilnehmer, so dass diese unter Umständen zu ergebnisverzerrenden Effekten im Schlafverhalten führen kann. Von daher ist eine inter- (Kontrollgruppe ohne Schallbelastung) oder auch intraindividuelle

(Nächte ohne Lärm) Vergleichsgruppe ein wesentliches (unverzichtbares) Gütekriterium dieser Laborstudien.

Insgesamt zeigt sich für die subjektiv erfassten Schlafbeschwerden in den Laborstudien eine einheitliche Tendenz der stärksten Belastung durch Schienenlärm verglichen mit Straßen- und Fluglärm und auch eine signifikante Reduktion der Schlafqualität im Vergleich lärmfreier Nächte mit Expositionsnächten durch Schienenlärm. Einen kumulativen Effekt berichten Quehl und Basner (2008), wobei Straßenlärm und Fluglärm einzeln und kombiniert die Schlafqualität signifikant weniger beeinträchtigen als Doppel- oder Dreifachexpositionen zusammen mit Schienenlärm. Jedoch besteht in Bezug auf die Einzelexposition mit Schienenlärm kein signifikanter Unterschied zwischen den Lärmquellen.

Darüber hinaus lässt sich eine einheitlich gesteigerte Müdigkeit nach Expositionsnächten im Vergleich mit Ruhenächten ausmachen. Signifikante Unterschiede zwischen den drei Lärmquellen lassen sich hier nicht entdecken. Vergleicht man die Expositionsnächte durch singulären Schienenlärm mit differierenden Schallbelastungsausmaßen, lassen sich keine signifikanten Unterschiede für die Ausprägung der subjektiv erfragten Müdigkeit feststellen. Dies lässt die Frage aufkommen, ob Dosis-Wirkungsbeziehungen für diesen Störungsbereich nicht vorhanden sind oder aber ob der erfasste Pegelrange und damit die Differenz der Pegel und die durch diese ausgelösten Effekte im Schlaf zu gering waren.

Auch die Tiefschlaf- und REM-Schlafdauer ist durch Schienenlärm am deutlichsten verkürzt verglichen mit den anderen zwei einbezogenen Lärmquellen, ebenso im Vergleich der Lärmnächte mit den Ruhenächten für Schienenlärm allein. Der Anteil des Tiefschlafes an der Gesamtschlafzeit ist signifikant reduziert für Schienenlärm-betroffene (Marks und Griefahn 2005). Ebenso wurde von Basner u. a. (2008) herausgestellt, dass dreifache Geräuschbelastungen durch drei Quellen mit größeren Auswirkungen verbunden sind als Doppelbelastungen oder singuläre Beschallung. Schienenlärm-exponierte wachen nachts signifikant öfter auf unter Geräuschbelastung als in den leisen Kontrollnächten im Labor. Die Überzahl der Studien berichtet für Schienenlärm verglichen mit den anderen Quellen die meisten Aufwachreaktionen im EEG, das heißt die Schienenlärm-exponierten weisen den höchsten Anteil im Schlafstadium 0 auf.

Der Schlaffeffizienzindex (SEI) ist in Ruhenächten deutlich größer als in Lärmnächten, wobei sechs Studien keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Quellen ausmachen können, drei allerdings mit einer verschlechterten Tendenz des SEI zu *ungunsten* des Schienenverkehrslärms auftreten.

Insgesamt ist die auffällige Divergenz in den Ergebnissen zu schienenlärmbedingten Schlafstörungen zwischen den qualitativ guten Laborstudien und den oft lückenhaft berichteten Ergebnissen der Feldstudien zu unterstreichen. Die Laborstudien zeigen konsistent einen Schienenmalus, die Feldstudien dagegen sprechen zumeist für eine Besserstellung des Schienenverkehrs in seinen geringeren Auswirkungen verglichen mit Straßen- und Fluglärm.

Ein wesentlich zu bedenkender Aspekt – nicht nur in der Diskussion der lärmbedingten Schlafstörungen – scheint hier, dass Schienenlärm selten allein, sondern stets im Verbund mit anderen Geräuschquellen auftritt. Aufgrund dessen sind Ergebnisse aus Laborstudien stets mit Vorsicht zu interpretieren, da sie neben der singulären Präsentation des Schienenlärms außerdem unter einem künstlichen Setting stattfinden und dadurch unter Umständen irritierend und ergebnisverzerrend wirken können. Damit ist ihre Übertragbarkeit wie auch die Umsetz- und Anwendbarkeit der gefundenen Ergebnisse auf das natürliche Umfeld von Betroffenen durchaus fragwürdig. Divergenzen zwischen Labor- und Feldstudien, besonders im Bereich der lärmbedingten Schlafstörungen, sind weiterhin unter der Verwendung differierender Messinstrumente und Stichprobenzahlen zu betrachten und weiter zu elaborieren.

6.1.5 Leistung

Die Studienergebnisse zu Leistungseinbußen (N=24) können zum einen in Labor- (N=17) und Feldstudien (N=5) und zum anderen anhand der untersuchten abhängigen Konstrukte (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Lesefähigkeit, Verständnis, Rechenaufgaben, Textverständnis, Sprachverständlichkeit, Motivation) gegliedert werden. Leistungseinbußen durch Lärm in den verschiedenen Bereichen wurden über verschiedene Tests (Switch, Go/NoGo, Stroop, Attentional Network Test, Wahlreaktionstests usw.) während der Schallbelastung, die auf drei Arten einbezogen wurde, erfasst. Entweder direkt (z.B. im Labor mit eingespieltem Lärm) oder aber durch die Berücksichtigung von durch das Umfeld bedingter, dauerhafter, aber während der Messung nicht unbedingt vorherrschender Lärmbelastung (z.B. im Wohnumfeld) oder indirekt über in der vergangenen Nacht aufgetretenen, lärmbedingten Schlafstörungen, die dann sekundär schließlich zu Leistungseinbußen wie etwa Konzentrations- oder Aufmerksamkeitsmangel führen können.

Bezüglich der Aufmerksamkeit können zwischen den drei Verkehrslärmquellen kaum Unterschiede in ihren Auswirkungen auf diesen Leistungsparameter ausgemacht werden. Es finden sich jedoch für alle drei Quellen verlängerte Reaktionszeiten im Switch-Test. Auch in der Untersuchung des Schienenlärms ohne Vergleichsquellen kristallisieren sich entweder keine (für den Go/NoGo Test) oder aber lediglich geringe Effekte heraus. So ergeben sich verlängerte Reaktionszeiten im Switch (Marks und Griefahn 2005) und im Stroop Test (Bonnetfond u. a. 2008), nicht aber im ANT (Bonnetfond u. a. 2008). Für die visuelle Aufmerksamkeit schneiden Kinder aus lauter exponierten Lärmklassen im verbalen (mit einer Exposition über zwei Jahren) und taktilen Antwortmodus schlechter ab als Kinder in leisen Klassen (Hambrick-Dixon 1988), so auch bei Heft (1979). Im Labor wird kein Effekt für die visuelle Suchaufgabe gefunden (Lercher, Evans und Meis 2003). Ohkubo (1964) beschreibt eine sinkende Aufmerksamkeit lärmbelasteter Kinder für eine visuelle Aufmerksamkeitsaufgabe unter Laborbedingungen. Die Kombinationsfähigkeit scheint nicht gestört (Heft 1979; Schütte, Wenning und Griefahn 2006). In Feldstudien finden sich für Schienenlärm keine gebietsbezogenen (Schienenlärm-betroffene vs. nicht Betroffene) Aufmerksamkeitsdefizite in Reaktionstests (Griefahn 2000; Moehler, Liepert, Schuemer und Griefahn 2000).

Die Untersuchungsergebnisse zu Gedächtnisdefiziten bedingt durch Schienenlärm fallen heterogen aus. In Feldstudien fällt die zufällige und bewusste Erinnerung für Kinder in leiser Wohnumgebung besser aus als für Kinder in verkehrslärbetroffenem Umfeld (Lercher, Evans und Meis 2003; Heft 1979). Andere Studien, vor allem auch für Erwachsene, finden keine solchen Effekte (Basner u. a. 2008; Klatte u. a. 2007). Bronzaft und McCarthy (1975) berichten für eine lauter exponierte Schulklasse eine geminderte Lesefähigkeit im Test, Hygge (1992) schildert eine verringerte Anzahl gelesener Seiten lärmbelasteter Kinder. Die Rechenleistung zeigt sich in japanischen Laboruntersuchungen unter Schienenlärm verschlechtert, bei jüngeren Grundschulern mehr als bei älteren (Maruyama 1964b). Für das Textverständnis ergeben sich keine Effekte (Bronzaft und McCarthy 1975; Klatte u. a. 2007). Izumiyama (1964) (für eine Schulklasse) und Klatte u. a. (2007) (im Labor) schildern ein verringertes Sprachverständnis unter Schienenlärmbedingungen. Öhrström, Gunnarsson und Ögren (2007) geben darüber hinaus auch eine verringerte subjektive Sprachwahrnehmung unter der Doppelbelastung durch Schienen- und Straßenlärm an, mehr noch als durch Schienenlärm allein. Interpretatorische Schlüsse und konkrete Handlungskonsequenzen sind aus all diesen Ergebnissen vor allem aufgrund ihrer mangelnden Replikation (oft nur zwei Studien in einem Wirkungsbereich) nur mit Vorsicht zu ziehen. Die Varianz der Studienergebnisse sollte durch die Normierung und gründliche Validierung einheitlicher Tests und auch Testbedingungen (Leistungsaspekte sind gut unter Laborbedingungen mit hoher Kontrollmöglichkeit konfundierender Parameter untersuchbar) überprüft werden. Des Weiteren sollte eine klare Trennung der Untersuchungen und des Vergleichs verschiedener Studienergebnisse zu Leistungsbeschränkungen für Kinder im Schulsetting und für

Erwachsene für die einwandfreie Funktions- und Leistungsfähigkeit im Berufs- und Arbeitsleben stattfinden. Die Sprachverständlichkeit und das Textverständnis (wie auch Lese- und Rechenleistung) spielen vor allem für Kinder im Schulunterricht, der primär über Kommunikation ausgerichtet ist, eine wesentliche Rolle. Diese sollte stets gewährleistet sein; ein lärmfreies oder zumindest adäquat lärmbeschränktes Lernumfeld sollte allen Kinder ermöglicht werden, da der Erwerb grundlegender schulischer und allgemeiner Kenntnisse und Kompetenzen den Grundstock für eine spätere berufliche und damit auch sozial-ökonomisch abgesicherte Zukunft darstellt.

6.1.6 Physiologische Parameter

Über (schienen-)lärmbedingte physiologische Körperreaktionen wird in zehn Studien, davon zwei Feldstudien und acht Laborstudien, berichtet. Für die Untersuchung der physiologischen Reaktionen des Körpers sind apparativ unterstützte Laborstudien besonders geeignet und gewinnbringend, da die *subjektive* Einschätzung körperlicher, autonomer und damit unwillkürlicher und teilweise auch unterhalb der Bewusstseinschwelle ablaufender Reaktionen durch Fragebögen das Vorkommen dieser körperlichen Veränderungen nicht verlässlich erfasst.

In den Feldstudien steigen die Beschwerdeangaben der subjektiv erfragten körperlichen Symptome (so z. B. Kopfschmerzen, Magen-Darm-Beschwerden oder auch Herzklopfen, letztere zwei allerdings erst ab einem Pegel zwischen 70 bis 79 dB(A)), deren Auslöser von den Betroffenen im Schienenlärm vermutet wird, mit wachsendem Lärmpegel an. Aurale Störungen durch Schienenlärm werden verneint. Die Laborstudien lassen sich entlang der abhängigen untersuchten Parameter (Herzfrequenz, Katecholamin-konzentration im nächtlichen Urin, Kortisolkonzentration im nächtlichen Urin, Fingerpulsamplitude, Hautwiderstand, Respiratorische Sinus Arrhythmie, Pre-Ejektions-Periode, Blutdruck) staffeln. Insgesamt deuten alle Parameter auf eine eindeutig lärmbedingte Aktivierung des Sympathikus hin. Es bilden sich erhöhte Herzschlagfrequenzen mit und auch ohne Aufwachreaktionen heraus, wobei diese am deutlichsten und höchsten bei Schienenlärm im Vergleich mit Straßen- und Fluglärm ausfallen. Für ein erhöhtes Vorkommen von Katecholaminen (Stresshormonen) im Blut nach Expositionsnächten im Vergleich mit Ruhenächten im Labor gibt es keine Nachweise, eine Studie zeigt einen gesteigerten Kortisolspiegel im Blut untersuchter schienenlärm-betroffener Kinder im Vergleich mit Kindern, die in ihrem Wohngebiet leiseren Pegeln ausgesetzt sind. Diese Erhöhung finden andere Studien, in denen der Lärm lediglich für die Zeit des Laborbesuchs eingespielt wird, nicht. Das weist auf die schleichende Langzeitwirkung von Schienenlärm hin und zeigt den dringenden Bedarf an bisher ausbleibenden Längsschnittstudien im Bereich der Lärmwirkungsforschung auf, die sich vor allem auf medizinische objektiv erfassbare Endpunkte konzentrieren sollten.

Eine Auswirkung von Lärm auf die periphere Durchblutung kann in zwei Studien festgestellt werden, wenn auch ohne nachweisliche signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Lärmquellen bezüglich dieser autonomen Veränderungen. Der Hautwiderstand steigt ab 75 phon, während Schulkinder verschiedene mentale Aufgaben zu lösen haben. Für den Blutdruck zeigen sich keine Veränderungen für Kinder, die in leisen Wohngebieten aufwachsen, gegenüber denen, die in Gebieten mit lauterem Schallpegeln wohnhaft sind. Graham u. a. (2009) stellen fest, dass der sympathische Tonus mit steigendem Innenraumpegel ebenfalls wächst. Diesen erfassen sie durch mehrere Indikatoren wie zum Beispiel die respiratorische Sinusarrhythmie. Alles in allem gibt es zahlreiche empirisch belegte Hinweise auf eine erhöhte lärmbedingte Aktivierung des sympathischen (Nerven-)Systems. Bei dauerhafter Lärmeinwirkung ab bestimmten Pegelbereichen kann es bei chronischer Sympathikusaktivierung zu zahlreichen Veränderungen des gesamten physiologischen und endokrinologischen Systems kommen, das besonders der Stressregulierung und der Immunabwehr zugrunde liegt (siehe dazu Abschnitt 3.6.2). Insgesamt ist aber festzuhalten, dass die Studienlage im Bereich der Herzkreislauf-Erkrankungen inklusive physiologischer und hormoneller

Parameter in der Lärmwirkungsforschung hinsichtlich des Schienenlärms überaus defizitär ausfällt. Die Studienzahlen zu den einzelnen berichteten Variablen belaufen sich oft auf nicht mehr als zwei Untersuchungen einschließlich veralteter, methodisch unzureichend ausgeführter japanischer Studien.

6.1.7 Resümee

Das Fazit aus den einzelnen Reviews belegt nicht nur die abnehmende wissenschaftliche Hinwendung zur Untersuchung objektiver gesundheitsbezogener Endpunkte, die durch Schienenlärm beeinträchtigt werden können, sondern auch die geringer werdende Evidenz und Aussagekraft der Forschungsergebnisse entlang dieses Pfades. Diese Evidenz schmälert sich nicht nur aufgrund fallspezifisch kleiner Studienzahlen, sondern vor allem aufgrund der Heterogenität in den zusammengetragenen Studienergebnissen (siehe Abb. 99).

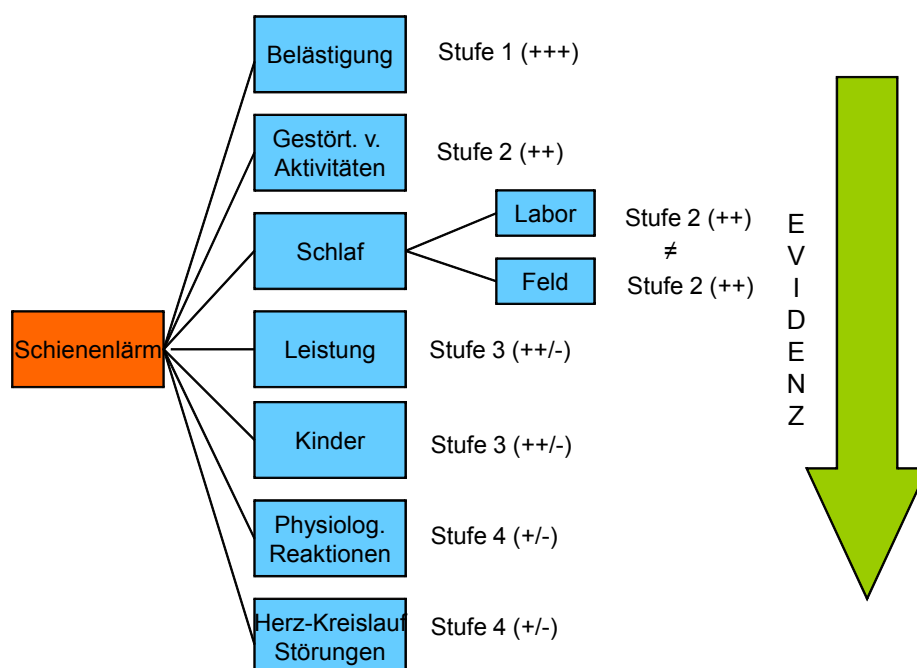


Abb. 99: Evidenz der Daten

6.2 Allgemeine Methodenkritik

Der folgende Abschnitt dient einer methodenkritischen Auseinandersetzung mit den eingeschlossenen Studien. Diese Debatte findet in einem zusammenfassenden Diskurs über alle Arbeiten des Review statt, da sich die Studienqualität der inbegriffenen Untersuchungen nur unwesentlich unterscheidet.

