

Gesundheitliche Auswirkungen von Bahnlärm

- Aktueller Stand in der wissenschaftlichen Literatur -

Ministerium für Umwelt,
Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau
und Forsten des Landes Rheinland-
Pfalz

und

Landesuntersuchungsamt
Rheinland-Pfalz



Hessisches Ministerium für
Soziales und Integration

und

Hessisches Landesprüfungs- und
Untersuchungsamt im
Gesundheitswesen



Ministerium für Klimaschutz,
Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen



Herausgeber:

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten des Landes
Rheinland-Pfalz

Hessisches Ministerium für Soziales und Integration

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des
Landes Nordrhein-Westfalen

Stand: Dezember 2014

Autorinnen und Autoren des Berichts:

Jan Henrik Schlattjan¹, Georg Eberwein², Ralf Nehring³, Irene Scheler⁴, Jutta Witten⁵

¹ Hessisches Landesprüfungs- und Untersuchungsamt im Gesundheitswesen

² Landesuntersuchungsamt Rheinland-Pfalz

³ Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten des Landes
Rheinland-Pfalz

⁴ Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des
Landes Nordrhein-Westfalen

⁵ Hessisches Ministerium für Soziales und Integration

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass	4
2	Einleitung und Methode der Literaturoauswahl	4
	2.1 Einleitung	4
	2.2 Methode der Literaturoauswahl	6
3	Ergebnis der Literaturoauswertung	8
	3.1 Akute physiologische Reaktionen auf Nachtlärm	8
	3.1.1 Motilität	12
	3.1.2 Schlafstruktur	13
	3.1.3 Stresshormone	22
	3.1.4 Review-Arbeiten zu akuten physiologischen Reaktionen	25
	3.2 Auswirkungen auf Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kommunikation	28
	3.3 Neuere mechanistische Studien zur Lärmwirkung allgemein (nicht speziell zu Bahnlärm)	35
	3.3.1 Einfluss des Alltagslärms auf die Herzfrequenzvariabilität	35
	3.3.2 Fluglärm und endotheliale Dysfunktion	37
	3.4 Langfristige Effekte	41
	3.4.1 Herzkreislauferkrankungen	41
	3.4.2 Originalarbeiten	43
	3.4.2.1 Endpunkt Herz-Kreislauferkrankungen	43
	3.4.2.2 weitere Endpunkte	51
	3.4.3 Übersichtsarbeiten	52
	3.4.4 Risikogruppen	55
	3.5 Wirkungen von Erschütterungen und Infraschall	57
	3.5.1 Einleitung	57
	3.5.2 Originalarbeiten zu Erschütterung und Infraschall	60
	3.5.3 Übersichtsarbeiten zu Erschütterung und Infraschall	67
4	Fazit	74
5	Glossar	79
6	Literaturverzeichnis	80

1 Anlass

Grundlage ist ein gemeinsam von den Ländern Rheinland-Pfalz und Hessen formuliertes Anliegen vom Mai 2012, anhand veröffentlichter Studien zu Gesundheitswirkungen in Folge von Bahnlärmbelastung (einschließlich Erschütterungen) zu prüfen, ob die vorhandenen Daten ausreichen, um von gesundheitlicher Seite aus eine Risikobeurteilung vornehmen zu können, die Grundlage für gesetzliche Regelungen sein kann.

Das Umweltministerium Nordrhein-Westfalen hat sich diesem Vorhaben angeschlossen.

Zu diesem Zweck wird eine Literaturrecherche zur wissenschaftlichen Datenlage durchgeführt. Das Ergebnis soll auch zeigen, ob und auf welchen möglichen Effektfeldern weiterer Forschungsbedarf besteht.

Das Projekt einschließlich des Sachstandsberichts wurde in Zusammenarbeit der Fachreferate für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz bzw. für Umweltmedizin der beteiligten Länder erstellt. Die Projektergebnisse sollen neben den beteiligten Ländern sowohl der Arbeitsgruppe Schienenlärm-Mittelrheintal der Länder Rheinland-Pfalz und Hessen, wie auch externen Fachexperten und der interessierten Öffentlichkeit zur Kenntnis und zur Diskussion gebracht werden.

2 Einleitung und Methode der Literaturlauswahl

2.1 Einleitung

Bahnlärm stellt neben Straßen- und Flugverkehrslärm eine wichtige Lärmquelle dar, die bei Anwohnern von Schienenwegen zu Lärmbelastungen in unterschiedlicher Höhe und Ausprägung führt. Zusätzlich können die betroffenen Anwohner durch erhebliche Erschütterungen (Vibrationen) belastet werden. Bahnlärm entsteht beim Betrieb von Zügen jeglicher Art einschließlich der jeweils zugehörigen Waggonen auf Schienenwegen oder -trassen. Dazu gehören auch die durch Rangierarbeiten und im Bahnhofsbetrieb entstehenden Lärmkulissen. Die Emissionen stammen im Wesentlichen aus Zugvorbeifahrten, Brems- und Beschleunigungsvorgängen sowie Roll- und Windgeräuschen und sind unterschiedlich je nach Zugart, Motoren der Zugmaschinen, Stromabnehmer, Fahrwerken von Waggonen und Zugmaschinen, Schienenzustand oder Rad-Schiene-System. Bei den Zugarten ist zwischen Personen- und Güterzügen sowie Hochgeschwindigkeitszügen zu differenzieren, wobei schon durch die unterschiedlichen Zuglängen und die aerodynamischen Gegebenheiten verschiedene Geräuschkomponenten resultieren.

Bei Vibrationsereignissen handelt es sich um Einwirkungen infolge mechanischer Schwingungen auf Gebäude, den Baugrund und den menschlichen Körper. Die von Erschütterungen ausgelösten Schwingungen und damit verbundenen Resonanzen von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen können darüber hinaus zum Auftreten von sekundärem niederfrequentem Schall in den Gebäuden führen.