Es lassen sich zunächst drei übergeordnete Aspekte differenzieren:

- a. Interne Validität
- b. Externe Validität
- c. Aspekte, die zu einer ausbleibenden Vergleichbarkeit der Studien führen.

Die interne Validität umschreibt die Gültigkeit einer gefundenen Beziehung zwischen unabhängiger (Treatment, z.B. Lärmexposition) und abhängiger Variable (Outcome, z.B.

Belästigung); sie drückt also den Grad aus, mit dem die Veränderung des abhängigen Parameters auf die unabhängige Variable zurückzuführen ist. Um eine hohe interne Validität zu gewährleisten, müssen mögliche Störfaktoren (Mediatoren und Moderatoren), die diese Beziehung beeinflussen könnten, kontrolliert werden. Diese Versuchssituation ist am besten in einer experimentellen Laborstudie zu verwirklichen.

Die externe Validität bezeichnet dagegen die Übereinstimmung von tatsächlichem und intendiertem Untersuchungsgegenstand. Grundidee ist hier die Frage nach der Generalisierbarkeit der gefundenen Ergebnisse in der Studie auf eine größere Allgemeinheit. Dies ist vor allem dann möglich, wenn davon auszugehen ist, dass die Untersuchung mit einer repräsentativen Stichprobe in einem möglichst natürlichen, feldnahen Setting durchgeführt wurde, es meint also die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das „wahre Leben“. In der nachfolgenden Abb. 100 wird der Zusammenhang zwischen interner und externer Validität veranschaulicht.

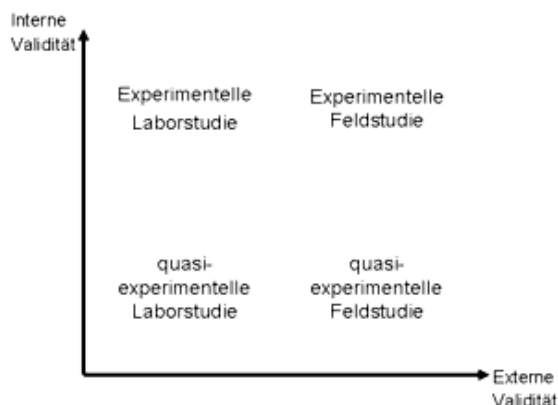


Abb. 100: Relation der internen zur externen Validität mit passendem Studiendesign (Wikipedia.org)

6.2.1 Interne Validität

Die Interne Validität in den behandelten Studien wird durch eine Menge von Faktoren erheblich eingeschränkt. In der Mehrzahl handelt es sich um quasiexperimentelle epidemiologische Feldstudien im Querschnittsdesign, in denen gefundene Effekte möglicherweise mit einer Vielzahl an konfundierenden Variablen interagieren, die nicht entsprechend kontrolliert werden können. Auch bleibt eine kontrollierte Variation der Bedingungen aus, durch welche gefundene Effekte mit größerer Valenz als tatsächlich vorhanden eingestuft werden können. Zudem wurde selten randomisiert, das heißt eine zufällige Zuordnung der untersuchten Stichprobe zu den unabhängigen Untersuchungsbedingungen gewährleistet. Auch über eine Verblindung der Studienabsichten vor den Studienteilnehmern oder des Versuchsleiters zu Gunsten einer unverfälschten/-beeinflussten Reaktion der Studienteilnehmer wird in den wenigsten Fällen berichtet. Weiterhin wird fast ausnahmslos nicht mit Kontrollgruppen gearbeitet und nur selten eine Angabe zu den Effekten konfundierender Variablen sowie wie den demographischen Aspekten (Alter, Geschlecht, Einkommen, Bildung usw.) gemacht, wenn diese und weitere wesentliche Einflussparameter (Moderatoren und/oder Mediatoren, z.B. Lärmempfindlichkeit, Distanz zur Lärmquelle, Anzahl der Lärmereignisse usw.) überhaupt erfasst wurden. Die unter anderem kleinen Stichprobengrößen (vor allem in den Laborstudien) führen oft zu großen Konfidenzintervallen und damit einer insuffizienten Power (= Teststärke; meint die Wahrscheinlichkeit mit dem ein Signifikanztest zugunsten einer spezifischen (Alternativ-)Hypothese entscheidet und mit dem die gefundenen Ergebnisse demnach als zuverlässig angesehen werden können).

In den Feldstudien, aber auch in den Laborstudien wird oft nur ein geringes Expositionsspektrum (des Lärmpegelbereichs) untersucht, so dass unklar bleibt, wie sich die abhängigen Variablen unter höherer Schallbelastung verhalten würden, zumal eine aufgrund einer Regressionsanalyse geschätzten Dosis-Wirkungskurve auf der Basis eines breiteren, untersuchten Schallpegelspektrums valider wäre. Weiterhin bleiben die Outcome-Werte für die abhängigen Variablen oft relativ gering, so dass bei kleiner Stichprobengröße tatsächlich vorhandene kleine Effekte womöglich nicht entdeckt werden.

In den Feldstudien werden oft retrospektiv subjektiv erfragte Parameter wie die Lärmbelästigung und Störung bei täglichen Aktivitäten durch Selbstbeurteilung mit Hilfe eines Fragebogens erfasst, die möglicherweise Erinnerungs- und Verzerrungseffekten unterliegt. In diesem Zusammenhang fehlen objektiv messbare Parameter und Erhebungsinstrumente, um auch manifeste (gesundheitliche), objektive Auswirkungen von Schienenlärm zu ergründen.

Weiterhin hat ein systematischer Literaturreview oder gar eine Metaanalyse zumeist mit dem Problem des Publication Bias (verzerrt den Stand der Forschung durch Veröffentlichung nur der Studien, die signifikante Ergebnisse in die gewünschte Richtung präsentieren) zu ringen. Des Weiteren mangelt es einer Vielzahl von Studien (vor allem den sozialwissenschaftlichen Befragungen im Feldsetting) an adäquater lückenloser Berichterstattung wesentlicher Studiendetails, um die (methodische) Güte der Studie und damit die Qualität der Aussagekraft der Ergebnisse beurteilen zu können. Es fehlen die Angaben über statistische Verfahren, mit denen die Daten und die Signifikanz der Ergebnisse überprüft werden, weiterhin Angaben über die Stichprobenrekrutierung und die Struktur und Zusammensetzung der Stichprobe und damit ihrer Repräsentativität (wobei sich dieser Aspekt auf die externe Validität niederschlägt). Weiterhin bleibt aufgrund fehlender Angaben oft unklar, ob die Lärmmessungs- und/oder Berechnungsmethoden adäquat sind, um ein realitätsgetreues Lärmbelastungsmaß sowie die tatsächlich empfundene Lautheit der Befragten wiederzugeben. Häufig werden Lärmindeces mit verschiedenen, nicht näher erläuterten Verfahren und Modellen berechnet, die in Stichprobenmessungen validiert werden sollten. Bisweilen werden sogar die Lärmpegel selbst von den Probanden erfragt, was wiederum leicht zu einer subjektiv verzerrten Über- oder Unterschätzung der tatsächlich einwirkenden Lärmpegel führen kann.

Auch wird wenig über die genaue Bezeichnung und die Bediener der eingesetzten Messinstrumente für die abhängigen Variablen in den Befragungen berichtet und inwiefern diese an repräsentativen Stichproben getestet wurden, um demnach ihre Güte (ihre Validität, Objektivität und Reliabilität) zu beurteilen. Zumeist umfassen sie Ordinalskalenniveau.

Aufgrund des querschnittlichen Designs, das an der Reliabilität (Zuverlässigkeit) der gefundenen Studienergebnisse zweifeln lässt, und der teilweise mangelnden internen Validität, lassen sich gesicherte Kausal-Aussagen nur begrenzt treffen.

6.2.2 Externe Validität

Der externe Validität wird vor allem durch die bereits berichteten unzureichenden Angaben über die Stichprobenrekrutierung und die Stichprobenzusammensetzung (wenn überhaupt wird über zumeist junge und gesunde Probanden berichtet) Grenzen gesetzt. Für die Ergebnisse zu vor allem objektiven Schlafvariablen und Leistungsaspekten, die in der Überzahl der Fälle in Laborstudien erhoben werden, ist die Übertragbarkeit auf das reale Lebensumfeld der Untersuchten fraglich, ebenso wie die Aussagekraft der unter den künstlichen Laborbedingungen gefundenen Ergebnisse.

6.2.3 Fehlende Vergleichbarkeit der Studien

Aufgrund der Vielfalt und fehlenden Standardisierung verwendeter Messinstrumente durch verschiedene Skalen (die entweder die Häufigkeit oder die Intensität in unterschiedlicher Länge der verbalen oder numerischen Skaleneinheiten darstellen, entweder in uni- oder bipolarer Ausprägung des zu erfassenden Konstruktes, hier z.B. Belästigung) fällt ein Vergleich der verschiedenen Studienergebnisse zumeist schwer. Diese unterschiedliche Umsetzung (i.e. Operationalisierung) der untersuchten Parameter (die oft psychologische Konstrukte darstellen) in den jeweiligen Studien wird nunmehr auch durch enorme konzeptuelle und begriffliche Unschärfen dieser Parameter bzw. Konstrukte verstärkt. Auch die Verwendung unterschiedlicher Lärmindizes (L_{eq} , L_{dn} , L_{max}) macht den Vergleich der Ergebnisse (z.B. der Belästigungsreaktionen) schwierig. Außerdem muss unterschieden werden zwischen quellspezifischen Angaben von Belästigungsmaßen und einem Gesamtlärmpegelindex, der die Geräuschbelastung durch alle Quellen aufsummiert und daher nur die Gesamtbelastung mit einem einzigen Index abbildet.

Fields und Walker (1982a) schlagen eine Reihe von Faktoren vor, die sowohl bei dem Verfahren zur Berechnung des Lärmindex (I) als auch in der Messung der Antwort durch die Befragten auf diesen Lärmindex (II) Beachtung finden sollten. Des Weiteren führen sie belästigungsmoderierende Parameter (III) auf (siehe Tab. 26).

Tab. 26: Einflussfaktoren auf die Lärmerfassung, -berechnung und deren Wirkung.

I. NOISE INDEX CALCULATION PROCEDURES

A. Prevailing conditions and procedures for noise measurement programme

1. Frequency weighting network setting – A, B, C, D, Linear, PNL
2. Reflection - distance from reflecting surfaces, characteristics of surfaces
3. Atmospheric – fair weather versus typical or worst noise propagation conditions
4. Time period (this may interact with event type or atmospheric conditions)
5. Source operating conditions
6. Method of counting noise events – observed versus estimated numbers of events, noise level threshold for defining event (constant arbitrary level, detectable effect on noise levels, audible)
7. Noise from other sources – included or excluded from measurements
8. Measurement variability and measurement errors – size and source

B. Nominal conditions to which noise index is normalized

1. Summary noise index calculated (L_{eq1} NNI, CNR, etc.)
2. Position of receiver at residence: (a) out-of-doors – distance from dwelling, height of microphone, side of dwelling (front, noisiest side, noisiest side with windows); (b) indoors – window position (open, closed, partially open), room in dwelling, position in room
3. Atmospheric – fair weather, or typical or worst conditions
4. Time period – hours of day, day of week, season of year
5. Source operating conditions

C. Other aspects

1. Method of interpolation to unmeasured dwellings – propagation models
2. Sampling errors for summary indices
3. Method of averaging noise samples (arithmetic, logarithmic)

II. MEASUREMENTS OF HUMAN RESPONSE

A. Measurement of response levels

1. Wording of question – number and wording of alternative responses
2. Language of administration
3. Location of questions in questionnaire
4. Presented purpose of questionnaire
5. Mode of administration – interviewer, self-administered
6. Interviewer behaviour

7. Treatment of missing data
 - B. *Selection of respondents*
 1. Sampling of areas
 2. Sampling of individuals
 3. Call back policies if no one at home
- III. ANNOYANCE MODERATING CONDITIONS (AFFECT SUBJECTIVELY FELT IMPACT OF NOISE)
- A. *Uniform for whole survey*
 1. Season of survey
 2. Year of survey
 3. Noise source
 4. Cultural valuation of quiet
 5. Outdoor activity patterns
 - B. *Uniform for each study site (possibly whole survey)*
 1. Ambient noise levels and competing noise sources
 2. Timing of noise events (day, evening, night)
 3. History of noise exposure and experience with noise source
 4. Noise source operating conditions
 5. Other neighbourhood environmental conditions and amenities
 - C. *Vary within study sites*
 1. Characteristics of dwellings – attenuation, construction, availability of rooms without noise exposure
 2. Noise exposure away from residence (work, school, shopping)
 3. Attitudes related to annoyance (fear, preventability)
 4. Other individual characteristics

6.3 Skizze einer „optimalen Studie“

Vor dem Hintergrund der aufgeführten methodenkritischen Argumente sind die berichteten Ergebnisse unter Vorbehalt zu betrachten, von Ursache-Wirkungs-Zuschreibungen zwischen dem erfassten Schallpegel und den erhobenen Endpunkten ganz zu schweigen. Neben weiteren inhaltlichen Fragestellungen zum Zusammenhang von Schienenlärm und sämtlichen objektiv erfassbaren, gesundheitsbezogenen Parametern (insbesondere physiologischen Reaktionen und damit potentiellen Risikokonstitutionen für langfristig eintretende Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie etwa Herzinfarkt), gilt es, die Methodik und das Design der Studien zu verbessern, um ihre Objektivität, Validität und Reliabilität und damit ihre Aussagekraft hinsichtlich gefundener Zusammenhänge zu steigern.

Es bedarf vor allem Untersuchungen im Längsschnitt, um die Langzeitfolgen für chronisch exponierte Bahlmlärmanwohner zu extrapolieren. Weiterhin gilt es, wesentliche moderierende Einflussgrößen in der Erhebung der untersuchten Parameter zu beachten und eine angemessene Messung und/oder Berechnung des Schienenlärms sicher zu stellen. Zudem sollte Beachtung finden, dass Schienenlärm selten allein, sondern meist im Verbund mit anderen Geräuschquellen im realen Wohnumfeld auftritt, so dass Aussagen aus Laboruntersuchungen, die lediglich Schienenlärm als Expositionsvariable einsetzen, schlecht auf die Lebenswirklichkeit übertragen werden können. Vielmehr gilt es, alle Geräuschquellen der unmittelbaren Wohnumgebung mit einzubeziehen. Schließlich sollten standardisierte und ausreichend validierte Messinstrumente (z.B. einheitliche Fragebögen zur Erhebung der Belästigung) eingesetzt werden, was wiederum eine eindeutige, unmissverständliche Definition der relevanten Zielkriterien, insbesondere der psychologischen Konstrukte wie ‚Belästigung‘ voraussetzt. Um dabei auch kleine Effekte zu entdecken, bedarf es darüber hinaus einer genügend großen

Stichprobe und der Auswahl demographisch heterogener und damit repräsentativer Betroffener.

6.4 Wissenschaftliche Bewertung des Schienenbonus

In diesem Abschnitt sollen zunächst der aktuelle wissenschaftliche und gesundheitspolitische Rahmen sowie die damit verbundene gesellschaftliche Diskussion für die Verordnung von Lärmemissionsgrenzwerten im Allgemeinen vorgestellt werden. Auf dieser Grundlage wird dann der sogenannte Schienenbonus einer wissenschaftlichen Bewertung unterzogen, die auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Abschnitte beruht.

6.4.1 Die Festlegung von Grenzwerten zum Schutz vor lärmbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen

Die Geräuschbelastung durch Straßen-, Schienen- und Flugverkehr in Deutschland ist trotz zahlreicher Bemühungen nach wie vor hoch. Technisch erzielte Geräuschbelastungsreduktionen werden durch das weiterhin zunehmende Verkehrsaufkommen kompensiert. Etwa 55 % der Deutschen fühlen sich durch den Straßenverkehrslärm belästigt, etwa 25 % durch Schienenverkehrslärm. Auch eine vorerst rein subjektiv erlebte Belästigung verursacht insbesondere körperliche Stressreaktionen. Diese können bei akuter, aber vor allem bei langfristiger Belastung Gesundheitsschäden in sämtlichen Bereichen zur Folge haben. Nach Einschätzung des Arbeitskreises zur Lärmwirkungsforschung des Umweltbundesamtes werden bei wachen Personen oberhalb von Maximalpegeln von circa 60 dB(A) physiologische Lärmwirkungen in Form von Veränderungen der allgemeinen zentralen Aktivierung mit Beeinflussung vegetativer Funktionen ausgelöst. Während des Schlafes liegt die Aktivierungsschwelle niedriger. Zur Gewährleistung eines ungestörten Schlafs sollten Verkehrslärmgeräusche am Ohr des Schlafers Dauerschallpegel von 30 dB(A) und Maximalpegel von 40 dB(A) nicht überschreiten. Neben physiologisch und endokrin bedingten autonomen Körper-Stress-Reaktionen können auch Schlafstörungen und Leistungseinbußen eintreten. All die genannten Konsequenzen wurden durch zahlreiche Primärquellen in den einzelnen Reviews aufgezeigt, skeptisch beleuchtet und zuvor bereits kritisch diskutiert (siehe Abschnitt 6.2).

Neben den gesundheitlichen Wirkungen von Lärm sind auch soziale und ökonomische Auswirkungen zu nennen. Akute Lärmbelastung führt zu Kommunikationsschwierigkeiten, die Stimme muss angehoben werden, die Verständlichkeit nimmt ab und gegebenenfalls wird die Kommunikation ganz unterlassen; auch kann es zu einer Abnahme der Hilfsbereitschaft und der häuslichen Geselligkeit kommen. Die Nutzung von Wohnräumen, Terrassen, Balkonen und Gärten kann sich ändern, ebenso das Lüftungsverhalten, besonders die nächtliche Fensteröffnung. Als ökonomische Folgen können Wertminderung von Grundstücken, Kosten für Medikamente wie Schlafmittel und Blutdrucksenker und gegebenenfalls weitere Krankheitskosten (aufgrund von eingeschränkter Arbeitsfähigkeit) entstehen.

In diesem Sinne weist der Sachverständigenrat für Umweltfragen (1999) am 31. August 1999 in einem Sondergutachten „Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen“ ausdrücklich darauf hin, dass ein Umwelthandlungsziel von 65 dB(A) Mittelungspegel bei Tag nur ein Nahziel für den vorbeugenden Gesundheitsschutz und für den Schutz gegen erhebliche Belästigungen darstellen könne. Es müsse durch mittelfristige Ziele – 62 dB(A) als Präventionswert und 55 dB(A) als Vorsorgezielwert – ergänzt werden. Für die Nachtzeit sei kurzfristig ein Wert von 55 dB(A), mittelfristig ein Wert von 52 dB(A) und langfristig ein Vorsorgezielwert von 45 dB(A) anzustreben. In besonders schutzbedürftigen Gebieten, wie etwa im Umfeld von Krankenhäusern und Sanatorien,

aber auch in reinen Wohngebieten solle ein Vorsorgezielwert von 35 bis 40 dB(A) angestrebt werden. Dies entspricht im Wesentlichen den Orientierungswerten der DIN 18005 (Schallschutz im Städtebau), aber auch den Grenzwerten der TA Lärm. (Die dort festgelegten Grenzwerte für Gewerbebetriebe sind deutlich strenger als die für den Straßen- und Schienenlärm festgelegten Grenzwerte und beziehen auch explizit Maximalpegel mit ein). Zudem sei zu prüfen, ob die daneben anwendbaren Maximalpegel (wie sie im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm und in der TA Lärm definiert sind) weiter abgesenkt werden müssen. Dabei sei die Staffelung des Schutzanspruches nach der Gebietsart der Einwirkungsbereiche (reines, allgemeines Wohngebiet, Misch-, Gewerbe-, Industriegebiet) dahingehend zu modifizieren, dass in den – auch – zum Wohnen bestimmten Misch- und Kerngebieten zumindest bei Nacht ein ausreichender Lärmschutz gewährleistet werde.

Diese anspruchsvollen Handlungsziele könnten nur durch ein Bündel von Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Maßnahmen an der Quelle, planerische Maßnahmen und Maßnahmen der Sanierung erreicht werden. Aufgrund der Bedeutung einer Vielzahl subjektiver und situativer Faktoren in der psychischen wie auch physi(ologi)schen Reaktion in Wechselwirkung mit Verkehrslärm gestaltet sich die Festlegung von „sicheren“ Grenzenwerten für Schalldruckpegel bezogen auf extra-aurale Lärmwirkungen im Sinne der Gefährlosigkeit für die Gesundheit allerdings überaus schwierig.

Zur Abschätzung des Risikos umweltbedingter Gesundheitsbeeinträchtigungen äußert sich der Rat der Sachverständigen zu Umweltfragen in seinem Sondergutachten hinsichtlich mehrerer Aspekte.

So sei es Aufgabe der Politik, Ziele zu entwickeln und vorsorgende Maßnahmen zu ergreifen, die dem Schutzbedürfnis der Bevölkerung vor umweltbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen gerecht würden. Grundlage für den politischen Umgang mit Risiken sollten grundsätzlich wissenschaftlich begründete Risikoabschätzungen sein. Diese würden zwar durch komplexe Expositionsbedingungen und multikausale Beziehungen zwischen Umweltfaktoren und Erkrankungen erschwert, jedoch hätten sich die herkömmlichen Verfahren der toxikologischen und epidemiologischen Risikoabschätzung vielfach bewährt. Es handle sich dabei um wissenschaftliche Verfahren mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit der Vorhersage, obwohl sie mit bestimmten Annahmen und Abschätzungen wie Wirkungsmodellen und Sicherheitsfaktoren arbeiteten. Gegebenenfalls müssten vorläufige Risikobewertungen erfolgen, die sich aus pragmatischen Gründen mit einem geringeren Maß an gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen begnügen und der Begrenztheit des Wissens Rechnung trügen.

Der Umweltrat stellt weiterhin fest, dass vielfach eine Diskrepanz zwischen wissenschaftlicher Risikoabschätzung und der subjektiven Risikowahrnehmung seitens der Betroffenen bestehe. Die subjektive Risikowahrnehmung sei zwar ein unverzichtbares Element der Entscheidungsfindung, es würde jedoch der Verantwortung der Politik widersprechen, evident unangemessene Risikoeinschätzungen nach oben (Phantomrisiken) oder nach unten (extreme Sorglosigkeit) zu berücksichtigen. Daher mahnt der Umweltrat eine Verbesserung der Kommunikation zwischen den beteiligten Gruppen (Betroffene und Entscheider) und der transparent vermittelten Information über Risiken an. Auf diesem Weg ließen sich Ängste abbauen sowie allgemein akzeptierte Ziele vereinbaren.

Von besonderer Bedeutung bei der Bewertung von umweltbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen sei die wissenschaftlich begründete Identifizierung und Charakterisierung von besonders empfindlichen Gruppen. Dies biete die Grundlage, um die im Grundgesetz verankerte staatliche Schutzpflicht vulnerabler Gruppen zu verwirklichen. Dieser Schutz besonders verletzlicher Gruppen bedeute jedoch nicht, dass auch die Empfindlichkeiten Einzelner oder einzelner Kleinstgruppen Grundlage für staatliche Maßnahmen sein müssten.

6.4.2 Anwendung des Mittelungspegels als alleinigen Grenzwert

In § 3 der 16. BImSchV werden die jeweils zulässigen Beurteilungspegel für den Tag (6.00 Uhr – 22.00 Uhr) und die Nacht (22.00- 6.00 Uhr) angegeben. Diese Beurteilungspegel werden auf Basis der Anlagen 1 und 2 zu § 3 berechnet. Für den Schienenverkehr wird hier (ebenso wie für den Straßenverkehr) ein Mittelungspegel über den Bezugsraum (Tag oder Nacht) gebildet.

Hier stellt sich die Frage, ob dieses Vorgehen den unterschiedlichen Lärmauswirkungen, den jeweiligen Charakteristika von Straßenlärm einerseits, Schienenlärm andererseits wirklich gerecht wird, insbesondere, ob auf diese Weise ein vergleichbarer Gesundheitsschutz vor den jeweiligen Lärmauswirkungen gewährleistet wird .

Dies soll an einigen Beispielszenarien verdeutlicht werden. In Abb. 101 wird ein einstündiges Intervall mit Straßen- und Schienenlärm gegenübergestellt. Auf der Straße erreicht ein kontinuierlicher Verkehrsstrom mit insgesamt 2000 PKW einen Mittelungspegel von 65 dB(A). Auf dem Schienenweg findet im selben Intervall nur eine Zugbewegung statt. Ein Güterzug mit einem Spitzenpegel von 90 dB(A) und einer Vorbeifahrzeit von unter 1 Minute führt ebenfalls zu einem stundenbezogenen Mittelungspegel von 65 dB(A). Bezogen auf den Mittelungspegel gelten diese beiden sehr unterschiedlichen Szenarien als identisch. Die Adäquatheit des Mittelungspegels lässt sich unter anderem durch den Abstand zwischen Spitzenpegel und Mittelungspegel beschreiben, der hierbei möglichst klein sein soll. Auf Basis dieses Kriteriums ist der Mittelungspegel gut geeignet, das Straßenverkehrsszenario zu beschreiben, aber nur sehr unzureichend für das Schienenszenario, da hier der Abstand zwischen Spitzenpegel und Mittelungspegel gravierend ist wie die unten angefügte Abbildung verdeutlicht.

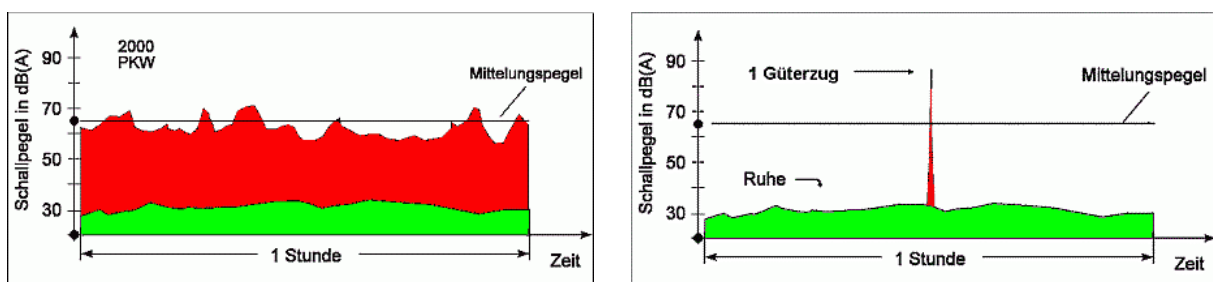


Abb. 101: Mittelungspegel im Vergleich

Windelberg (2004) vergleicht zwei weitere Szenarien, die verdeutlichen, dass Schienenereignisse nicht allein durch den Mittelungspegel beschrieben werden können. In diesen Szenarien fahren jeweils acht unterschiedlich laute Güterzüge auf einer definierten Bahnstrecke. Im ersten Szenario verkehren diese Züge ausschließlich zwischen 22.00 und 23.00 Uhr. Im zweiten Szenario sind sie gleichmäßig auf die gesamte Nacht (22.00 bis 6.00 Uhr) verteilt. Der für den Lärmschutz relevante Mittelungspegel für die Nacht ist hierbei derselbe, jeweils 67.1 dB(A). Es ist aber ganz offensichtlich, dass die Belästigung und die Störung des Schlafes bei potentiellen Anwohnern für die beiden Szenarien sehr unterschiedlich zu bewerten ist: Im ersten Fall ist eine weitgehend ungestörte Nachtruhe, wenn auch erst ab 23 Uhr, gewährleistet, im zweiten Fall kann es zu bis zu acht Aufwachreaktionen kommen.

Es zeigt sich aus diesen Beispielen, dass der für die gesundheitliche Belastung relevante Schienenlärm nicht über den Mittelungspegel angegeben werden kann. Die folgenden weiteren Maße dienen dazu, Schienenlärm genauer zu charakterisieren:

- a) Der Maximalpegel eines Zuges
- b) Der Vorbeifahrpegel: Dies ist der mittlere Pegel eines vorbeifahrenden Zuges, die Mittelung erfolgt über die Vorbeifahrdauer.
- c) Die Vorbeifahrdauer eines Zuges: Eine längere Vorbeifahrdauer führt bei gleichem Pegel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu einer Orientierungs- oder Aufwachreaktion.
- d) Die Anstiegssteilheit des Lärmereignisses: Dieser Wert hängt unter anderem mit der Geschwindigkeit des Zuges zusammen und beschreibt, wie schnell der Pegel von der Ruhebedingung auf den Vorbeifahr-/Maximalpegel ansteigt; kurze Anstiegszeiten führen häufiger zu Orientierungs- oder Aufwachreaktionen.

Die Ruhedauer zwischen zwei Lärmereignissen.

Windelberg zeigt auf der Basis seiner beiden Szenarien, dass jedes dieser Maße die Wahrscheinlichkeit verändert, ob und wie oft ein potentieller Anwohner während seiner Nachtruhe aufgeweckt wird.

Von zentraler Bedeutung für eine Aufwachreaktion oder eine physiologische Erregung ohne Erwachen ist der Maximalpegel. Der Maximalpegel wird beim Schienenlärm in der 16. BImSchV jedoch nicht berücksichtigt. Ein Schutz der Anwohner vor den gesundheitlichen Folgen von regelmäßigen, lärmbedingten Aufwachreaktionen oder physiologischer Erregung ohne Erwachen ist hier nicht gegeben. Die Schädlichkeit der nächtlichen Exposition durch Aufwachen oder physiologischer Erregung ohne Erwachen ist aber dem nächtlichen Fluglärm vergleichbar. Im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluglärmG) wird diesem Umstand Rechnung getragen, indem nicht nur ein äquivalenter Dauerschallpegel, sondern während der Nacht auch ein Maximalpegel inklusive Häufigkeiten für die Ausweisung von Schutzzonen benannt wird. Aus wissenschaftlicher Sicht ist dies auch beim Schienenlärm geboten. Der Schienenbonus ermöglicht jedoch im Gegenteil bei gleicher Zugdichte ggf. höhere Maximalpegel, die damit auch die Wahrscheinlichkeit einer Aufwachreaktion oder einer physiologischen Erregung ohne Erwachen erhöhen, oder alternativ bei gleichem Maximalpegel eine höhere Zugdichte, die bei Überschreitung der relevanten Schwellen zu einer Erhöhung der Anzahl der Erregungs- bzw. Aufwachreaktionen führen. Die dadurch verursachten Schlafstörungen stellen – wenn sie regelmäßig über längere Zeiträume auftreten – ein Gesundheitsrisiko dar.

Auch wenn der Maximalpegel hinsichtlich Aufwachreaktionen und physiologischer Reaktionen von großer Bedeutung ist, darf aber nicht vergessen werden, dass es ebenfalls darauf ankommt, wann genau es im definierten Nachtzeitraum (22h bis 6h) zu diesen Reaktionen kommt und in welchem Abstand zueinander diese liegen. Windelberg schlägt hier die Berücksichtigung der Ruhedauer durch eine sogenannte Ruhedauerbewertung vor. Die beiden oben geschilderten doch recht unterschiedlichen Szenarien unterscheiden sich übrigens nur hinsichtlich dieses letzten Parameters, während alle anderen Maße die gleichen Werte annehmen. Dieses Beispiel verdeutlicht sehr anschaulich die Komplexität der Beurteilung von Schienenlärm, und hier vor allem während der Nacht.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass erstens Straßen- und Schienenlärm ganz verschiedene Auswirkungen haben, die durch die Anwendung eines Mittelungspegels ohne Spitzenpegelkriterium nicht adäquat abgebildet werden, und zweitens ein zureichender Gesundheitsschutz bei Schienenlärm insbesondere zur Nachtzeit eine zusätzliche Berücksichtigung weiterer Parameter erfordert, da intermittierende Lärmereignisse mit hohen Maximalpegeln die Wahrscheinlichkeit von Aufwachreaktionen oder physiologischen Erregungsreaktionen während des Schlafs erhöhen, die bei regelmäßigem Auftreten ein Gesundheitsrisiko darstellen.

6.4.3 Der Schienenbonus

Wie in den vorherigen Abschnitten aufgezeigt wurde, bestehen zwei Vermittlungswege über welche extra-auraler Lärm langfristig zu gesundheitlichen Schäden führen kann. Dies ist zum einen die *bewusst* empfundene Belästigung, die als vorerst rein psychisch konstituierter Stressfaktor schließlich durch im autonomen Nervensystem komplex verzweigte Prozesse Auswirkungen auf die Gesundheit haben kann. Der zweite Vermittlungsweg erfolgt über physiologische Reaktionen auf Lärmereignisse, die auch *unbewusst* (z.B. während des Schlafs) auftreten können.

Nun stellt sich die Frage, nach welcher Maßgabe die Immissionsgrenzwerte, die in der 16. BImSchV für verschiedene Gebietsarten festgelegt werden, richtigerweise angesetzt werden sollen: nach den Werten, bei denen unbewusste physiologische Reaktionen auftreten, oder aber nach dem Grad der Belästigungsreaktion betroffener Anwohner? Letzteres wäre insofern ein befriedigender Ansatz, als die Menschen die Belästigung am ehesten auf den Lärm direkt und bewusst zurückführen.

Auf dieser Argumentation beruht auch der *Schienenbonus*, der 1990 mit einer politischen Entscheidung aufgrund epidemiologischer Felduntersuchungen zu lärmbedingten Belästigungswahrnehmungen mit der 16. BImSchV rechtlich eingeführt wurde. Er beinhaltet bei der Berechnung des Beurteilungspegels einen Abzug von 5 dB(A) von den aufgrund einer Verkehrsprognose berechneten Werten und damit zugleich eine entsprechende Besserstellung des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr, die zu der Besserstellung beider gegenüber Gewerbelärm (gemessen an der TA Lärm) noch dazu kommt.