Die Expositionssituation des Menschen gegenüber Bahnlärm hat sich in den vergangenen Jahren deutlich verschlechtert. Vor dem Hintergrund eines prognostizierten steigenden Verkehrsaufkommens auf der Schiene ist zudem davon auszugehen, dass die Bedeutung des Bahnlärms als Umweltnoxe weiter zunehmen wird. So ist durch Ausbau und Neubau von Schienentrassen insbesondere das Aufkommen des Güterzugverkehrs bereits jetzt erheblich angestiegen. Hinzukommt, dass im Güterverkehr, z.B. im Hinblick auf lärmärmere Bremsysteme und Fahrwerke bei der europäischen Güterwaggonflotte, ein noch großer Modernisierungsrückstand besteht. Gerade ein höheres Güterverkehrsaufkommen - speziell in den Abend- und Nachtstunden - ist oftmals ein Beschwerdeanlass von Anwohnern von Schienennetzen. In diesem Zusammenhang wird beispielhaft auf die beidseitigen Schienennetze im engen Mittelrheintal verwiesen, die vom Güterverkehr in den Nachtstunden intensiv genutzt werden (europäische Nord-Süd-Magistrale).

Untersuchungen durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie zur Lärmbelastungssituation durch den Bahnverkehr im Mittelrheintal an der Messstation Rüdeshheim-Assmannshausen (Hessen) für das Jahr 2012 zeigen äquivalente Dauerschallpegel (LA_{eq}) über die Nacht und über den Tag (gemittelte Schallpegel von 22:00 bis 06:00 Uhr bzw. 06:00 bis 22:00 Uhr) im Bereich von etwa 75 - 80 dB(A) an der Außenseite der schienennahen Wohnhäuser. Die Anzahl der Züge lag im Allgemeinen für die Nachtzeit bei 60 bis hin zu 90 Zügen und tagsüber oftmals sogar oberhalb von 100 Zugdurchfahrten. Die gemessenen maximalen Schalldruckpegel vorbeifahrender Züge (L_{max}) unterscheiden sich für den Tag- und Nachtzeitraum kaum voneinander, wobei Spitzenwerte in Höhe von 100 dB(A) und mehr im Außenbereich der Wohnhäuser gemessen wurden. Daraus lässt sich abschätzen, dass selbst bei geschlossenen Fenstern zeitweilig über 70 dB(A) in Innenräumen auftreten können. Ungeachtet dessen werden die Bewohner durch parallel einwirkende Gebäudevibrationen zusätzlich belastet.

Aus gesundheitlicher Sicht ist zwischen auralen und extra-auralen Wirkungen des Lärms zu unterscheiden. Für die Allgemeinbevölkerung ist davon auszugehen, dass nicht nur bei Flug- und Straßenlärm sondern auch bei Bahnlärm Schäden am Hörorgan (aurale Wirkungen)

aufgrund der auftretenden Schallpegel in aller Regel nicht zu erwarten sind. Anders verhält es sich mit den extra-auralen Wirkungen des Lärms. Diese Auswirkungen stehen für die Allgemeinbevölkerung im Vordergrund. Unbestritten ist, dass durch Lärmeinwirkungen von Straßen- und Flugverkehr verschiedene Gesundheitsbeeinträchtigungen ausgehen können, die in Schlafstörungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, wie z.B. Bluthochdruck und Herzinfarkt, und erheblichen Lärmbelastigungen resultieren. Wesentlich ist dabei, ob eine kurzfristige Lärmeinwirkung oder ein langfristiges Geschehen vorliegt. Während kurzfristige Lärmeinwirkungen vom menschlichen Körper im Allgemeinen ohne weiteres verarbeitet werden, kann eine langfristige Lärmbelastung mangels ausreichender Erholungszeit des Körpers (Lärmpausen) mit gesundheitlichen Folgen verbunden sein. Als ein allgemein anerkanntes Gesundheitsrisiko wird dabei vor allem die Störung des Schlafes durch andauernde Schallereignisse gewertet, die zu einer zusätzlichen Anzahl von Aufwachreaktionen und zu einer Störung der Schlafarchitektur führen.

Darüber hinaus liegen wissenschaftliche Studien zur Belästigungswirkung durch Bahnlärm vor. Erwähnt sei hier, dass im Vergleich zu Reisezügen eine Lärmbelastung durch Güterzüge als stärker empfunden wird. Studienergebnisse zeigen zudem, dass sich Anwohner von Bahnstrecken zusätzlich durch Erschütterungen belästigt fühlen, wobei gleichzeitig auftretende Lärm- und Erschütterungs- / Vibrationsbelastungen deutlich stärkere Belästigungsempfindungen auslösen.

2.2 Methode der Literatursauswahl

Der nachfolgende Sachstandsbericht ist die Ergebnisdarstellung einer Literatursauswertung über gesundheitliche Wirkungen von Bahnlärmbelastungen allgemein und Bahnlärmbelastungen einschließlich Erschütterungen / Vibrationen in Wohngebäuden. Wissenschaftliche Studien zur Belästigungswirkung durch Bahnverkehr werden in der Literatursauswertung nur in Zusammenhang mit Vibrationsbelastungen berücksichtigt.

Die Auswertung der Literatur kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Anhand der Erkenntnisse über Lärmwirkungen im Allgemeinen wurden in der vorliegenden Ausarbeitung folgende gesundheitliche Effekte und Effektmarker berücksichtigt:

a) akute Effekte und Effektmarker:

- vermehrte Aufwachreaktionen während des Schlafes
- vermehrte Motilität bzw. Bewegung im Schlaf
- Gefäßwiderstand
- Finger-Puls-Amplitude
- Änderung der Herzschlagfrequenz
- Blutdruck
- Stresshormone
- Auswirkungen auf Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kommunikation

b) langfristige Effekte:

- arterieller Bluthochdruck (Hypertonus)
- Arteriosklerose
- vaskuläre Effekte wie z.B. Herzinfarkt, Schlaganfall (Apoplex)

c) Wirkungen von Erschütterungen und niederfrequentem Schall

Mögliche weitere Lärmbelastungsfolgen, wie z.B. Medikamentenverordnungen und Medikamentenverbrauch sowie die Bestimmung von Risikogruppen (u.a. Kinder, Ältere, Vorgeschiedigte) und die Berücksichtigung des Geschlechts sind bei den Auswertungen der Literatur sowohl bei kurz- wie auch bei langfristigen Effekten mit eingeflossen. In der Literatur wurde neben Übersichtsartikeln und Metastudien insbesondere auf Originalstudien größerer Studienprojekte zurückgegriffen. Prioritär fanden Publikationen Berücksichtigung, die ausschließlich einen Bezug zu Bahnlärm ergaben und solche Studien, die über Untersuchungen zu multiplen Lärmquellen (Schienen-, Straßen- und Fluglärm) berichteten.