Wie ist nun dieser Bonus, der auf einer Feldstudie (Interdisziplinäre Feldstudie, IF) mit Erhebungen aus den Jahren 1978-1981 basiert, im Licht der heute verfügbaren wissenschaftlichen Daten einzuschätzen?

Hierzu sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen, die nachfolgend einzeln diskutiert werden sollen. Es handelt sich dabei um (1) Erkenntnisse der Belästigungsforschung zum Schienenbonus und (2) Erkenntnisse zu unbewussten physiologischen Reaktionen/Schlafforschung.

6.4.3.1 Schienenbonus und Belästigungsforschung

Aus Sicht der *Belästigungsforschung* ist die politische Grundsatzentscheidung, einen Schienenbonus einzuführen, angemessen. Die beste vorliegende Metaanalyse [entspricht einer in diesem Bericht vergebenen Evidenzstufe 1 (+ + +)] von Miedema und Vos (1998) zeigt einen empirisch feststellbaren Unterschied von mehr als 5dB(A). Diese Metaanalyse fasst insgesamt 47 Studien aus 11 Ländern mit sekundärstatistischen Methoden zusammen, in welcher die Differenzen der Mittelungspegel von Straßen- und Schienenverkehrslärm hinsichtlich verschiedener Wirkungen verglichen wurde.

Hinsichtlich der Aktualität dieser Daten ist jedoch Vorsicht geboten. Die neuesten Primärstudien der Analyse von Miedema stammen aus dem Jahre 1993, das Gros der Daten aus den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts. Dies wäre nicht von großer Bedeutung, wenn sich die Charakteristik des Eisenbahnverkehrs nicht in den letzten 30-40 Jahren stark verändert hätte: Die Bimmelbahn hat Hochgeschwindigkeitszügen Platz gemacht. Der Güterverkehr auf der Schiene hat stark zugenommen. Zudem hat es weitere beträchtliche verkehrliche Veränderungen gegeben, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Die Erhebungen der IF-Studie fanden in den Jahren 1978-1981 statt. Die in die Auswertungen einbezogenen Gebiete wiesen bei Schienenverkehr Verkehrsmengen zwischen 52 und 258 Zügen/24h auf, der prozentuale Anteil der Güterzüge lag zwischen 10 und 50 %, die Geschwindigkeiten lagen bei maximal 160 km/h. Durch die geringeren Geschwindigkeiten ergab sich zudem eine geringere Dynamik der Pegelanstiege. Die Straßenverkehrsmengen beliefen sich auf 2.000 bis 40.000 KFZ/24h mit einem

Güterverkehrsanteil von ca. 3 % bis 20 %; alle Schienengebiete waren elektrifiziert, ICE-Züge waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betrieb. Zwischenzeitlich hat sich die Zugfrequenz und auch die Geschwindigkeit auf vielen Bahnstrecken erhöht, einzelne Strecken wurden vorwiegend Güterzugstrecken, gleichzeitig hat sich die Schallemission durch technische Neuerungen (z.B. den vermehrten Einsatz von Scheibenbremsen) verringert. Dies bedeutet, dass im Vergleich mit den Erhebungen bei der IF II zwischenzeitlich bei gleichem Mittelungspegel beim Straßen- wie auch beim Schienenverkehr von einer weit höheren Verkehrsmenge, aber auch von einem ganz anders strukturierten Lärmprofil ausgegangen werden muss (Hochgeschwindigkeitszüge, Güterzugstrecken etc). Darüber hinaus wurde die Frage der nächtlichen Spitzenpegel und der damit verbundenen Aufwachreaktionen (siehe dazu den vorangegangene Abschnitt) damals nicht berücksichtigt.

Da in die Wahrnehmung der Belästigung maßgeblich auch die Einstellung zum Verkehrsmittel mit einfließt, ist es geboten, neuere Untersuchungen zu dieser Fragestellung zu berücksichtigen, die die aktuelle Situation von Anwohnern reflektieren. Neuere Studien aus Japan zeigen in der Tat eine Umkehr der Verhältnisse. In einer Synthese von sechs Einzelstudien (Yano, Sato und Morihara 2007) zeigte sich eine höhere Belästigung durch Schienenverkehr im Vergleich mit Straßenverkehr (siehe Abb. 102).

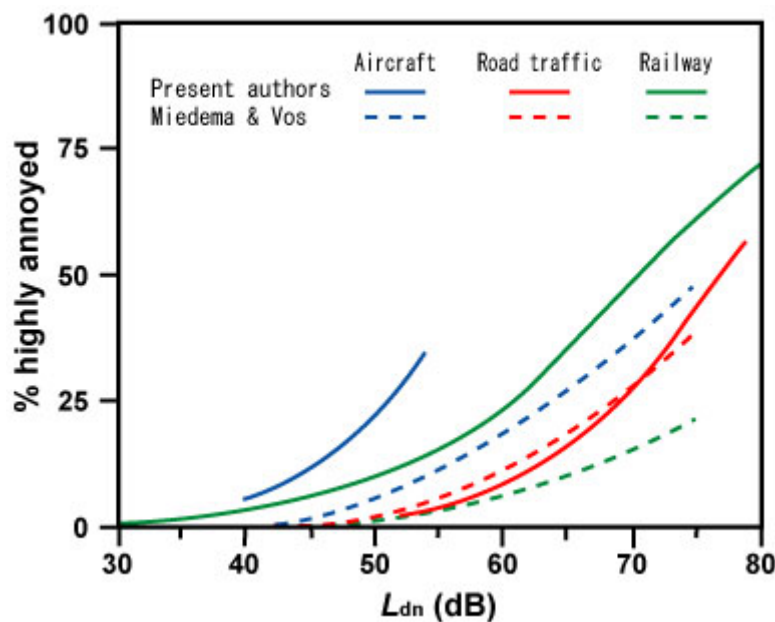


Abb. 102: Dosis-Wirkungsbeziehungen der drei Lärmquellen im Vergleich (Yano, Sato und Morihara 2007)

Aus dieser heutigen Sicht müssen die Ergebnisse der IF-Studie sowie der Metaanalyse von Miedema und Vos als Rechtfertigung eines Schienenbonus daher in Frage gestellt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es vielmehr geboten, die Rechtfertigung eines Schienenbonus hinsichtlich der *Belästigung* anhand aktueller Daten neu zu überprüfen, vor allem hinsichtlich der Hypothese, dass es heute zu einem verändertem Lästigkeitsempfinden gegenüber den 1970er und 1980er Jahren kommt. Bis diese Daten vorliegen, muss – bedingt durch die zitierten neueren Arbeiten – die wissenschaftliche Begründbarkeit des Schienenbonus stark angezweifelt werden. Ob der Schienenbonus fortbesteht bis neuere Daten vorliegen ist letztendlich eine *politische* Frage. Die aus den hier vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen resultierenden Zweifel (siehe auch

folgender Abschnitt) legen jedoch nahe im Sinne des Vorsorgeprinzips vorläufig auf seine Anwendung des Schienenbonus zu verzichten.

6.4.3.2 Schienenbonus und unbewusste physiologische Reaktionen/Schlafforschung

Wie schon angemerkt berücksichtigt der Schienenbonus ausschließlich Daten aus der *Belästigungsforschung*. Diese durch die Änderung der Verhältnisse teilweise obsoleten und, wie die Methodenkritik der im Review aufgezeigten Studien klar verdeutlicht, auch qualitativ verbesserungsbedürftigen Untersuchungen sind durch methodisch saubere und vor allem standardisierte objektive Daten aus kontrollierten Studien (z.B. Ergebnisse aus der Schlafforschung mit objektiven Parametern) zu ergänzen. Zentral ist hier nun die Frage nach der Wirkungsweise von Lärm auf die Gesundheit. Eine direkte Wirkung von Lärm im Sinne einer Stressindikation und den darauf folgenden autonomen psychophysiologischen Reaktionen wurde stets ausschließlich durch sehr hohe Lärmpegel (bis zum Hörverlust ab 120 dB(A)) vermutet. Bei geringen Schallpegeln (die nicht bis zum Hörverlust reichen) wurde jedoch lediglich von einer indirekten Wirkung über einen durch das Bewusstsein vermittelten Pfad ausgegangen (siehe Modell Babisch Abb. 103). Die bewusst erlebte Lärmbelastung führt dabei durch gestörte Tätigkeiten oder auch durch die erlebte Belästigung sowie deren kognitive und emotionale Reaktionen schließlich zu einer Stressreaktion. Durch neuere Studien, vor allem im Bereich laborexperimenteller Schlaflaborstudien (Basner u. a. 2008; Griefahn u. a. 2005; Griefahn, Marks und Basner 2006; Griefahn, Marks und Robens 2006; Griefahn und Marks 2006), zeigt sich aber, dass es bereits *bei geringen Schallpegeln* zu einer direkten psychophysiologischen Lärmwirkung kommen kann, die unter der bewussten Wahrnehmungsschwelle liegt und demnach *kein direktes Belästigungsempfinden* der Betroffenen voraussetzt (Dieser Pfad wird in Babischs Modell mit der rot gestrichelten Linie angedeutet → siehe Abb. 103). Medizinisch-physiologische Studien zu Lärmwirkungen im vegetativen System in Folge von Schienen- verglichen mit Straßenverkehr etwa sind so gut wie nicht durchgeführt worden. Dazu hat sich Spreng (1997) umfassend in einem Vortrag und Tagungsband zum Fachseminar Schienenlärm in Frankfurt geäußert. In Abhängigkeit von der Anstiegssteilheit des Schalles kommt es bereits im Hörnerv zu einer Überbetonung der ausgelösten Erregung. Durch schnelle Verarbeitungsbahnen gelangt diese Erregung direkt ins Stammhirn, von welchem aus über vegetative Nervenbahnen Blutgefäße, Herz, Nebennieren und viele weitere periphere Systeme beeinflusst werden. So auch die Aktivierung der Hypophyse, welche ACTH ausstößt und weiter folgend verstärkt auf Nebennieren, Schilddrüse wirkt und die Freisetzung so genannter Stresshormone wie Kortisol und Aldosteron stimuliert. Da das Stammhirn von dieser überschießenden Erregung bereits nach 5 ms erreicht wird, kann sich das Vegetativum gegen diese Erregung bei sehr dynamischen Schalländerungen, wie etwa dem Schienenlärm mit hohen Anstiegssteilheiten, nur unzureichend wehren. All diese organismischen Vorgänge sind weder durch unmittelbare Befragung der Betroffenen noch nachträglich im Labor nachweisbar, da sie nicht längerfristig reproduzierbar sind bzw. nicht gespeichert werden. Die Befragung, auf welcher der Schienenbonus beruht, gibt leider keine Auskunft über die vegetativen Prozesse und Veränderungen in Folge von akutem dynamischen Schienenlärm. Laut Spreng (1997) ist diese überschießende Erregung, die neben dem peripheren Nervensystem auch das zentrale Nervensystem betrifft, aber durch elektrische Aktivitätenerfassung messbar. Namba, Hashimoto und Rice (1987) haben in laborexperimentellen Studien nachweisen können, dass je nach Dynamik des Schallanstiegs und Dynamik der Schalländerung eine sehr starke Erregung im menschlichen Organismus zu erwarten ist.

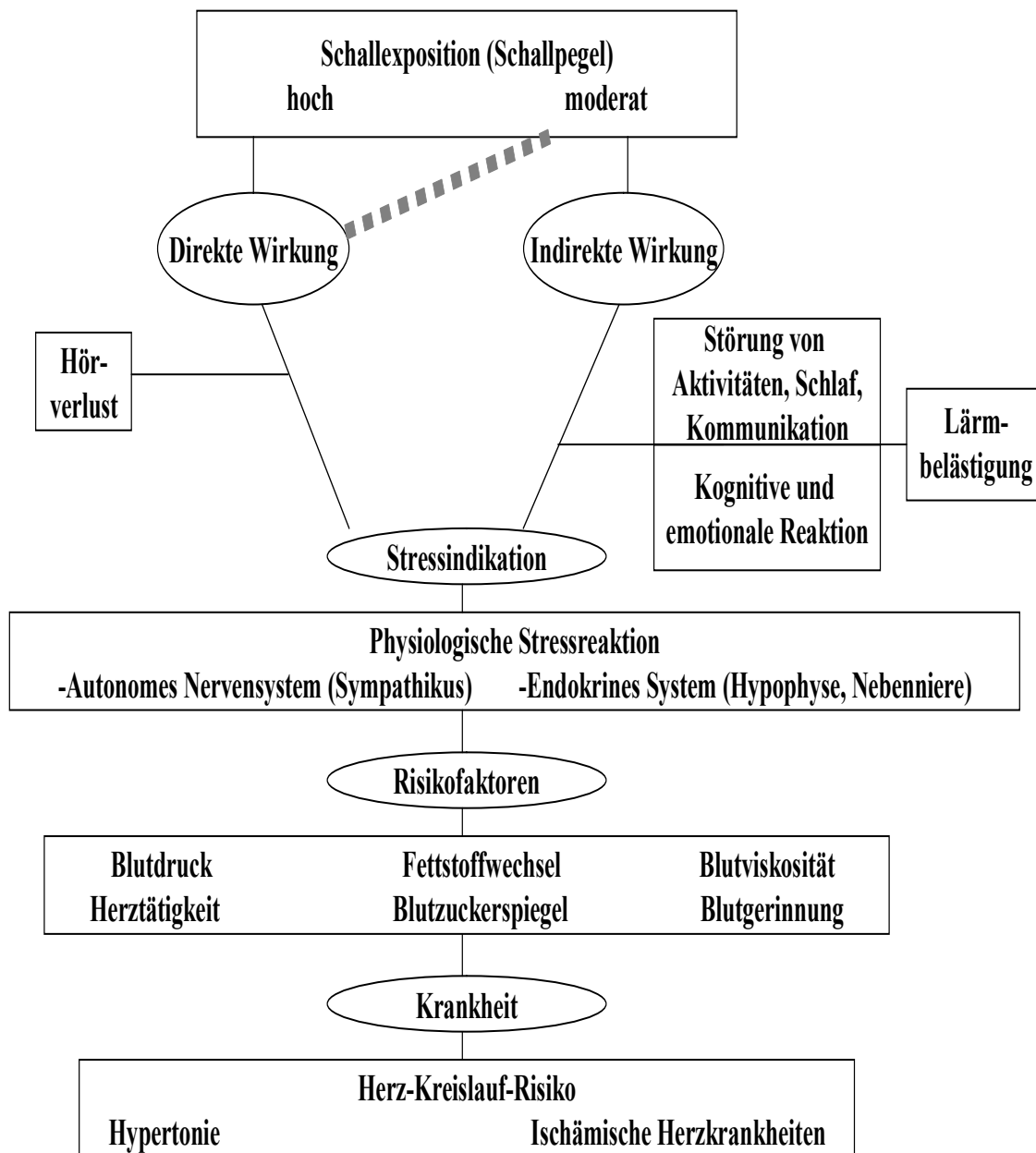


Abb. 103: Psychophysiologisches Lärmwirkungsmodell (nach Babisch 2000)

Die Flankensteilheit (entspricht der umgerechneten Anstiegssteilheit und Anstiegsdauer in dB/s) dynamischer Schallreize beeinflusst demnach die periphere unwillkürliche und auch zentralnervöse Erregung insofern, als mit größerer Steilheit auch wachsende kortikale Erregung einhergeht. Lässt man den Schall ganz langsam ansteigen, das heißt ohne dynamische Änderung, entspricht das Erregungsverhalten einer so genannten statischen Intensitätsfunktion, die zu einer dynamischen Intensitätsfunktion wird, sobald die Anstiegssteilheit (Dauer des Anstiegs in Sekunden in einem gewissen Pegelbereich in Dezibel) größer wird und schließlich dem Maß kortikaler Übererregung Ausdruck verleiht. Spreng betont, dass nicht nur eine Amplitudenmodulation, sondern auch eine Frequenzmodulation des Schalles vergleichbare Erregungen in Abhängigkeit von der Dynamik dieser Modulation hervorrufen. Diese Form der Änderung würde ein linearer

Schallpegelmesser überhaupt nicht anzeigen – trotz eines massiv aktivierten Vegetativums.

Das bedeutet, dass unbeachtet des Schallpegels vor allem die Anstiegssteilheit, das dynamische Erregungsprofil und auch das empfundene Lärmprofil im menschlichen Organismus den Grad der physiologischen Reaktion bestimmt. Diese Anstiegssteilheit fließt aber in die Berechnungen des Mittelungspegels nicht ein und bleibt in der bisherigen Rechtfertigung des Schienenbonus unberücksichtigt. Dies scheint insofern untragbar, als die vorausgehenden Schilderungen vegetativer Reaktionen auf dynamische Schallreize, wie sie für den Schienenlärm typisch sind, die Wichtigkeit der Aufnahme weiterer Parameter (so zum Beispiel der Flankensteilheit) neben der Pegelhöhe und -dauer in der Festsetzung von für den Schutz der Gesundheit bestimmten Grenzwerten für Lärmpegel verdeutlichen.