Die gesichteten Veröffentlichungen decken den Zeitraum der Jahre von etwa 2000 bis Ende 2013 ab.

Die Literatursauswahl erfolgte durch die Recherche in der Datenbank Pubmed und in der frei zugänglichen englischsprachigen Meta-Datenbank der nationalen medizinischen Bibliothek der Vereinigten Staaten (National Library of Medicine NLM). Als Suchkriterien gingen die Stichworte „railway“ „railroad“ „train“ in Kombination mit „noise“ oder „vibration“ ein. In einem zweiten Schritt wurde nach weiteren Publikationen der Autoren der aus dem ersten Schritt resultierenden Veröffentlichungen recherchiert. Um auch so genannte graue Literatur in die Auswertung einzubinden, erfolgte eine Sichtung mit der Suchmaschine Google sowohl nach

den oben genannten englischen Schlagwörtern als auch nach den Begriffen „Bahnlärm“ „Schienenlärm“ „Schienenverkehrslärm“ und verwandten Suchbegriffen. Zusätzlich wurden zur Auffindung weiterer Publikationen die Literaturverweise insbesondere von Übersichtsarbeiten und Berichten zu Forschungsprojekten genutzt.

Neuere Forschungsansätze zu extra-auralen Mechanismen der Lärmwirkung wurden bei der Recherche berücksichtigt, indem auch übergreifend mit den Stichworten „noise“, „effects“ und „health“ in der Datenbank Pubmed gesucht wurde. Zusätzlich erfolgte eine Auswertung der Abstracts der Veröffentlichungen im Hinblick auf weitere bisher nicht untersuchte physiologische Parameter zur Beurteilung der Lärmwirkung.

3 Ergebnis der Literaturlauswertung

3.1 Akute physiologische Reaktionen auf Nachtlärm

Tabelle 1 zeigt die Übersicht über die ausgewertete Literatur zu akuten physiologischen Reaktionen.

Tabelle 1: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu akuten physiologischen Reaktionen

ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

*falls nichts anderes genannt beziehen sich alle Werte auf Bahnlärm

Erstautor	Jahr	Exposition *	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
TNO / Passchier- Vermeer	2007	Leq (außen) = 49-65 dB(A) Leq (innen, berechnet) ca. 25 dB(A) Bahnlärmereignis: mindestens Lmax (außen) = 58 dB(A)	Motilität Herzreaktion	Feldstudie	52 Personen Davon 14 auch EKG	Aktigrafie Elektrokardiogramm
Griefahn	2008b	Lmax = 53,8 dB(A) Bereich: 39,5-71,9 dB(A)	autonomic arousals	Laborstudie	24 Personen / 12 Männlich Kollektiv wie Griefahn 2006 Breimhorst 2009	Polysomnogramm Elektrokardiogramm
Tassi	2010a	Mittlere Belastung: Leq 8h = 40 dB(A) Lmax 52 dB(A) Hohe Belastung: Leq 8h = 50 dB(A) Lmax 66 dB(A) Hintergrund: Leq 8h = 30 dB(A)	autonomic arousals; Herzreaktion und vaskuläre Response	Laborstudie	38 Probanden Kollektiv Saremi	Polysomnogramm Elektrokardiogramm Finger- Plethysmographie
Tassi	2010b	Labor: Leq 8h = 41 dB(A) Lmax 48 dB(A) (am Ohr des Schläfers) Zu Hause: Hohe Belastung (vorw. Bahnlärm) Leq 8h = 39 dB(A) Niedrige Belastung (kein Bahnlärm) Leq 8h = 31,4 dB(A)	autonomic arousals; Herzreaktion und vaskuläre Response	Laborstudie	40 Probanden	Polysomnogramm Elektrokardiogramm Finger- Plethysmographie

Fortsetzung Tabelle 1: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu akuten physiologischen Reaktionen

ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

*falls nichts anderes genannt beziehen sich alle Werte auf Bahnlärm

Erstautor	Jahr	Exposition *	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Saremi	2008	Mittlere Belastung: Leq 8h = 40 dB(A) Lmax 52 dB(A) Hohe Belastung: Leq 8h = 50 dB(A) Lmax 66 dB(A) Hintergrund: Leq 8h = 30 dB(A)	Schlafstruktur	Laborstudie	38 Probanden Kollektiv Tassi	Polysomnogramm
Aasvang	2011	Leq (night) = 30,0 ± 6,4 dB(A) Lmax = 53,3 ± 8,8 dB(A)	Schlafstruktur corticale arousals	Feldstudie	40 Teilnehmer davon 20 vorwiegend gegenüber Schienenverkehrslärm exponiert 10 Männer 10 Frauen	Polysomnogramm
Elmenhorst	2012	Lmax = Median 49 dB(A) Bereich 23,4-81,3 dB(A) Leq = Median 37,1 dB(A) Bereich 23,1-50,9 dB(A)	psychomotorische Leistungsfähigkeit Schlafstruktur	Feldstudie (Rheinstrecke)	33 Teilnehmer 22 Frauen	Polysomnogramm

Fortsetzung Tabelle 1: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu akuten physiologischen Reaktionen

ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

*falls nichts anderes genannt beziehen sich alle Werte auf Bahnlärm

Erstautor	Jahr	Exposition*	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Graham	2009	L (innen) = 36 dB(A) beim 50 % Perzentil	Sympathischer/parasympathischer Tonus des Herzens	Feldstudie	14 Teilnehmer davon 9 Frauen gegenüber Bahnlärm Untergruppe des Kollektivs Paschier- Vermeer 2007	Elektrokardiogramm Impedanzkardiogramm
Basner	2011	Lärmereignis Lmax = 65 dB(A) Leq = 39,7 dB(A)	Schlafstruktur Leistungsfähigkeit	Laborstudie	72 Probanden 32 Männer Altersdurchschnitt 40 Jahre	Atembewegungen des Brustkorbs und des Abdomens Herzrate Polysomnogramm Fingerpulsamplitude Leistungsfähigkeitstests