Osaka (1972, 1974) hat in zwei Untersuchungen bei einem Schienenlärmschallereignis von 50 bzw. 60 dB(A), 20 s Dauer innerhalb von drei Stunden Beschallung und 42 Zügen pro Nacht eine Abnahme der Leukozyten um ca. 10 % (bei Rosa Rauschen nur ca. 1 %) und eine Abnahme der basophilen Granulozyten um 15 % (bei Rosa Rauschen nur ca. 2 %) nachweisen können. In der späteren Untersuchung zeigten sich bei 20 s andauernden Schallereignissen bei bereits 50 dB(A) in sechs Stunden und 18 Zügen pro Nacht eine Zunahme der eosinophilen Granulozyten um 20 % im Vergleich mit lärmfreien Kontrollgruppe mit 40 % nächtlichem Zuwachs, oder eine Zunahme der basophilen Granulozyten um 8 % im Vergleich mit 20 % der Kontrollgruppen bzw. eine Abnahme der Leukozyten um 5 % im Gegensatz zu 2 % bei der Vergleichgruppe. Der Aufbau dieser Substanzen ist wichtig für die Immunabwehr (z.B. sind die Granulozyten für Infektionsabwehr und kurze Heilphasen zuständig). Eine erhöhte Cortisolausschüttung nachts durch Lärm verhindert den sonst üblichen nächtlichen Anstieg dieser Substanzen.

Aus diesen Erkenntnissen folgt aus wissenschaftlicher Sicht die unabdingbare Forderung nach einer Überprüfung und erneuten Verifizierung der Haltbarkeit des Schienenbonus (vor allem auf der Basis *objektiver manifester gesundheitsbezogener* Parameter) im Sinne der gesundheitspolitischen, aber wohl auch verfassungsrechtlich begründeten Pflicht des Staates zum Schutz der Gesundheit seiner Bevölkerung.

In Anlehnung an das Modell von Babisch (siehe Abb. 103) sollte dabei auf drei Ebenen der Indikatoren für Kardiovaskuläre Erkrankungen unterschieden werden, deren klinische Relevanz sich – von 1 bis 3 zunehmend – erhöht:

1. Stressindikatoren (z.B. Stresshormone): sind selbst nicht von direkter klinischer Relevanz, dienen aber der Erfassung von relevanten Wirkungsmechanismen. Sie sind im Sinne von Kurzzeitparametern zu verstehen und stehen daher am Anfang der Wirkungskette.
2. Risikofaktoren (z.B. Blutdruck, Herzrätigkeit): sind ausschlaggebende Faktoren für die Gesundheit und vermitteln als kontinuierliche Variablen ein erhöhtes Risiko für bestimmte Erkrankungen.
3. Manifeste Erkrankung (z.B. Hypertonie): wird als direkte Konsequenz und demnach Indikator einer Gesundheitsschädigung betrachtet. Erkrankungen erlauben eine direkte quantitative Risikoabschätzung auf der Basis gesammelter Daten.

Sofern aufgrund mangelnder empirischer Evidenz keine Aussagen zu direkten Auswirkungen von Lärm auf die Gesundheit (manifesten Erkrankungen) gemacht werden können, muss sich das Augenmerk auf indirekte Wirkungspfade richten, die empirisch belegt werden können wie zum Beispiel die Auswirkungen von (Schienen-)Lärm auf physiologische Parameter (vegetative Reaktionen). Auf der Grundlage solcher bereits verfügbarer Daten ist der Schienenbonus nicht länger haltbar. Das zeigt z.B. die empirische Befundlage der laborexperimentellen Schlafforschung.

Bereits im vorherigen Abschnitt wurde erwähnt, dass der Schienenbonus mit den Ergebnissen der Belästigungsforschung alleine nicht länger begründbar ist. Da Schienenlärm nachweislich ein Lärmprofil aufweist, das nicht nur über den indirekten Pfad der Belästigung, sondern auch direkt als Reizstimulus (Stressor) auf das autonome Nervensystem wirkt und auf diese Weise bei dauerhafter Belastung schwerwiegende pathogene Reaktionen anstoßen kann, muss sich eine eventuelle erneute Rechtfertigung des Schienenbonus auch diese neuen lärmmedizinischen Erkenntnissen berücksichtigen.. Auf Basis der hier berichteten Erkenntnisse ist die unhinterfragte Weiterverwendung des Schienenbonus lärmmedizinisch nicht angemessen.

6.4.4 Zusammenfassung

Schienenbonus

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die wissenschaftliche Rechtfertigung des Schienenbonus auf veralteten Daten der Lärmwirkungsforschung beruht und neuere Erkenntnisse zu Zweifeln an diesen Daten führen. Die Untersuchungen, auf denen der Schienenbonus beruht, sind eine große Anzahl von Feld- und weniger Laborstudien, in denen die subjektive Belästigung und andere Gestörtheitsvariablen *erfragt* wurden. Diese Studien weisen zum Teil methodische Mängel auf. Die Erkenntnisse der Auswirkung *gemessener* autonomer Reaktionen die durch die spezifischen Eigenschaften von Schienenlärm hervorgerufen werden, fanden bei der Einführung des Bonus keine Berücksichtigung.

Einen Schienenbonus lediglich aufgrund der subjektiv erfragten Belästigung festzulegen reicht aus heutiger Sicht nicht aus. Daneben müssen andere Wirkungspfade, hier besonders die physiologischen, nicht unmittelbar bewusst wahrgenommenen, aber objektiv durchaus messbaren Effekte berücksichtigt werden. Diese autonomen Reaktionen können sich auf lange Sicht zu manifesten gesundheitsgefährdenden Endpunkten verdichten. Dies gilt insbesondere für die Einwirkung auf den Schlaf, entweder durch direktes Aufwachen in Folge des Lärms oder aber durch eine physiologische Erregung, die nachweislich auch bereits bei einer Lärmexposition ohne Aufwachreaktion erfolgt. Finden diese Ereignisse regelmäßig statt, so stellt die wiederholte autonome Erregung und die chronische Störung des Schlafes ein langfristiges Gesundheitsrisiko dar. Durch die Anwendung eines Schienenbonus wird die Wahrscheinlichkeit dieses Gesundheitsrisiko noch erhöht, da der Bonus faktisch entweder bei gleicher Zugdichte höhere Spitzenpegel oder bei gleichen Spitzenpegeln eine erhöhte Zugdichte ermöglicht.

Mit den Ergebnissen der Belästigungsforschung alleine ist der Schienenbonus nicht länger begründbar, selbst wenn diese aktuell und methodisch einwandfrei ermittelt worden wären, was derzeit nicht der Fall ist. Da Schienenlärm nachweislich ein Lärmprofil aufweist, das nicht nur über den indirekten Pfad der Belästigung, sondern auch direkt als Reizstimulus (Stressor) auf das autonome Nervensystem wirkt und auf diese Weise bei dauerhafter Belastung schwerwiegende pathogene Reaktionen anstoßen kann, muss sich eine erneute Rechtfertigung des Schienenbonus auch mit diesen neuen lärmmedizinischen Erkenntnissen auseinandersetzen. Auf Basis der hier berichteten Erkenntnisse ist die unhinterfragte Weiterverwendung des Schienenbonus lärmmedizinisch nicht angemessen.

Analogien zu anderen Verkehrsarten

Zwar gibt es zunehmend gut untersuchte Daten zu physiologischen Parametern (wie zum Beispiel erhöhter Blutdruck und Herzrätentätigkeit) in Folge von Straßen- und Flugverkehr (vergleiche (Babisch 2006; Babisch 2000; Babisch 2008; Babisch u. a. 2005; Babisch und Kamp 2009), doch die vorangegangene Diskussion über den Vergleich zwischen Schienen- und Straßenverkehr auf der Basis von standardisierten Mittelungspegeln

macht die Unangemessenheit dieses Vergleichs unmissverständlich klar und damit auch, dass Analogieschlüsse von Lärmwirkungsdaten anderer Verkehrsquellen mit abweichenden Lärmprofilen auf den Schienenverkehr grundsätzlich problematisch und leicht irreführend sind.

Darüber hinaus bedarf es neuerer Untersuchungen, die einen Vergleich von Schienen- und Straßenverkehr zu Belästigung nach 1993 und vor allem auch zu manifesten objektiven Parametern (so z.B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen) bei Schienenanwohnern untersuchen. Außerdem muss auch ein adäquaterer Vergleich als derjenige auf der Basis des Mittelungspegels herangezogen werden.

Die Belästigungsreaktionen auf Lärm streuen je nach individueller persönlicher und akustischer Situation. So ist in etwa nur 1/3 der Gestörtheit durch die akustische Situation erklärbar, 1/3 durch individuelle Eigenschaften (z.B. Lärmempfindlichkeit, Einstellung zur Bahn) und 1/3 noch nicht geklärt. Jedes Drittel sollte in der Berechtigung des Schienenbonus und dessen empirischer Untersuchung in den Erhebungen Eingang und adäquate Berücksichtigung finden.

Spitzenpegelkriterium

Straßen- und Schienenlärm haben jedenfalls zur Nachtzeit ganz verschiedene Auswirkungen, die durch die undifferenzierte Anwendung eines Mittelungspegels ohne Spitzenpegelkriterium nicht adäquat abgebildet werden. Bei Schienenlärm ist insbesondere zur Nachtzeit eine zusätzliche Berücksichtigung weiterer Parameter (Spitzenpegel, Ruhezeitbewertung, Flankensteilheit) wissenschaftlich geboten, weil sonst Lärmereignisse zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Aufwachreaktionen oder physiologischen Erregungsreaktionen während des Schlafs führen können. Diese stellen bei regelmäßigem Auftreten ein Gesundheitsrisiko dar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anwendung eines Schienenbonus wie er 1990 auf Basis der damals vorliegenden Daten eingeführt wurde, aus heutiger Sicht unter Einbeziehung neuer Erkenntnisse nicht mehr sinnvoll erscheint. Der aktuelle Kenntnisstand ergibt hinsichtlich des Vergleichs Schiene und Straße (so dieser überhaupt adäquat geleistet wird) je nach Untersuchungsbereich widersprüchliche Befunde. In den besonders wichtigen Bereichen zu manifesten Erkrankungen infolge von Lärm finden sich keine Vergleichsdaten. Beim Schienenlärm entsteht ein gesundheitliches Risiko vor allem durch eine regelmäßige Störung des Schlafes, die durch den Schienenbonus, dem Fehlen eines Grenzwertes für Maximalpegel, der mangelnden Berücksichtigung der Flankensteilheit sowie dem Fehlen einer Ruhezeitbewertung erhöht wird. Angesichts dieser Erkenntnisse ist sowohl der Vergleich als auch die einseitige Bevorzugung oder Benachteiligung eines Verkehrsmittels durch die gesetzliche Festlegung eines Bonus nicht angemessen.

6.4.5 Abschließende Überlegungen zum Risikomanagement für den Zusammenhang zwischen Schienenlärm und manifesten Gesundheitsstörungen

Zu manifesten Erkrankungen wie etwa Herzinfarkt oder Schlaganfall existieren für den Bereich des Schienenverkehrs wenig evidente empirische Daten. Ein Analogieschluss der Effekte von Straßenverkehr zu Schienenverkehr beispielsweise für den Wirkungsbereich manifester Herz-Kreislauf-Erkrankungen ist, wie bereits erwähnt, aufgrund unterschiedlicher, komplexer Lärmprofile nicht ohne weiteres möglich. Die Darstellung dieser lärmcharakteristischen Unterschiede würde den Rahmen dieses Berichts in seinem Fokus auf die gesundheitsbezogenen Auswirkungen von Schienenlärm sprengen, da sie mit großem Aufwand in der Einholung der notwendigen und gleichzeitig umfangreichen, komplexen Informationen verbunden wäre. Nichts desto trotz sei im Folgenden kurz auf

empirische Daten zu verkehrslärmbedingten Herz-Kreislauf-Erkrankungen hingewiesen, vorrangig für Straßen- und Flugverkehr.

Beispielsweise wurde zur Abklärung einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch nächtlichen Fluglärm um den Flughafen Köln-Bonn eine der größten epidemiologischen Studien durchgeführt. Dazu wurden die Daten über Verordnungen von Arzneimitteln (Präparate zur Behandlung erhöhten Blutdrucks, zur Behandlung von Erkrankungen des Herzens und des Blutkreislaufs, Tranquillizer, Schlaf- und Beruhigungsmittel, Arzneimittel zur Behandlung von Depressionen und von Erkrankungen der Verdauungsorgane und schließlich die sonstigen Arzneimittel) durch niedergelassene Ärzte von mehr als 809.000 Versicherten von sieben gesetzlichen Krankenkassen mit Lärmdaten aus verschiedenen Lärmquellen zusammen gebracht. Dieses entspricht mehr als 42 % der Gesamtbevölkerung der Studienregion (Stadt Köln, Rhein-Sieg-Kreis, Rheinisch-Bergischer Kreis). Diese Daten standen in unterschiedlichem Umfang (7 Monate – 4 Jahre) zur Verfügung. Insgesamt kamen dadurch Daten aus mehr als 1.8 Millionen Versichertenjahren zusammen. Fluglärm wurde auf der Basis von Daten aller Flugbewegungen des Flughafens Köln-Bonn für das Kalenderjahr 2004 als Dauerschallpegel für alle Adressen im Umfeld des Flughafens berechnet, soweit der Lärmpegel 39 dB(A) überstieg. Der Dauerschallpegel wurde für verschiedene Zeitfenster am Tage (6.00-22.00 Uhr) und in der Nacht (22.00-6.00 Uhr, 23.00-1.00 Uhr, 3.00-5.00 Uhr) berechnet. Straßenverkehrslärm und Schienenverkehrslärm wurde adressengenau aus den Daten des Lärm-Screening-Projektes des Landesumweltamtes des Landes Nordrhein-Westfalen für den Tag (6.00-22.00 Uhr) und für die Nacht (22.00-6.00 Uhr) übernommen. Um mögliche Verzerrungen durch unterschiedlichen sozialen Status der Versicherten in den statistischen Analysen korrigieren zu können, wurden die Sozialhilfe-Häufigkeiten der Stadt- und Orts-Teile der Städte und Gemeinden der Studienregion einbezogen.

Zum einen wurde berechnet, wie häufig überhaupt Arzneiverordnungen für bestimmte Arzneimittelgruppen in fluglärmbelasteten Regionen stattfanden. Dabei erfolgte ein Vergleich mit denjenigen Regionen, in denen überhaupt kein Fluglärm vorhanden war und der nächtliche Straßen- und Schienenverkehrslärm unter 35 dB(A) lag. In einem zweiten Vergleich wurden die Menge verordneter Arzneimittel pro Versicherungsjahr in Abhängigkeit von Fluglärm, Straßen- und Schienenverkehrslärm und anderen Korrekturvariablen berechnet. Die Auswertungen ergaben generell, dass insbesondere nächtlicher Fluglärm zwischen 3.00 und 5.00 Uhr einen Einfluss auf die Häufigkeit und die Menge verordneter Arzneimittel hatte. Insgesamt zeigten sich alle Effekte bei Frauen deutlicher als bei Männern. Dieser Befund erklärt sich dadurch, dass Frauen nach allen vorliegenden Untersuchungen häufiger einen niedergelassenen Arzt konsultieren und deswegen auch häufiger eine Arzneiverordnung erhalten als Männer. Die wesentlichen Befunde sind im Folgenden für nächtlichen Fluglärm (3.00-5.00 Uhr) für geringere Lärmbelastung (40-45 dB(A)) und für stärkere Lärmbelastung (46-61 dB(A)) dargestellt. Blutdrucksenkende Arzneimittel wurden für Männer mit stärkerer Lärmbelastung um 24 % häufiger verordnet als in der Vergleichsregion. Bei Frauen wurden diese Arzneimittel schon bei geringerer Belastung 27 % häufiger verordnet, bei stärkerer Fluglärmbelastung um 66 % häufiger. Arzneimittel zur Behandlung von Herz- und Kreislauferkrankungen (ohne blutdrucksenkende Mittel) wurden bei geringer lärmbelasteten Männern um 14 % häufiger verordnet, bei stärkerem Fluglärm um 27 % häufiger. Die entsprechenden Werte für Frauen liegen mit 22 % und 116 % deutlich höher. Schwerer erkrankte Patienten benötigen z.T. Arzneimittel aus verschiedenen Arzneimittelgruppen. Bei solchen Patienten, die sowohl blutdrucksenkende Medikamente als auch Medikamente für Herz- und Kreislaufkrankheiten benötigten, stiegen unter dem Einfluss von Fluglärm die Verordnungshäufigkeiten stärker an. Bei Männern fanden sich hier Erhöhungen um 17 % (geringer Fluglärm) und 44 % (stärkerer Fluglärm), während bei Frauen die Steigerungen wieder höher ausfielen (37 % bzw. 184 %). Tritt bei schwerer erkrankten Patienten noch die Notwendigkeit der Verordnung eines Tranquillizers oder eines vergleichbar wirkenden Arzneimittels hinzu, zeigen sich statistisch signifikante Erhöhungen lediglich bei Frauen.

Hier liegen die Anstiege bei 79 % (geringerer Fluglärm) bzw. 211 % (stärkerer Fluglärm). Die Verordnung von Tranquillizern, Schlaf- und Beruhigungsmitteln als einzelne Arzneimittelgruppe ist bei Männern in Abhängigkeit von der Fluglärmintensität nicht erhöht, bei Frauen finden sich Erhöhungen um 29 % in Gegenden mit geringerer nächtlicher Fluglärmbelastung und um 35 % in Regionen mit stärkerem Fluglärm.