3.1.1 Motilität

Zur objektiven Erhebung von Schlafstörungen in Feldstudien wird häufig ein Aktimeter verwendet, der die Körperbewegungen (Motilität) während des Nachtschlafs misst. Der Aktimeter ist ein kleines Gerät, das am Handgelenk getragen wird, um die Bewegungsdaten aufzuzeichnen und zu speichern (Mersch-Sundermann 2010). Der Einsatz eines Aktimeters wird meist als weniger störend als die zur Polysomnografie nötigen Sensoren empfunden. Der Informationsgehalt im Vergleich zur Polysomnografie ist jedoch weit geringer. Die Aktimetrie ermöglicht eine hinreichend genaue Bestimmung der Einschlafzeit und des endgültigen Erwachens, nicht aber des zyklischen Schlafablaufs und der Schlafstruktur. Die intermittierenden Wachzeiten werden nicht zuverlässig erfasst, die elektrophysiologisch erfassten Wachzeiten sind zwar immer von Unruhe begleitet, weniger als die Hälfte aller Körperbewegungen ist aber mit dem Aufwachen verknüpft (zit. nach Griefahn 2007b Forschungsverbund leiser Verkehr, Horne 1994). In einer Studie wurde unter anderem die Validität der Aktimeter durch einen Vergleich mit den auswertbaren polysomnografischen Aufzeichnungen bei 225 Probanden untersucht. Danach stimmten 82 % der durch die Aktimetrie gemessenen Epochen mit Bewegungen mit der Registrierung von Bewegungen durch die Polysomnografie überein (Sensitivität der Aktimetrie). Der Anteil der Übereinstimmung der Zeiten ohne registrierte Bewegungen betrug 76 % (Spezifität der Aktimetrie). Insgesamt nahmen an dieser Studie 377 Probanden teil, die zu etwa gleichen Teilen durch Schienen oder Straßenverkehr belastet waren (Möhler 2000a und b, s. a. Leistungsfähigkeit). Geräuschpegelabhängige Schlafstörungen ließen sich mit der Aktimetermessung für beide Verkehrslärmarten nicht nachweisen. Die Autoren halten die Aktimetrie zum Nachweis der Wirkung dieser Lärmarten möglicherweise für nicht ausreichend empfindlich.

TNO / Passchier-Vermeer 2007

In einer niederländischen Feldstudie mit 262 Teilnehmern, davon wohnten 52 an 4 Bahnlärm-belasteten Orten mit vermehrtem nächtlichen Frachtverkehr, wurde die Motilität in Bezug zu Zugpassagen gesetzt (TNO 2007). Die Bestimmung von Lärmwirkungen erfolgte in dieser Studie auf drei unterschiedlichen Zeitskalen. Im kürzesten betrachteten Zeitraum wurden in Intervallen von 15 Sekunden die Wahrscheinlichkeit von Motilität und die Wahrscheinlichkeit des Einsetzens von Motilität in Bezug zu den gemessenen Geräuschen aus Verkehr und anderen Belastungen in Verbindung gebracht. Die Wahrscheinlichkeit von Motilität und das Einsetzen von Motilität ist während der Verkehrspassagen ungefähr 3- bis 4-fach erhöht. Einen Einfluss hat die zeitliche Länge des Schlafes: je länger andauernd der Schlaf, umso höher die Wahrscheinlichkeit von Motilität und anderen Momentaneffekten. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit von Motilitätsereignissen bei Männern nach 4,5 Stunden Schlaf 1,5-mal so hoch wie bei Frauen. Neben der Motilität wurden auf dieser Zeitskala auch

die Parameter „selbstregistriertes Aufwachen“ und in einer Untergruppe (14 Personen an bahnlärmbelasteten Orten) Herzschlagfrequenz, Herzschlagdauer (IBI = Inter beat interval) und die Variabilität des IBI (bezogen auf die 2,5 Minuten vor und nach jedem Herzschlag) durch ein EKG (Elektrokardiogramm) gemessen und in Bezug auf die Lärmbelastung beobachtet. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen den gemittelten Herzschlagvariablen und der Lärmbelastung gefunden werden. Werden jedoch die einzelnen Verkehrereignisse betrachtet, so ergibt sich eine höhere Herzfrequenz und ein kürzeres IBI. Die Autoren spezifizieren hierzu jedoch nicht die Verkehrsart. Genauer auf die Varianz des Herzschlags als Reaktion auf Lärm allgemein geht die Arbeit von Kraus et al. (2013) ein.

3.1.2 Schlafstruktur

Im Schlaflabor ist die Polysomnografie der „Goldstandard“ um Schlaf zu messen (Basner 2012). Ein Polysomnogramm besteht aus der Aufzeichnung des Hirnstrombildes (Elektroenzephalogramm EEG), der Augenbewegung (Elektrookulogramm EOG) und der Muskelspannung (Elektromyogramm EMG). Diese Aufzeichnungen werden zur Quantifizierung des Schlaf- und Wachzustandes sowie der einzelnen Schlafstufen und deren Verteilung benutzt (Griefahn 2007b, Forschungsverbund leiser Verkehr). Die Lärmwirkungsforschung behandelt überwiegend Arousalepisoden, die eine Zustandsänderung von mindestens 15 Sekunden voraussetzen (nach Schlafkriterien von Rechtschaffen und Kales 1968). In der Schlafmedizin bezeichnet Arousal eine zeitlich eng begrenzte Zustandsänderung, die den Organismus von einem niedrigen Vigilanzniveau (Bereitschaftszustand) auf ein höheres anhebt (Maschke 2007). In der heute allgemein akzeptierten Differenzierung wird Schlaf von der deutschen Gesellschaft für Schlafmedizin und der American Academy of Sleep Medicine in REM- (Rapid Eye Movement, schnelle Augenbewegung) Schlaf und non-REM Schlaf unterteilt. Der non-REM Schlaf wird weiter in leichten Schlaf (Schlafstufen N1 und N2) und Tiefschlaf (Schlafstufe N3, auch als slow wave sleep SWS) klassifiziert. Die alten Schlafstadien nach Rechtschaffen und Kales (1968) S3 und S4 werden zum Tiefschlaf N3 bzw. SWS zusammengefasst.

Aufgrund des erheblichen Aufwandes wurde die Polysomnografie vorwiegend im Schlaflabor und nicht bei Feldstudien eingesetzt. Durch technische Fortschritte in der Miniaturisierung sind in letzter Zeit Feldstudien möglich geworden (Aasvang 2011, Elmenhorst 2012). Die Polysomnografie dient im Labor häufig dazu, die (kortikalen) Arousals zu erkennen und die Korrelation mit weiteren physiologischen Parametern, insbesondere der Herzreaktion (kardiale Arousal), zu untersuchen. Diese vegetativen Arousals, die sich beispielsweise in erhöhter Herzfrequenz und Blutdruck bemerkbar machen, spielen sich unterhalb der

kortikalen Ebene ab. Weiterhin wird der Frage nachgegangen, wie das autonome Nervensystem diese Herzreaktion reguliert.

Griefahn 2006 und 2008b

In einer Laborstudie der Arbeitsgruppe von Griefahn 2006 wurden einschließlich der Kontrollgruppe 32 Probanden im Schlaflabor für 3 Wochen in jeweils 4 Nächten untersucht. Nach einer ruhigen Nacht wurden die Probanden im wöchentlichen Rhythmus Flug-, Straßen- und Bahnlärm in äquivalenten Schall-pegeln ausgesetzt. Die Schlafstruktur wurde mit der Polysomnografie untersucht. Gegenüber einer Kontrollgruppe (8 Probanden: 4 Männer, 4 Frauen) war die Latenzzeit bis zum SWS verlängert und die Dauer des SWS während des ersten Schlafzyklus reduziert, sowie die gesamte im Schlafzustand verbrachte Zeit geringer. Im Vergleich der Lärmarten untereinander zeigte der Bahnlärm gegenüber den beiden anderen Lärmarten den größten Effekt. Hier war die Latenzzeit bis zum ersten SWS erhöht und im ersten Schlafzyklus die Zeit im SWS erniedrigt sowie die Zeit im Wachzustand und S1-Schlaf verlängert. Auch die Gesamtdauer des SWS war erniedrigt. In der mittleren von 3 Lärmbelastungsstufen wurden die Probanden mit L_{eq} 44 dB(A) beschallt, bei Spitzenbelastungen von L_{max} 51-68 dB(A) im Schlaflabor mit 30 simulierten Zugvorbeifahrten. Die Belästigungsbeurteilung des Bahnlärms durch die Probanden unterschied sich aber nicht signifikant von der der anderen beiden Verkehrslärmarten.

In dieser Laborstudie wurden auch autonome Arousals, d. h. vorübergehende Erhöhungen des sympathischen Tonus, als Reaktion auf Nachtlärm, verursacht durch Bahn-, Straßen- und Flugverkehr, betrachtet (Griefahn 2008b, gleiches Kollektiv, leichte Veränderung des Lärmhintergrunds). Um den Einfluss auf das Herz zu untersuchen, kam neben der Polysomnografie auch die Elektrokardiografie zum Einsatz. Für die Art der kardialen Arousals ist ein entscheidender Faktor, ob diese mit Aufwachen verbunden sind. Mit Aufwachen verbundene Arousals führen zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Herzfrequenz von 30 bpm (Schläge pro Minute). Dieses ist wahrscheinlich auf den mit dem Aufwachen verbundenen erhöhten sympathischen Tonus sowie die Cortisol-Aufwachreaktion zurückzuführen.

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass Aufwachen bevorzugt dann hervorgerufen wird, wenn spontane nicht durch Lärm bedingte autonome Arousals mit dem exogenen Stimulus durch Lärm zusammenfallen. Der Lärm löst die Aufwachreaktion aus, die Aufwachreaktion mit ihrer starken sympathischen Erregung ist dann für das Ausmaß und Muster der Herzreaktion entscheidend. Erfolgen die autonomen Arousals ohne Aufwachen, zeigt sich eine

biphasische Herzreaktion: initial beschleunigt sich die Herzfrequenz durch vagale Inhibition, danach erfolgt eine Verringerung der Herzfrequenz durch die Gegenregulation verbunden mit einer Erhöhung des vagalen Tonus und Inhibition der sympathischen Erregung. Anschließend steigt die Herzfrequenz langsam auf das Niveau vor dem Stimulus.

In älteren Publikationen (Muzet 1983) werden diese kardiovaskulären Antworten als gefährlich eingestuft, da diese nicht habituierten („man sich an sie gewöhnen kann“), diese reine Reflexe sind, die nicht dem energetischen Bedarf des Körpers entsprechen. Es wird deshalb angenommen, dass diese vegetativen Antworten ein pathogenes Potential für die Entstehung kardiovaskulärer Krankheiten besitzen. Ob diese Schlussfolgerung valide ist, wird von den Autoren der Studie offen gelassen, da diese Arousals auch spontan, das heißt ohne externen Stimulus durch Nachtlärm auftreten.

Im Zeitverlauf der Nacht gab es bezüglich der Herzreaktion keinen Gewöhnungseffekt an den Lärm.

Im Schlaflabor wurde neben Bahnlärm auch der Einfluss von Flug- und Straßenverkehrslärm, also die Art der Lärmquelle, untersucht. Die Lärmart beeinflusste die Maximalamplitude der Herzfrequenz nicht, wohl aber die Latenzzeit bis zum Erreichen der Maximalamplitude. Gegenüber Bahnlärm wurde die Maximalamplitude am schnellsten erreicht. Als Grund hierfür diskutieren die Autoren, dass der Anstieg des Lärmpegels pro Sekunde (also die Rate des Lärmpegelanstiegs) die Veränderung der Herzfrequenz auf Lärm bestimmt. Diese Schlussfolgerung widerspricht teilweise den Autoren Tassi (2010).