Die Verordnungsmengen pro Versicherungsjahr steigen vor allem bei älteren Patientinnen und Patienten mit steigender Belastung durch Fluglärm stärker an. Leben die Versicherten in Zonen, bei denen die Möglichkeit zur Finanzierung von Schallschutzmaßnahmen für Schlafzimmer durch den Flughafen gegeben war, so sinkt die Verordnungsmenge vor allem für Tranquillizer, Schlaf- und Beruhigungsmittel im Vergleich zu solchen Zonen, in denen eine solche Finanzierungsmöglichkeit nicht gegeben war. Dennoch steigen auch bei Schallschutzfinanzierung durch den Flughafen die Verordnungsmengen mit steigendem Fluglärmpegel. Für die Verordnungsmengen von blutdrucksenkenden Arzneimitteln fallen derartige Effekte durch Schallschutzmöglichkeiten deutlich geringer aus als bei den Tranquillizern. Abschließend sei kritisch darauf hinzuweisen, dass die Qualität von Indikatoren der Medikamentenverschreibung für die Untersuchung der Beziehungen von Krankheiten zu Lärmwirkungen als gering einzustufen ist; auch die Quantität des Datenmaterials kann diesen Nachteil nicht ausgleichen. Entscheidend ist, dass es keinerlei Angaben zu den wichtigsten Risikofaktoren für die Erkrankungsgruppen gibt, die mit den Medikamentenangaben erfasst werden sollen.

Die Vergleichsgruppen, die in weniger lärmbelasteten Gebieten wohnen können, haben deshalb auch häufig einen Sozialstatus, der ihnen eine private Versicherung erlauben würde. Sie bleiben aber in gesetzlichen Krankenkassen und haben einen um ein Mehrfaches niedrigeren Krankenstand, verzerren deshalb aber als Vergleichspopulation die Ergebnisse.

Zum Tageslärmpegel von 6.00 bis 22.00 Uhr, zum Nachtlärmpegel von 22.00 bis 06.00 Uhr oder dem 24h-Dauerschallpegel gibt es keine oder deutlich niedrigere Beziehungen als zu dem Zeitraum nachts zwischen 03.00 und 05.00 Uhr.

Für die Zusammenhänge zwischen Fluglärm und Bluthochdruck sowie zwischen Straßenverkehrslärm und Herzinfarktrisiko wurden auf der Grundlage von Meta-Analysen Dosis-Wirkungsbeziehungen abgeleitet (Babisch und v. Kamp 2009; Babisch 2008), die auf einen Anstieg des Bluthochdruck- bzw. Herzinfarktrisikos mit steigender Lärmbelastung schließen lassen. Dazu hat Babisch (2006) ein Review zu Transportation Noise und kardiovaskulärem Risiko mit 61 epidemiologischen Studien durchgeführt (davon lediglich eine Studie zu Schienenlärm). Solche Dosis-Wirkungskurven können für quantitative Risikoabschätzungen herangezogen werden. Entsprechende Berechnungen wurden von Babisch (Babisch 2006) unter Benutzung von hochgerechneten Lärm-expositionsdaten des Umweltbundesamtes für Deutschland exemplarisch durchgeführt (Bezugsjahr 1999). Danach wären 2.9% aller Herzinfarktfälle auf den Straßenverkehrslärm zurückzuführen. Entsprechende Analysen für Schienenverkehr stehen in Ermangelung von Studien und Untersuchungsergebnissen allerdings noch aus.

Zwar ist der Straßenverkehr die dominierende Geräuschquelle für den überwiegenden Teil der Bevölkerung Ende des 20. Jahrhunderts (siehe Tab. 27). Nach Berechnungen ist durch Straßenverkehr knapp die Hälfte der Bevölkerung mit Pegeln belastet, bei denen Beeinträchtigungen des physischen und sozialen Wohlbefindens zu erwarten sind (L_m über 55 dB(A) tags). Beim Schienenverkehr beträgt der Anteil ca. 20%. Von Pegeln, bei denen ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen besteht ($L_m > 65$ dB(A) tags) sind im Falle von Straßenverkehr 15,6 % und im Falle von Schienenverkehr 3,1 % der Bevölkerung betroffen (siehe Tabelle). Auch nachts ist die Geräuschbelastung vielerorts hoch. So ist etwa die Hälfte der Bevölkerung durch Straßenverkehr Pegeln ausgesetzt ($L_m > 45$ dB(A)), bei denen mit Beeinträchtigungen des Schlafes bei geöffneten Fenstern

gerechnet werden muss. Beim Schienenverkehr beträgt der Anteil immer noch ca. 37 % (siehe Tab. 27).

Tab. 27: Berechnete Geräuschbelastung der Bevölkerung (alte Länder) durch Straßen- und Schienenverkehr (Umweltbundesamt, Berlin)

Mittelungs- pegel [dB(A)]	Anteil der Bevölkerung (%), belastet durch			
	Straßenverkehr im Jahr 1999		Schienenverkehr im Jahr 1997	
	tags	nachts	tags	nachts
> 45 - 50	16,4	17,6	12,4	15,5
> 50 - 55	15,8	14,3	14,9	10,8
> 55 - 60	18,0	9,3	10,4	6,2
> 60 - 65	15,3	4,2	6,2	2,7
> 65 - 70	9,0	2,9	2,3	0,9
> 70 - 75	5,1	0,2	0,7	0,4
> 75	1,5	0,0	0,1	0,1

Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge wurden aber nicht nur für Belästigung, sondern auch für schienenverkehrslärmbedingte Schlafstörungen aufgestellt. Für den Bereich der Herz-Kreislauf-Erkrankungen gibt es nur eine derart mangelhafte empirische Datenlage, dass eine Schätzung von Dosis-Wirkungsbeziehungen unmöglich ist. Jedoch kann nur mit Hilfe dieser Untersuchungen eine adäquate Risikocharakterisierung und ein daraus folgendes Risikomanagement aufgebaut werden, das dem Schutz der Bevölkerung vor gesundheitsschädlichen Verkehrslärm dient. Wichtig hierbei ist die Prüfung des vollen Kontinuums des in der Realität vorkommenden Schalldruckpegelbereichs, um eine irreführende Beschränkung der untersuchten Lärmwirkungen in Folge von zu wenigen erhobenen Werten, etwa auf der Grundlage des äquivalenten Dauerschallpegels, zu verhindern. Nicht unwesentlich ist auch der Einbezug einer Reihe weiterer, die Lärmwirkung modifizierender Faktoren, so etwa:

- der Maximalpegel
- schwankender Anstiegssteilheiten
- Lärm-Ruhe-Intervallen
- Beschaffenheit des Gleisbettes
- verschiedene Zugarten mit unterschiedlichen technischen (Geräusch-)Profilen (siehe Abb. 104)

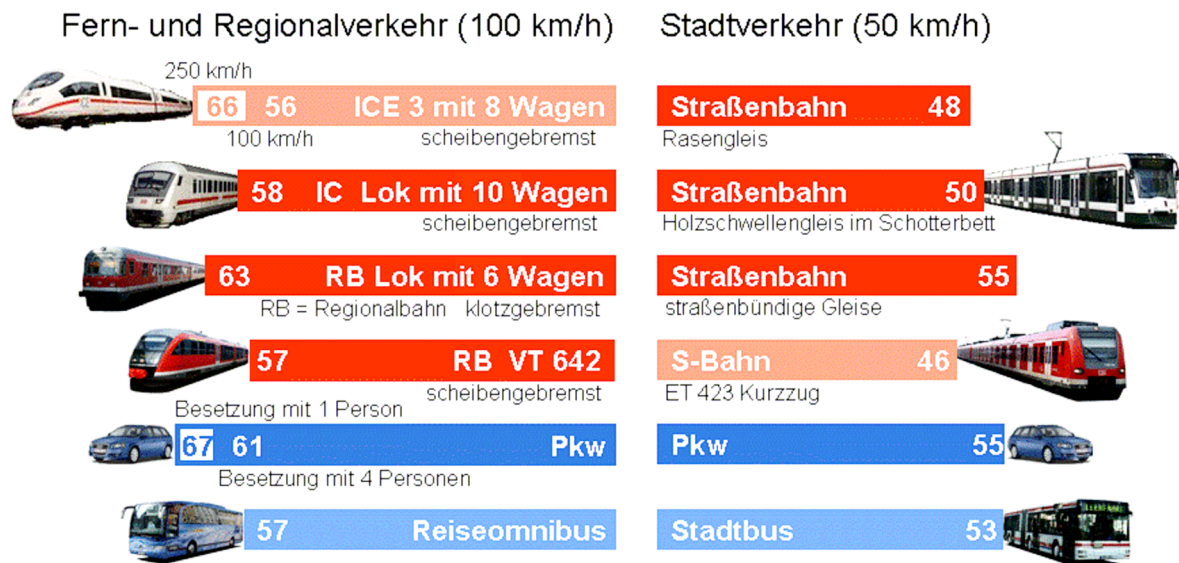


Abb. 104: Geräuschbelastung durch verschiedene Verkehrslärmquellen

Darüber hinaus bedarf es unausweichlich methodisch sauberer Langzeituntersuchungen zu den Auswirkungen von Schienenlärm auf die Gesundheit, um Langzeitfolgen in Form manifester Herz-Kreislauf-Erkrankungen, die wohlmöglich durch die Verdichtung zahlreicher lärmbezogener (physiologischer) Risikofaktoren entstehen können, herauszustellen. Abschließend sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Analogieschlüsse von anderen Verkehrsbereichen auf Schienenlärm in Bezug auf medizinische Endpunkte aufgrund der eingeschränkten Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Lärmarten als unzureichend anzusehen sind. Sie sollten jedoch Hinweischarakter haben und als ernstzunehmender Indikator für notwendigen Handlungsbedarf im Bereich der ungenügend untersuchten medizinischen Auswirkungen von Schienenlärm angesehen werden.

6.5 Exhibit

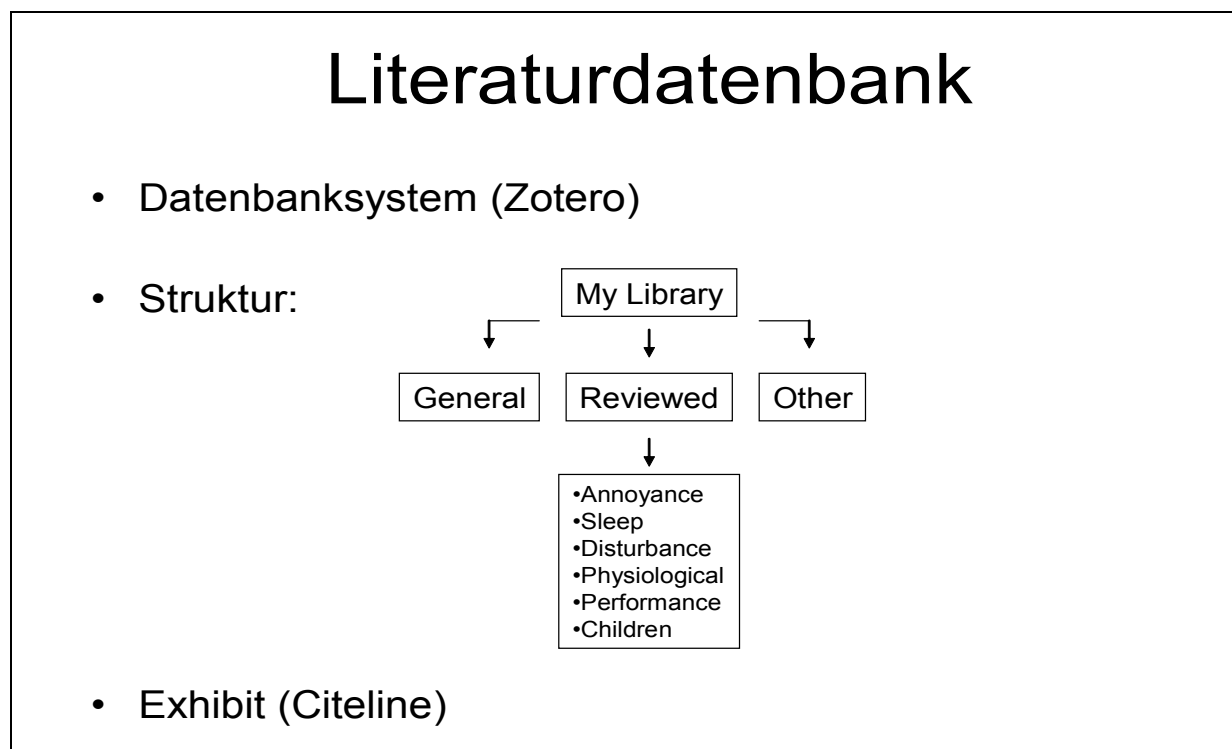


Abb. 105: Überblick über die Literaturdatenbank

In der Verfassung des Reviews zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Schienenlärm wurde ein breiter Pool an empirischen Studien zu diesem Themenbereich und theoretischem Grundlagenmaterial zur Lärmwirkungsforschung allgemein angelegt. Alle Referenzen wurden in einer Literaturdatenbank mit dem Namen Zotero gesammelt und sortiert. Diese hilft, das zahlreiche Datenmaterial zu strukturieren, um damit arbeiten und es abrufen zu können. Die Grundstruktur gliedert sich in drei große Unterkategorien der gesamten Daten-Bibliothek („My library“). Im Unterverzeichnis „General“ ist Literatur zu allgemeinen Grundlagen der Lärmwirkungsforschung zu finden. Im Ordner „Reviewed“ sind alle Studien, die im Review des Berichts auftauchen, verzeichnet. Die Kategorie „Other“ umfasst alle restlichen Artikel und Referenzen, die während der Recherche zu Schienenlärmwirkungsstudien gefunden wurden, aber diesen Zusammenhang nicht direkt (be-)treffen oder in eines der zwei anderen Verzeichnisse einzuordnen ist.

Mit dem Schienenlärm-Exhibit (engl. Ausstellung, Anhang) wird die vollständige Information über die Literatur-Recherche zu gesundheitlichen Auswirkungen von Schienenlärm an den Auftraggeber weiter gegeben. Das Exhibit ist eine interaktive Darstellung der vom Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene erstellten Literatur-Datenbank auf einer Website. Mit ihr lassen sich sowohl Autoren, Titel und Abstracts von Veröffentlichungen suchen. Die Webseite kann in dem mitgelieferten portablen Browser lokal oder verteilt im lokalen Netzwerk angezeigt werden. Auch die Kopie auf einen Web-Server ist möglich. Ferner befindet sich die Datenbank mit sämtlichen Artikeln selbst auf dem Medium, so dass alle verfügbaren Artikel als PDF-Datei direkt auffindbar sind, in eigenen Dokumenten zitiert und als Bibliographie eingefügt werden können. Das Exhibit liegt der gedruckten Version des Berichts nicht bei. Er kann jedoch beim Regionalverband Südlicher Oberrhein eingesehen werden, da dieser über den Datenträger mit dem aufgespielten Exhibit einschließlich der angehängten Literatur und Referenzen verfügt.

7. Bibliographie

- Aasvang, G. M., Engdahl, B. und Rothschild, K. 1981. Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels. *Applied Acoustics* 68, no. 9: 970-981.
- Aasvang, G. M., Moum, T. und Engdahl, B. 2008. Self-reported sleep disturbances due to railway noise: Exposure-response relationships for nighttime equivalent and maximum noise levels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 124, no. 1 (Juli): 257-268.
- Ahrlin, U. 1988. Activity disturbances caused by different environmental noises. *Journal of Sound and Vibration* 127, no. 3 (Dezember 22): 599-603.
- Ahrlin, U. und Rylander, R. 1979. Annoyance caused by different environmental noises. *Journal of Sound and Vibration* 66, no. 3 (Oktober 8): 459-462.
- Ali, S. A. 2005. Railway noise levels, annoyance and countermeasures in Assiut, Egypt. *Applied Acoustics* 66, no. 1 (Dezember): 105-113.
- Andersen, T. V., Kuhl, K. und Relster, E. 1988. Reactions to railway noise in Denmark: A correction. *Journal of Sound and Vibration* 120, no. 2 (Januar).
- Andersen, T. V., Kühl, K. und Relster, E. 1983. Reactions to railway noise in Denmark. *Journal of Sound and Vibration* 87, no. 2 (März): 311-314.
- Babisch, W., Fromme, H., Beyer, A. und Ising, H. 2001. Increased catecholamine levels in urine in subjects exposed to road traffic noise: The role of stress hormones in noise research. *Environment International* 26, no. 7-8: 475-481.
- Babisch, W. 2000. Traffic Noise and Cardiovascular Disease: Epidemiological Review and Synthesis. *Noise & Health* 2, no. 8: 9-32.
- Babisch, W. 2002. The Noise/Stress Concept, Risk Assessment and Research Needs. *Noise & Health* 4, no. 16: 1-11.
- Babisch, W. 2006. Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise & Health* 8, no. 30 (März): 1-29.
- Babisch, W. 2008. Road traffic noise and cardiovascular risk. *Noise & Health* 10, no. 38 (März): 27-33.
- Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N. und Ising, H. 2005. Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 16, no. 1 (Januar): 33-40.
- Babisch, W. und van Kamp, I. 2009. Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. *Noise & Health* 11, no. 44 (September): 161-168.
- Basner, M., Elmenhorst, E., Maaß, H., Müller, U. und Quehl, J. 2009. Vergleichende Untersuchung zu Verkehrslärmwirkungen auf den Schlaf. *Proceedings of the 18th International Conference on Traffic Noise*:
- Basner, M., Elmenhorst, E. M., Maaß, H., Müller, U., Quehl, J., Samel, A. und Vejvoda, M. 2008. Single and combined effects of air, road and rail traffic noise on sleep. *Sleep. Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*: Foxwoods, CT: 463-470.
- Berglund, B., Lindvall, T. und Schwela, D. H. 1999. *Guidelines for Community Noise*. London: Department of the Protection of the Human Environment (PHE). Available from: <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html> [Last accessed on 2009 Aug 6].
- Blankenstijn, P. J., Tulen, J., Boomsma, F., Eck, H. J. R. V., Mulder, P., Schalekamp, M. A. D. H., MAN INT VELD, A. J., Mairacker, A.H.V.D., Derkx, F. H. M. und Lamberts, S. J. 1988. Support for adrenaline-hypertension hypothesis: 18 hour pressor effect after 6 hours adrenaline infusion. *The Lancet* 17: 1386-1389.
- Bonnefond, A., Saremi, M., Rohmer, O., Hoeft, A., Eschenlauer, A., Eschenlauer, R., Muzet, A. und Tassi, P. 2008. Effects of nocturnal railway noise on subjective ratings of sleep and subsequent cognitive performance. *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 12, no. 2 (Juni 2): 130-138.
- Bronzaft, A. L. und McCarthy, D. P. 1975. The effect of elevated train noise on reading ability. *Environment and Behavior* 7, no. 4 (Dezember): 517-527.