Saremi 2008

In dieser Untersuchung wurde der Einfluss unterschiedlicher Zugtypen auf die Schlafstruktur untersucht. Neben den Kriterien der Schlafstadien nach Rechtschaffen und Kales (1968) wurden insbesondere (Micro-) Arousals nach der Definition der ASDA (American Sleep Disorders Association) betrachtet. Als Micro-Arousal wurde dabei eine Veränderung im Zeitbereich von 3-10 s definiert. Längere Arousals wurden als Aufwachen gewertet. Bei statistischer Betrachtung gab es keinen Effekt des Lärms auf die durchschnittliche Anzahl der Aufwachreaktionen, die Häufigkeit der Micro-Arousals stieg jedoch mit der Lärmbelastung an. Dieser Effekt zeigte sich ab einer Exposition von $L_{eq} = 40$ dB(A) mit Spitzenwerten L_{max} von 51-52 dB(A) im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die Art des Zuges wiederum hatte keinen Einfluss auf die Micro-Arousals, wohl aber auf die Aufwachreaktion. Hier hatte der Güterzug, vor dem Passagierzug und dem Triebzug („automotive“) den größten Einfluss auf späteres Aufwachen. Die gleiche Reihenfolge der Wirkungsstärke der

Zugtypen bezüglich der Herzreaktion zeigt sich auch bei Tassi 2010a. Das Alter hatte in dieser Studie keinen Effekt auf die gemessenen Parameter. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass altersbedingte Schlafstörungen nicht durch Lärm verschlimmert werden. Die aus den Studien mit selbstberichteten Daten ablesbare Vulnerabilität könnte darauf beruhen, dass Ältere auch ohne Lärm nachts öfter wach sind.

Tassi 2010a

Die Untersuchungen dieser Studie fanden am selben Kollektiv wie Saremi (2008) statt. Der Schwerpunkt wurde hier auf die kardiovaskulären Wirkungen des Bahnlärms gelegt. Neben der Polysomnografie wurden auch die Elektrokardiografie und Finger-Plethysmografie eingesetzt. Mit der Finger-Plethysmografie kann der Fingerpuls und die Pulsamplitude gemessen werden, um die periphere vaskuläre Reaktion auf Lärm zu ermitteln. Als Zielvariablen hierfür wurden die Finger Pulse Rate (FPR) (der Anteil der Lärmereignisse die eine Vasokonstriktion bewirken in %), die Finger Pulse Amplitude (FPA) (die Amplitude des kleinsten Fingerpulses während des Lärmereignisses dividiert durch den Durchschnitt aus 10 Fingerpulsen vor und nach dem Ereignis), sowie die Finger Pulse Latency (FPL) (die Zeit zwischen dem Beginn eines Geräuschereignisses und der geringsten FPA) gewählt. Um die Reaktion des Herzens auf die Geräuschereignisse zu quantifizieren, wurde die Heart Rate Response (HRR) (der Anteil der Lärmereignisse die eine kardiale Reaktion bewirken in %), die Heart Rate Amplitude (HRA) (die Differenz zwischen höchster und niedrigster Herzfrequenz innerhalb eines Schallereignisses) sowie die Heart Rate Latency (HRL) (die Zeit zwischen dem Beginn des Lärms und der höchsten Herzfrequenz) ausgewertet. Die HRA stieg im Vergleich zur Kontrollnacht bei L_{eq} 40 dB(A) (L_{max} 52 dB(A)) an und erhöhte sich weiter bei einer Exposition gegenüber L_{eq} 50 dB(A) (L_{max} 66 dB(A)). Es wurden 48 Zugvorbeifahrten pro Nacht simuliert.

Der Bahnlärm wurde weiter nach den Zugarten Güterzug, Personenzug und Triebwagen differenziert. Beim Güterzug beträgt die HRR 48 % gegenüber 40 % bei Personenzügen oder Triebwagen. Auch bei der HRA und der HRL hat der Güterzug den größten Effekt. Auf die vaskuläre Reaktivität hat die Art des Zuges keinen Effekt. Von den Autoren werden die Ergebnisse so interpretiert, dass im Gegensatz zu Griefahn (2008) eher die Dauer des Schallereignisses (bei Güterzügen 42 Sekunden und bei anderen Zügen 20 Sekunden) entscheidend für die Herzreaktion und weniger die Schnelligkeit des Anstiegs der Schallpegel ist.

Die Schlafphase beeinflusst nur die vaskuläre Komponente des kardiovaskulären Systems. Während des REM-Schlafs kommt es zu einer geringeren Vasokonstriktion als Reaktion auf Geräusche als in anderen Schlafphasen.

In dieser Studie und einer kurz danach erschienenen Publikation der Arbeitsgruppe (Tassi 2010b) wurde auch der Einfluss des Alters auf die Herzreaktion durch Lärmbelastung untersucht. Jüngere Personen zeigten sich bezüglich der HRR sensitiver. Dieser Effekt wird mit der natürlichen Veränderung des kardiovaskulären Systems im Alter erklärt. Diese Veränderungen betreffen die geringere Sensitivität der Barorezeptoren und der adrenergen Rezeptoren, dies bewirkt ein schlechteres Vermögen, sich schnell Umweltstressoren anpassen zu können.

Wie zu erwarten, steigen mit der Lärmintensität auch die HRA und die HRR, während die HRL sinkt. Mit der Lärmintensität vergrößert sich auch die FPA, FPR und FPL. Die Autoren schließen aus diesen Ergebnissen, dass Bahnlärm während des Schlafes für das kardiovaskuläre System sehr schädlich sein kann.

Tassi 2010b

In einer weiteren Studie, mit teilweise Hinzunahme von publizierten Messungen aus der ersten Studie von Tassi (2010a), wurde der Einfluss einer langfristigen Bahnlärmexposition auf die kardiovaskuläre Reaktivität nach nächtlichen Schallereignissen untersucht. Dazu wurden Probanden, die in der Nähe von Bahnstrecken leben mit Probanden, die in ruhiger Umgebung wohnen, durch Untersuchungen im Schlaflabor verglichen. Die gemessenen physio-logischen Parameter sind die gleichen wie bei Tassi (2010a). Unter der Lärmbelastung von $L_{eq} = 41$ dB(A) ($L_{max} = 48$ dB(A)) am Ohr des Schläfers (bei 30 simulierten Vorbeifahrten sowie einem Pegelanstieg von 13,6 s und einer Dauer von 37 s für jede Vorbeifahrt) traten Micro-Arousals häufiger auf und die kardialen und vaskulären Parameter waren verändert. Es wurde die durch Untersuchungen der Schlafforschung aufgestellte Hypothese getestet, dass sich eine Habituation (Gewöhnung) an Schallereignisse auf die Schlafarchitektur nicht aber auf die kardiovaskuläre Reaktivität erstreckt. Dieser Gewöhnungseffekt ließ sich in der Schlafarchitektur feststellen, wobei alle Indizes, die Schlaffragmentierung anzeigen, in den vorbelasteten Gruppen geringer ausfielen.

Der Einfluss des Alters an sich überlagert den Prozess der Habituation des kardiovaskulären Systems. Jüngere Personen, die in der Nähe von Bahnstrecken wohnten, hatten eine höhere HRR im Vergleich mit der gleichen Personengruppe aus ruhigen Gegenden. Innerhalb der älteren Personengruppe gab es keine Unterschiede bezüglich dieses Para-

mers. Die FPR hingegen war in der Bahnlärm-vorbelasteten Gruppe der älteren Studienteilnehmer gegenüber der unbelasteten Gruppe erniedrigt. Zur Erklärung schlagen die Autoren einen biphasischen Effekt des Bahnlärms vor: auf eine initiale Phase der Sensibilisierung erfolgt langfristig eine Habituation des kardiovaskulären Systems. Zur Habituation sind lange Expositionszeiten (Jahre) nötig, so dass sich dieser Effekt allein im Schlaflabor nicht nachbilden lässt.

Graham 2009

In dieser Feldstudie wurde eine Untergruppe des Kollektivs von TNO / Passchier-Vermeer näher untersucht. Hierbei wurde der Hypothese nachgegangen, dass nächtlicher Verkehr zu einer Steigerung des sympathischen Tonus und einer Verminderung des parasympathischen Tonus führt. Als Index für den parasympathischen Tonus dient die respiratorische Sinusarrhythmie RSA. Die RSA beschreibt die Variation des Herzschlags in Bezug zur Atmung und ist gegenüber der Blockade von Muskarinrezeptoren sensitiv. Die Wirkung des Parasympathikus am Herzen wird durch Muskarinrezeptoren vermittelt, so dass die RSA als Index für den parasympathischen Tonus dienen kann. Als Maß für den adrenergen (sympathischen) Tonus des Herzens wurde die sogenannte Pre-Ejection Period bestimmt. Die Pre-Ejection Period (PEP dt.: Anspannzeit) ist das Zeitintervall zwischen dem Beginn der elektrischen Erregung des Ventrikels (Q-Zacke im EKG) und der Öffnung der Aortenklappen, bestimmt mit der Impedanzkardiografie. Es wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Sympathikustonius und nächtlichem Verkehrslärm gefunden. In dieser Studie wurde jedoch eine längere Zeitskala als beispielsweise bei der Untersuchung der Herzreaktion in der Publikation von Griefahn (2008) betrachtet. In der zweiten Nachthälfte führt Verkehrslärm zu einer signifikanten Verringerung des kardialen parasympathischen Tonus, bestimmt durch die RSA. Die Autoren diskutieren, dass die postulierte Schutzfunktion des Schlafes für das kardiovaskuläre System durch den parasympathischen Tonus vermittelt wird. Eine Verminderung dieses Tonus könnte somit bei der Genese kardiovaskulärer Erkrankungen eine Rolle spielen. In dieser Studie wurde kein Einfluss der Lärmart, d. h. Schienen- oder Straßenverkehrslärm auf den sympathischen oder parasympathischen Tonus des Herzens festgestellt.

Basner 2011

In dieser Laborstudie wurden die durch die Polysomnografie gewonnenen Daten zur Schlafstruktur in Beziehung zu Leistungstests und subjektiver Schlafbeurteilung gesetzt. Als weitere physiologische Parameter wurden die Fingerpulsamplitude, die Atembewegungen

des Brustkorbs und des Abdomens gemessen und ein EKG erstellt. Die Lärmexposition betrug durchschnittlich L_{eq} 39,7 dB(A) bei 40 Vorbeifahrten mit Maximalpegeln von 45-65 dB(A). Betrachtet man alle lärmbelasteten Nächte der unterschiedlichen Verkehrslärmarten, so war die Schlafstruktur verändert, die Latenzzeit bis zum Slow-Wave Sleep (SWS) und der Umfang des S1 Schlafs (entspricht N1 nach neuer Definition) waren höher, die Zeit im SWS fiel geringer aus. Erste geringe Effekte zeigten sich bereits ab $L_{max} = 45$ dB(A). Im Vergleich der Lärmarten hatte der Straßenverkehr, gefolgt vom Bahnverkehr den größten Einfluss auf die Schlafstruktur. Die Analyse der Lärmereignisse zeigt den gleichen Trend: die Aufwachwahrscheinlichkeit und der Anstieg der Herzfrequenz ist bei Bahn- und Straßenverkehrslärm jeweils größer als bei Fluglärm. Kardiale Arousals habituierten in der zweiten Nachthälfte, aber nicht zwischen den Nächten. Dies wird von den Autoren als potenziell relevant für die Entstehung langfristiger Schäden des kardiovaskulären Systems durch von Lärmbelastungen verursachte Schlafstörungen gesehen.

Bezüglich des Aufwachens kommt es zu einer Umverteilung während des Schlafes. In lärmbelasteten Nächten gibt es zwar mehr Aufwachereignisse durch Lärm, diese werden jedoch durch eine geringere Aufwachwahrscheinlichkeit während der Ruhephasen ausgeglichen. Über 90 % der lärminduzierten Aufwachreaktionen ersetzen Aufwachreaktionen, die in ruhigen Nächten spontan erfolgen würden. Dadurch wird auf dieser Ebene die Schlafstruktur erhalten. Dies gilt nicht im gleichen Maß für Arousals. Die Häufigkeit der Arousals steigt in lärmbelasteten Nächten insgesamt an und ist in den Ruhephasen genauso hoch wie in ruhigen Nächten. Auf der Ebene der Mikrostruktur des Schlafes gibt es also eine höhere Fragmentierung als auf der Ebene der Makrostruktur. Ähnlich wie Griefahn (2008) wird die Steigerungsrate des Schallpegels als wichtigste Erklärung für die Unterschiede in der Wirkung der verschiedenen Verkehrslärmarten gesehen.