- Carter, N. L. 1996. Transportation noise, sleep, and possible after-effects. *Environment International* 22, no. 1: 105-116.
- Chan, T. C., und Lam, K. C. 2008. The effects of information bias and riding frequency on noise annoyance to a new railway extension in Hong Kong. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 13, no. 5 (Juli): 334-339.
- Cohen, S., Evans, G. W., Krantz, D. S. und Stokols, D. 1980. Physiological, motivational, and cognitive effects of aircraft noise on children: moving from the laboratory to the field. *The American Psychologist* 35, no. 3 (März): 231-243.
- De Coensel, B., Botteldooren, D., Berglund, B., Nilson, M. E. und De Muer, T. 2007. Experimental investigation of noise annoyance caused by high-speed trains. *Acta Acustica united with Acustica*, 93, no. 4 (August): 589-601.
- DeJoy, D. M. 1984. The nonauditory effects of noise: review and perspectives for research. *The Journal of Auditory Research* 24, no. 2: 123-150.
- Der Sachverständigenrat für Umweltfragen. 1999. *Sondergutachten "Umwelt und Gesundheit" Risiken richtig einschätzen*. Available from: http://www.umweltrat.de/cln_095/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/1999_SG_UmweltundGesundheit.html [Last accessed on 2010 Jan 7].
- Edeline, J. M. und Weinberger, N. M. 1992. Associative retuning in the thalamic source of input to the amygdala and auditory cortex: receptive field plasticity in the medial division of the medial geniculate body. *Behavioral Neuroscience* 106, no. 1: 81-105.
- Evans, G. W., Lercher, P., Meis, M., Ising, H. und Kofler, W. W. 2001. Community noise exposure and stress in children. *The Journal of the Acoustical Society of America* 109, no. 3 (März): 1023-1027.
- Evans, G. W., Bullinger, M. und Hygge, S. 1998. Chronic Noise Exposure and Physiological Response: A Prospective Study of Children Living under Environmental Stress. *Psychological Science* 9, no. 1: 75-77.
- Fidell, S., Barber, D. S. und Schultz, T. 1991. Updating a dosage--effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 89, no. 1 (Januar 0): 221-233.
- Fields, J. M. 1977. Railway noise annoyance in residential areas: Current findings and suggestions for future research. *Journal of Sound and Vibration* 51, no. 3 (April 8): 343-351.
- Fields, J. M. 1979. Railway noise and vibration annoyance in residential areas. *Journal of Sound and Vibration* 66, no. 3 (Oktober 8): 445-458.
- Fields, J. M. und Walker, J. G. 1982a. Comparing the relationships between noise level and annoyance in different surveys: A railway noise vs. aircraft and road traffic comparison. *Journal of Sound and Vibration* 81, no. 1 (März 8): 51-80.
- Fields, J. M. 1982b. The response to railway noise in residential areas in Great Britain. *Journal of Sound and Vibration* 85, no. 2 (November 22): 177-255.
- Graham, J. M. A., Janssen, S. A., Vos, H. und Miedema, H. M. E. 2009. Habitual traffic noise at home reduces cardiac parasympathetic tone during sleep. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology* 72, no. 2 (Mai): 179-186.
- Green, K. B., Pasternack, B. S. und Shore, R. E. 1982. Effects of aircraft noise on reading ability of school-age children. *Archives of Environmental Health* 37, no. 1: 24-31.
- Griefahn, B. 1985. *Schlafverhalten und Geräusche. Feld- und Laboruntersuchungen über Straßenverkehr, EEG-Analyse, Literaturauswertung*. Stuttgart: Ferdinand Enke.
- Griefahn, B. 1990. Praeventivmedizinische Vorschläge für den naechentlichen Laermenschutz. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37: 7-14.
- Griefahn, B. 1996. *Arbeitsmedizin*. 3. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Griefahn, B. 2000. Noise-induced extraaural effects. *Journal of the Acoustical Society of Japan* 21: 307-317.
- Griefahn, B., Damaschke, J., Künemund, C. und Marks, A. 2004. Laermbedingte Schlafstörungen–Vergleichende Untersuchung dreier Verkehrslärmarten. *Arbeitsphysiologie heute*.

- Griefahn, B. und Di Nisi, J. 1992. Mood and cardiovascular functions during noise, related to sensitivity, type of noise and sound pressure level. *Journal of Sound and Vibration* 155, no. 1: 111-123.
- Griefahn, B. und Marks, A. 2006. The significance of noises emitted by various modes. *EuroNoise. The 6th European Conference on Noise Control*: Tampere, Finnland..
- Griefahn, B., Marks, A. und Basner, M. 2006. Awakenings related to noises from various traffic modes. *Inter-Noise. 35th International Congress on Noise Control Engineering*: Honolulu, Hawaii (USA).
- Griefahn, B., Marks, A., Kuenemund, C. und Basner, M. 2005. Awakenings by road-, rail- and airtraffic noise. *Forum Acusticum*: Budapest, Hungary.
- Griefahn, B., Marks, A. und Robens, S. 2006. Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *Journal of Sound and Vibration* 295, no. 1-2 (August 8): 129-140.
- Griefahn, B., Bröde, P., Marks, A. und Basner, M. 2008. Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep* 31, no. 4 (April 1): 569-577.
- Griefahn, B., Marks, A. und Robens, S. 2008. Experiments on the time frame of temporally limited traffic curfews to prevent noise induced sleep disturbances. *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 12, no. 2 (Juni 2): 140-148.
- Griefahn, B., Schuemer-Kohrs, A., Schuemer, R., Moehler, U. und Mehnert, P. 2000. Physiological, subjective, and behavioural responses during sleep to noise from rail and road traffic. *Noise & Health* 3, no. 9: 59-71.
- Gyr, S. und Grandjean, E. 1984. Industrial noise in residential areas: effects on residents. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 53, no. 3: 219-231.
- Hambrick-Dixon, P. J. 1988. The effect of elevated subway train noise over time on black children's visual vigilance performance. *Journal of Environmental Psychology* 8, no. 4 (Dezember): 299-314.
- Hecht, K. 1993. Schlaf und die Gesundheits-Krankheits-Beziehung unter dem Aspekt des Regulationsbegriffs von Virchow. In *Schlaf, Gesundheit, Leistungsfähigkeit*, 3:3-12. Berlin: Springer.
- Heft, H. 1979. Background and Focal Environmental Conditions of the Home and Attention in Young Children. *Journal of Applied Social Psychology* 9, no. 1: 47-69.
- Heinonen-Guzejev, M., Vuorinen, H. S., Kaprio, J., Heikkilä, K., Mussalo-Rauhamaa, H. und Koskenvuo, M. 2000. Self-report of transportation noise exposure, annoyance and noise sensitivity in relation to noise map information. *Journal of Sound and Vibration* 234, no. 2 (Juli 6): 191-206.
- Henn, V. 1996. Höhere Funktionen des Zentralen Nervensystems. In *Lehrbuch der Physiologie*, 691-708. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Henry, J. 1992. Biological basis of the stress response. *Integrative Psychological and Behavioral Science* 27, no. 1: 66-83.
- Henry, J. P. und Stephens, P. M. 1977. *Stress, health and social environment*. Berlin: Springer.
- Howarth, H. V. und Griffin, M. J. 1990. Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects. *Journal of Sound and Vibration* 143, no. 3: 443-454.
- Howarth, H. V. und Griffin, M. J. 1990. The relative importance of noise and vibration from railways. *Applied Ergonomics* 21, no. 2 (Juni): 129-134.
- Hygge, S. 1992. Vergleichende Untersuchungen über die Wirkungen von Flug-, Straßenverkehrs- und Schienenlärm auf das Langzeitgedächtnis und das Erinnern von Texten bei 12-14 jährigen Schuelern. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden-, und Lufthygiene* 88: 416-27.
- Hygge, S., Evans, G. W. und Bullinger, M. 2002. A Prospective Study of Some Effects of Aircraft Noise on Cognitive Performance in Schoolchildren. *Psychological Science* 13, no. 5: 469-474.
- Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt. 1985. Die Beeinträchtigung der Kommunikation durch Lärm. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 32: 95-99.
- Ising, H. und Kruppa, B. 2001. Zum gegenwaertigen Erkenntnisstand der Lärmwirkungsforschung: Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels. *UMWELTMEDIZIN IN FORSCHUNG UND PRAXIS* 6, no. 4: 181-189.

- Ising, H., Kruppa, B., Babisch, W., Gottlob, D., Guski, R., Maschke, C. und Spreng, M. 2001. Kapitel VII-1 Lärm. In *Handbuch der Umweltmedizin*, 7:1-41. Landsberg/Lech: Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co.KG.
- Ising, H. und Maschke, C. 1997. *Beeinträchtigung der Gesundheit durch Verkehrslärm*. Berlin: Bundesministerium für Gesundheit.
- Ising, H., Rebentisch, E., Babisch, W., Curio, I., Sharp, D. und Baumgärtner, H. 1990. Medically relevant effects of noise from military low-altitude flights - results of an interdisciplinary pilot study. *Environment International* 16: 411-423.
- Izumi, K. 1988. Annoyance due to mixed source noises-- A laboratory study and field survey on the annoyance of road traffic and railroad noise. *Journal of Sound and Vibration* 127, no. 3 (Dezember 22): 485-489.
- Izumiyama, M. 1964. Studies on influences of train noise upon schoolchildren: II. On speech articulation. *Tohoku Psychologica Folia* 23, no. 1: 3-7.
- Jansen, G., Linnemeier, A. und Nitzsche, M. 1995. Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 42, no. 4: 91-106.
- Jansen, G. und Notbohm, G. 1994. Andere Umweltfaktoren, Kapitel VII-1, Lärm. In *Handbuch der Umweltmedizin*. Landsberg/Lech: Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG.
- Joncour, S., d. Cailhau, P. E., Gautier, P., Champelovier, P. und Lambert, J. 2000. Annoyance due to combined noise Sources. *InterNoise. The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*: Nice, France.
- Kaku, J., Hiroe, M., Kuwano, S. und Namba, S. 2004. Sleep disturbance by traffic noise: an experimental study in subjects' own houses using a portable CD player. *Journal of Sound and Vibration* 277, no. 3 (Oktober 22): 459-464.
- Kim, J., Lim, C., Hong, J., Jung, W. und Lee, S. 2007. The influence of binaural effects on annoyance for transportation noise. *Noise control engineering journal* 55, no. 2 (April): 204-216.
- Klæboe, R., Turunen-Rise, I. H., Hårvik, L. und Madshus, C. 2003. Vibration in dwellings from road and rail traffic -- Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics* 64, no. 1 (Januar): 89-109.
- Klatte, M., Kilcher, H. und Hellbrück, J. 1995. Wirkungen der zeitlichen Struktur von Hintergrundschaall auf das Arbeitsgedächtnis und ihre theoretischen und praktischen Implikationen. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie* 42, no. 4: 517-544.
- Klatte, M., Meis, M., Sukowski, H. und Schick, A. 2007. Effects of irrelevant speech and traffic noise on speech perception and cognitive performance in elementary school children. *Noise & Health* 9, no. 36 (September): 64-74.
- Klinke, R. 2000. Hören und Sprechen: Kommunikation des Menschen. In *Lehrbuch der Physiologie*, 1-800. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Knall, V. und Schuemer, R. 1983. The differing annoyance levels of rail and road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* 87, no. 2 (März 22): 321-326.
- Köckemann, R. 2002. Extraaurale Wirkungen von appliziertem Schall. Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf.
- Kuhnt, S., Schürmann, C., Klatte, M., Wenning, E., Griefahn, B., Vormann, M. und Hellbrück. 2008. Modelling Annoyance from Combined Traffic Noises: An Experimental Study. *Acta Acustica united with Acustica*, 94, no. 3 (Mai): 393-400.
- Kurra, S., Morimoto, M. und Maekawa, Z. I. 1999a. Transportation noise annoyance--A simulated-environment study for road, railway and aircraft noises, part I: Overall annoyance. *Journal of Sound and Vibration* 220, no. 2 (Februar 18): 251-278.
- Kurra, S., Morimoto, M. und Maekawa, Z. I. 1999b. Transportation noise annoyance--A simulated-environment study for road, railway and aircraft noises, part II: Activity disturbance and combined results. *Journal of Sound and Vibration* 220, no. 2 (Februar 18): 279-295.
- Kuwano, S., Namba, S. und Okamoto, T. 2004. Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration* 277, no. 3 (Oktober 22): 491-500.

- Lam, K. C., Chan, P. K., Chan, T. C., Au, W. H. und Hui, W. C. 2009. Annoyance response to mixed transportation noise in Hong Kong. *Applied Acoustics* 70, no. 1 (Januar): 1-10.
- Lam, K. C. und Au, W. H. 2008. Human Response to a Step Change in Noise Exposure Following the Opening of a New Railway Extension in Hong Kong. *Acta Acustica united with Acustica*, 94, no. 4 (Juli): 553-562.
- Lambert, J., Champelovier, P. und Vernet, I. 1993. Annoyance from high speed train noise: An exploratory field study. *Noise & Man. Noise as a Public Health Problem. Proceedings of the 6th International Congress: Nice, France*.
- Lambert, J., Champelovier, P. und Vernet, I. 1996. Annoyance from high speed train noise: A social survey. *Journal of Sound and Vibration* 193, no. 1 (Mai 30): 21-28.
- Lambert, J., Champelovier, P. und Vernet, I. 1998. Assessing the railway bonus: the need to examine the "new infrastructure" effect. *InterNoise 1998: Christchurch, New Zealand*.
- Lercher, P., Evans, G. W., Meis, M. und Kofler, W. W. 2002. Ambient neighbourhood noise and children's mental health. *Occupational and Environmental Medicine* 59, no. 6 (Juni): 380-386.
- Lercher, P., Evans, G. W. und Meis, M. 2003. Ambient Noise and Cognitive Processes among Primary Schoolchildren. *Environment and Behavior* 35, no. 6 (November 1): 725-735.
- Leue, E., Schütte, M. und Griefahn, B. 2004. Acute annoyance caused by noise emitted from rail and road traffic. *Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA: Strasbourg, France*.
- Liepert, M., Moehler, U., Schuemer, R. und Griefahn, B. 1999. An interdisciplinary study on railway and road traffic noise: Acoustical results. *Forum 1999 – ASA*.
- Liepert, P., Moehler, U., Schreckenberger, D., Schuemer, R. und Fastl, H. 2005. Lästigkeit von Schienen- und Straßenverkehrslärm bei hohen Vorbeifahrhäufigkeiten. Ergebnisse einer Feld- und Laborstudie. *DAGA 2005: München, Deutschland*.
- Lim, C., Kim, J., Hong, J. und Lee, S. 2006. The relationship between railway noise and community annoyance in Korea. *The Journal of the Acoustical Society of America* 120, no. 4 (Oktober): 2037-2042.
- Lindvall, T. und Radford, E. P. 1973. Measurement of annoyance due to exposure to environmental factors: The fourth Karolinska institute symposium on environmental health. *Environmental Research* 6, no. 1: 1-36.
- Majewski, H., Rand, M. J. und Tung, L. H. 1981. Activation of prejunctional beta-adrenoceptors in rat atria by adrenaline applied exogenously or released as a co-transmitter. *British Journal of Pharmacology* 73, no. 3 (Juli): 669-679.
- Marks, A. und Griefahn, B. 2004. Sleep disturbances caused by transportation noise: alterations on the polysomnogram. *Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA 2004: Strasbourg, France*.
- Marks, A. und Griefahn, B. 2007a. Internetbefragung zur Exposition und Lästigkeit von Verkehrslärm unter der Berücksichtigung von Lärmempfindlichkeit. In *Kompetenzentwicklung in realen und virtuellen Arbeitssystemen: Bericht zum 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, 745-748. Dortmund: GfA-Press.
- Marks, A. und Griefahn, B. 2007b. Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise. *Noise & Health* 9 (August 5): 1-7.
- Marks, A., Griefahn, B. und Basner, M. 2007. Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise. *Noise control engineering journal* 56, no. 1 (Februar): 52-62.
- Marks, A., Griefahn, B., Kuenemund, C. und Basner, M. 2007. Nächtliches Aufwachen durch Straßen- und Schienenverkehrslärm. In: *Wie lange können wir gesund arbeiten? - Wiss. Antworten der Arbeitsmedizin: Dokumentation Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V., 47. Wissenschaftliche Jahrestagung, 21.-24. März 2007 in Mainz*, 122-125. Lübeck: DGAUM.
- Marks, A. und Griefahn, B. 2005. Railway noise-its effects on sleep, mood, subjective sleep quality, and performance. *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 9, no. 2 (Juni 1): 68-75.
- Maruyama, K. 1964a. Studies on influences of train noise upon schoolchildren: III. Changes of voice and GSR. *Tohoku Psychologica Folia* 23, no. 1: 8-12.

- Maruyama, K. 1964b. Studies on influences of train noise upon school children: VI: GSR during mental calculations. *Tohoku Psychologica Folia* 23, no. 1: 20-25.
- Maschke, C., Druba, M. und Pleines, F. 1997. *Kriterien für schädliche Umwelteinwirkungen: Beeinträchtigung des Schlafes durch Lärm - eine Literaturübersicht, Forschungsbericht 97*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Maschke, C. und Hecht, K. 2001. Laermexposition und Gesundheit bei Kindern und Jugendlichen. *Grundlagen und Forschungsergebnisse*.
- Maschke, C. und Pleines, F. 1996. *Nachtfluglärmwirkungen und ihr Einfluss auf die Gesundheit*. Düsseldorf: DAL Informationszentrum.
- Meyer-Baron, M. 2000. Einflussfaktoren auf Gestörtheitsurteile bei Schienenverkehrslärm. In *Komplexe Arbeitssysteme - Herausforderung für Analyse und Gestaltung: Bericht zum 46. Arbeitswissenschaftlichen Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 15.-18. März 2000*, 629-631. Dortmund: GfA-Press.
- Miedema, H. M. E. und Vos, H. 2007. Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies. *Behavioral Sleep Medicine* 5, no. 1: 1-20.
- Miedema, H. M. und Vos, H. 1998. Exposure-response relationships for transportation noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 104, no. 6 (Dezember): 3432-3445.
- Miedema, H. M. E. und van den Berg, R. 1988. Community response to tramway noise. *Journal of Sound and Vibration* 120, no. 2 (Januar 22): 341-346.
- Miedema, H. M. E. und Vos, H. 1999. Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105, no. 6 (Juni 0): 3336-3344.
- Moehler, U. 1985. Lästigkeitsunterschied zwischen Schienen- und Straßenverkehrslärm innerhalb und außerhalb von Wohnungen. *DAGA. Fortschritte der Akustik*: Stuttgart, Deutschland.
- Moehler, U. 1986. Vergleich der Laestigkeit Von Schienen- Und Straßenverkehrslärm. (Comparison of the Annoyance Due to Railway and Road Traffic Noise). *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 33: 132-142.
- Moehler, U. 1987. Zum Einfluss der Fensterstellung auf die Laestigkeitswirkung von Verkehrslaerm. *DAGA. Fortschritte der Akustik*: Aachen, Deutschland.
- Moehler, U. und Knall, V. 1983. Correlation of Acoustic Indices and Disturbance Reaction Factors on Railway and Road Traffic Noise. *InterNoise '83*.
- Moehler, U. und Liepert, M. 2006. *Differences in the annoyance between rail and road traffic noise in relation to the acoustic situation*. Available from: <http://www.mopa.de/Seiten/mopa12.html> [Last accessed on 2009 Sep 18].
- Moehler, U., Liepert, M., Schuemer, R. und Griefahn, B. 2000. Differences between railway and road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* 231, no. 3 (März 30): 853-864. doi:10.1006/jsvi.1999.2569.
- Moehler, U., Liepert, M., Schuemer, R., Schuemer-Kohrs, A., Schreckenberger, D., Mehnert, P. und Griefahn, B. 2000. Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Strassen- und Schienenverkehr. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 8.
- Möhler, U. und Schuemer, R. 1997. Anmerkungen zur Aussagesicherheit des Schienenverkehrs. In , 224-225. Kiel.
- Morihara, T., Sato, T. und Yano, T. 2004. Comparison of dose-response relationships between railway and road traffic noises: the moderating effect of distance. *Journal of Sound and Vibration* 277, no. 3 (Oktober 22): 559-565.
- Nagatsuka, Y. 1964. Studies on influences of train noise upon school children: V. On the mental works. *Tohoku Psychologica Folia* 23, no. 1: 16-19.
- Namba, S., Hashimoto, T. und Rice, C. G. 1987. The loudness of decaying impulsive sounds. *Journal of Sound and Vibration* 116, no. 3: 491-507.
- Niemann, H., Bonnefoy, X., Braubach, M., Hecht, K., Maschke, C. und Rodrigues, C. 2006. Noise-induced annoyance and morbidity results from the pan-European LARES study. *Noise & Health* 8, no. 31 (Juni): 63-79.

- Di Nisi, J. und Muzet, A. 1989. Cardiovascular response to noise in type A and type B female subjects: Effect of the ovarian cycle. *Journal of Sound and Vibration* 134, no. 2 (Oktober 22): 235-245.
- Di Nisi, J., Muzet, A. und Weber, L. D. 1987. Cardiovascular responses to noise: Effects of self-estimated sensitivity to noise, sex, and time of the day. *Journal of Sound and Vibration* 114, no. 2 (April 22): 271-279.
- Ohkubo, Y. 1964. Studies on influences of train noise upon school-children: IV. On the orienting responses. *Tohoku Psychologica Folia* 23, no. 1: 13-15.
- Öhrström, E. 1997a. Community reactions to railway traffic - effects of countermeasures against noise and vibration. *InterNoise '97*: Budapest, Hungary.
- Öhrström, E. 1997b. Effects of exposure to railway noise--A comparison between areas with and without vibration. *Journal of Sound and Vibration* 205, no. 4 (August 28): 555-560.
- Öhrström, E., Andersson, E., Skanberg, A. und Barregard, L. 2007. Relationships between annoyance and exposure to single and combined noise from railway and road traffic. *InterNoise '07*: Istanbul, Turkey.
- Öhrström, E., Björkman, M. und Rylander, R. 1980. Laboratory annoyance and different traffic noise sources. *Journal of Sound and Vibration* 70, no. 3 (Juni 8): 333-341.
- Öhrström, E., Gunnarsson, A. G. und Ögren, M. 2007. Listening experiments on effects of road traffic and railway traffic noise occurring separately and in combination. *InterNoise '07*: Istanbul, Turkey.
- Öhrström, E., Ögren, M., Jerson, T. und Gidlöf-Gunnarsson, A. 2008. Experimental studies on sleep disturbances due to railway and road traffic noise. *Sleep. International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*: Foxwoods, CT.
- Öhrström, E., Skanberg, A. B., Barregard, L., Svensson, H. und Ängerheim, P. 2005. Effects of simultaneous exposure to noise from road- and railway traffic. *InterNoise '05*: Rio de Janeiro, Brasil.
- Öhrström, E. und Skånberg, A. B. 1996. A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: Annoyance and activity disturbance. *Journal of Sound and Vibration* 193, no. 1 (Mai 30): 39-47.
- Öhrstrom, E., Barregard, L., Andersson, E., Skanberg, A. B., Svensson, H. und Angerheim, P. 2007. Annoyance due to single and combined sound exposure from railway and road traffic. *The Journal of the Acoustical Society of America* 122, no. 5 (November 0): 2642-2652.
- Ollerhead, J. B. 1976. Variation of community noise sensitivity with time of day. *The Journal of the Acoustical Society of America* 60: 83.
- Paulsen, R. und Kastka, J. 1995. Effects of combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration* 181, no. 2 (März 23): 295-314.
- Planungsbüro Obermeyer. 1983. Interdisziplinaere Feldstudie II Über Die Besonderheiten des Schienenverkehrs gegenueber dem Straßenverkehrs-laerm, Kurzfassung, Band I, Band II.
- Pörschmann, C. 2005. Tonaudiometer Praktikum zur Vorlesung "Technische Akustik" Fachhochschule Köln. Köln.
- Quehl, J. und Basner, M. 2008. Naechtlicher Flug-, Straßen- und Schienenverkehrs-laerm: Belaestigungsunterschiede und kumulative Wirkungen. *Lärmbekämpfung* 3, no. 6: 240-246.
- Radon, K., Spegel, H., Ehrenstein, V., Hackensperger, S., Kreuzmair, I., Meyer, N. und von Kries, R. 2007. Erfassung der täglichen Lärmexposition und die Korrelation zum individuellen Gesundheitsstatus. LEE-Lärm: Exposition und Befinden. In *Gesundheit und Umwelt-Materialien zur Umweltmedizin*. Bd. 19. Erlangen: Bayrisches landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit.
- Rechtschaffen, A. und Kales, A. 1968. *A manual of standarized terminology, techniques and scoring system for sleep stages in human subjects*. Washington, D.C.: Puplic Health Service, US Government Printing Office.
- Rothe, M. 2006. Grundlagen des Lärmschutzes - Akustische Grundbegriffe. In *Umweltatlas*.
- Rylander, R., Björkman, M., Ahrlin, U. und Sörensen, S. 1977. Tramway noise in city traffic. *Journal of Sound and Vibration* 51, no. 3 (April 8): 353-358.

- Sandrock, S., Griefahn, B., Kaczmarek, T., Hafke, H., Preis, A. und Gjestland, T. 2008. Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses. *Journal of Sound and Vibration* 313, no. 3-5 (Juni 17): 908-919.
- Saremi, M., Greneche, J., Bonnefond, A., Rohmer, O., Eschenlauer, A. und Tassi, P. 2008. Effects of nocturnal railway noise on sleep fragmentation in young and middle-aged subjects as a function of type of train and sound level. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PSYCHOPHYSIOLOGY* 70, no. 3 (Dezember): 184-191.
- Schapkin, S.A. und Griefahn, B. 2004. Sleep disturbance by traffic noise: after-effects on brain activity. *The joint congress of CFA/DAGA '04*: Strasbourg, France.
- Schapkin, S. A., Falkenstein, M., Marks, A. und Griefahn, B. 2006. After effects of noise-induced sleep disturbances on inhibitory functions. *Life Sciences* 78, no. 10 (Februar 2): 1135-1142.
- Schneider, B. und Bigenzahn, W. 2007. *Stimm Diagnostik - Ein Leitfaden für die Praxis*. Wien, New York: Springer.
- Schrekenberg, D. und Guski, R. 2005. Laermbelaestigung durch Straßen-und Schienenverkehr zu unterschiedlichen Tageszeiten. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 10, no. 2: 67-76.
- Schrekenberg, D., Schuemer, R., Schuemer-Kohrs, A., Moehler, U. und Liepert, M. 2001. Fensterstellung und Laermbelaestigung bei Schienen-und Straßenverkehrslaerm. *Fortschritte der Akustik-DAGA 2001*: 236-237.
- Schrekenberg, D., Schuemer-Kohrs, A., Schuemer, R., Griefahn, B. und Moehler, U. 1999. An interdisciplinary study on railway and road traffic noise: Annoyance differences. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105, no. 2.
- Schuemer, R., Schrekenberg, D. und Felscher-Suhr, U. 2003. *Wirkungen von Schienen-und Straßenverkehrslaerm*. Bochum: Zeus GmbH.
- Schuemer-Kohrs, A., Schuemer, R., Schrekenberg, D., Griefahn, B. und Moehler, U. 1998. Annoyance due to railway and road traffic noise: first results of an interdisciplinary study. *Noise Effects. 7th International Congress in Noise as a Public Health Problem*: Sydney, Australia.
- Schultz, T. J. 1978. Synthesis of social surveys on noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America* 64, no. 2 (August): 377-405.
- Schulze, J. und Hauswald, T. 2005. Neurartige und weiterentwickelte Bahnsysteme II. Übung: Schallemission und -immission. Berlin.
- Schuschke, G. und Maschke, C. 2002. Laerm als Umweltfaktor. In *Lehrbuch der Umweltmedizin*, 251-273. Stuttgart: Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.
- Schütte, M., Wenning, E. und Griefahn, B. 2006. Wirkung kombinierten Verkehrslärms auf Leistung, Lästigkeit und wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit. In *Bericht zum 52. Kongress der GfA. Innovationen für Arbeit und Organisation*, 585-590. Dortmund: GfA-Press.
- Seefeld, D. 1989. *Streß*. Leipzig, Jena, Berlin: Urania Verlag.
- Seller, H. 1996. Neurovegetative Regulation. In *Lehrbuch der Physiologie*, 675-690. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Seyle, H. 1964. The stress of life-new focal point for understanding accidents. *Industrial Medicine & Surgery* 33: 621-625.
- Sörensen, S. und Hammar, N. 1983. Annoyance reactions due to railway noise. *Journal of Sound and Vibration* 87, no. 2 (März 22): 315-319.
- Spreng, M. 1997. Kritische Betrachtung des Schienenbonus anhand hörphysiologischer/medizinischer Fakten. gehalten auf der Fachseminar Schienenlärm des Instituts für ökologische Strategien, Frankfurt.
- Spreng, M. 2000. Central nervous system activation by noise. *Noise and Health* 2: 49-58.
- Spreng, M. 2002. Cortical excitations, cortisol excretion and estimation of tolerable nightly over-flights. *Noise & Health* 4, no. 16: 39-46.
- Spreng, M., Firsching, P. und Bundesanstalt für Arbeitsschutz. 1991. *Gehörschäden durch Impulsgeräusche*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Fb 630. Dortmund, Bremerhaven.

- Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Öhrström, E., Haines, M. M. u. a. 2005. Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet* 365, no. 9475: 1942-1949.
- Stansfeld, S. A. und Matheson, M. P. 2003. Noise pollution: non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin* 68: 243-257.
- Tamura, A. 1994. Comparison of community response to outdoor noise in the areas along shinkansen und ordinary railroad. *InterNoise '94*: Yokohama, Japan.
- Trepel, M. 2003. *Neuroanatomie - Strukturen und Funktion*. 3. Aufl. Urban & Fischer.
- Vernet, M. 1979. Effect of train noise on sleep for people living in houses bordering the railway line. *Journal of Sound and Vibration* 66, no. 3 (Oktober 8): 483-492.
- Vernet, M. 1983. Comparison between train noise and road noise annoyance during sleep. *Journal of Sound and Vibration* 87, no. 2 (März 22): 331-335.
- Voigt, K. 1996. Endokrines System. In *Lehrbuch der Physiologie*, 435-484. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Vos, J. 2004. Annoyance caused by the sounds of a magnetic levitation train. *The Journal of the Acoustical Society of America* 115, no. 4 (April 0): 1597-1608.
- Walker, J. G. und Chan, M. F. K. 1996. Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations. *Journal of Sound and Vibration* 193, no. 1 (Mai 30): 49-63.
- Ward, W. D. 1963. Auditory fatigue and masking. *Modern developments in audiology*: 240-286.
- Widmann, U. Simulation von Hörempfindungen in einem digitalen Meßsystem zur Bestimmung von Qualitätsmerkmalen. *Forum Akustische Qualitätssicherung*: 1-9.
- Windelberg, D. 2004. Aufweck-Pegel und Lärmpausen bei Schienen-und Fluglärm. *Immissionsschutz Zeitschrift für Luftreinhaltung, Lärmschutz, Anlagensicherheit, Abfallverwertung und Energienutzung* 3: 114-124.
- Windelberg, D. 2002. *Mittelwertbildung bei Lärmmessungen*. AG Qualität, Institut für Mathematik, Universität Hannover.
- Yano, T. 1998. Comparison of responses to road traffic and railway noise. In *Noise Effects*, 2:582-585.
- Yano, T. und Kobayashi, A. 1990. Disturbance caused by various fluctuating single noises and combined community noises. *Environment International* 16, no. 4-6: 567-574.
- Yano, T., Morihara, T. und Tetsumi, S. 2005. Community response to Shinkansen noise and vibration: a survey in areas along Sanyo Shinkansen Line. *Forum Acusticum '05*: Budapest, Hungary.
- Yano, T., Murakami, Y., Kawai, K. und Sato, T. 1998. Comparison of responses to road traffic and railway noises. *Noise Effects. Noise as a Public Health Problem*: Sydney, Australia.
- Yano, T., Sato, T. und Morihara, T. 2007. Dose-response relationships for road traffic, railway and aircraft noise in Kyushu and Hokkaido, Japan. *InterNoise '07*: Istanbul, Turkey.
- Yoshida, T. und Nakamura, S. 1988. Subjective ratings of health status and railway noise. *Journal of Sound and Vibration* 127, no. 3 (Dezember 22): 593-598.