Aasvang 2011

Durch fortschreitende Miniaturisierung der Untersuchungsmethodik ist es gelungen, die Polysomnografie auch in Feldstudien einzusetzen. Die Untersuchung dieser Studie ist eine der ersten, die diese Methode so anwendet. Durch Erhebungen in der natürlichen Umgebung der Studienteilnehmer kann die individuelle Belastung genauer bestimmt und Gewöhnungseffekte besser erfasst werden. Die Ergebnisse aus Feldstudien können auf diese Weise vorangegangene Untersuchungen in Schlaflaboren ergänzen. Der Anteil der Güterzüge lag in dieser Studie bei 4 - 51 %. L_{eq} betrug ca. 50 dB(A), der Maximalpegel außen (hier bezeichnet als $L_{p,A,Fmax,night,façade}$) lag durchschnittlich bei 76 dB(A) bzw. im Innenraum bei ca. 53 dB(A). Zwischen 6 und 73 Zugvorbeifahrten wurden pro Nacht

registriert, mit Einzelereignissen von 30 bis 90 s Dauer. Die Höhe des nächtlichen maximalen Schalldruckpegels $L_{p_{A, Fmax, night}}$ hatte nur für Bahnlärm, nicht aber für Straßenlärm, Auswirkungen auf den REM-Schlaf. Der REM-Schlaf wurde bei Bahnlärmbelastung verkürzt, andere Parameter wurden nicht durch die Lärmart beeinflusst. Bahnlärm hat in dieser Studie stärkere Auswirkungen auf die Schlafarchitektur als Straßenverkehrslärm. Innerhalb der bahnlärmbelasteten Gruppe verbrachte die höher belastete Untergruppe ($L_{p_{A, Fmax, night}} > 50 \text{ dB(A)}$) weniger Zeit im REM-Schlaf, hatte aber auch weniger spontane Arousals. Die Autoren kommen zum Schluss, dass der Parameter $L_{p_{A, Fmax, night}}$ die Belastung durch Bahnlärm besser abbildet als gemittelte Parameter wie $L_{p_{A, eq, night}}$.

Elmenhorst 2012

Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine Feldstudie an der Rheinstrecke, bei der die Polysomnografie als Untersuchungsmethode eingesetzt wurde. Nächtlicher Bahnlärm zeigte keinen Einfluss auf die Einschlaf-Latenz sowie die Schlafeffizienz, definiert als Schlaf ohne Wachzeit während der Schlafperiode. Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg jedoch von 6,5 % bei $L_{max} 35 \text{ dB(A)}$ auf 20,5 % bei $L_{max} 80 \text{ dB(A)}$ signifikant an (Schallpegel jeweils am Ohr des Schlafers). Darüber hinaus war die Wahrscheinlichkeit des Aufwachens bei Lärmereignissen hoch signifikant von der Rate des Pegelanstiegs abhängig (s. a. Griefahn 2008). Für Werte L_{ASmax} (maximaler Schalldruckpegel mit langsamer Zeitkonstante) $\geq 51 \text{ dB(A)}$ ist die Aufwachwahrscheinlichkeit für einen Güterzug höher als für ein Flugzeug. Ein Personenzug besitzt in diesem Verkehrsmittelvergleich die geringste Aufwachwahrscheinlichkeit. Neben der Polysomnografie wurde auch die psychomotorische Leistungsfähigkeit durch einen psychomotorischen Vigilanztest abgeschätzt (siehe Kap 3.2). Im Hinblick auf den Zusammenhang mit einer Belästigung durch Bahnlärm, kommen die Autoren zum Schluss, dass diese mit nächtlichem Aufwachen, jedoch nicht mit der Schlafstruktur verknüpft ist.

Croy 2013

Bei der Untersuchung des Zusammenwirkens von Lärm und Vibration wurde von der Arbeitsgruppe festgestellt, dass gleichzeitige Vibrationen die Reaktion des Herzens modulieren. Anfangs kommt es zu einer Beschleunigung der Herzfrequenz, wie sie auch von Griefahn beschrieben wurde. Bei gleichzeitigen Vibrationen kommt es zu einer zweiten, verzögerten Beschleunigung der Herzfrequenz, die bei Lärmbelastung allein nicht beobachtet wurde (s. a. Erschütterungen). Auch bei geringer Vibrationsbelastung ist durch den

Bahnlärm ein deutlicher Anstieg der Herzfrequenz bei L_{eq} ca. 42-46 dB(A) und L_{max} ca. 47-50 dB(A) am Ohr des Schläfers zu beobachten.

Zwischenfazit:

Dass Bahnlärm eine teilweise Umstrukturierung der Schlafarchitektur bewirkt, ist durch Laborstudien und inzwischen auch Feldstudien gut belegt. Auch die Wirkung des Bahnlärms auf das autonome Nervensystem kann als gesichert gelten. Der nächtliche Bahnlärm hat ebenfalls Auswirkungen auf die Regulation des Herzens, die hauptsächlich durch das autonome Nervensystem vermittelt werden. Schwellenwerte für die Wirkungen auf die Schlafstruktur aus Feldstudien abzuleiten ist schwierig, da die Exposition gegenüber Bahnlärm sehr heterogen ist. In Laborstudien zeigten Werte um $L_{eq} = 40$ dB(A) (Basner 2011, Griefahn 2006) erste Effekte auf die Schlafphasen. Die Häufigkeit von Micro-Arousals nahm bei $L_{eq} = 40$ dB(A) gegenüber einer ruhigen Nacht signifikant zu (Saremi 2008).

Herzreaktionen wurden von Graham (2009) beim Innenraumschallpegel von L_{eq} (Schlafperiode) = 36 dB(A) (50. Perzentil der Expositionshöhen) untersucht. Bei den Untersuchungen der Gruppe von Tassi (Tassi 2010a, Saremi 2008) wurde bei einem Schallpegel $L_{eq} = 40$ dB(A) eine signifikante Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von Herzreaktionen von 49% gegenüber einer Spontanrate von 14,9 % festgestellt. Die Einzelereignisse haben hier eine Lautstärke von $L_{max} = 52$ dB(A). Insgesamt wird somit häufig ein Wert für die gemittelte Bahnlärmbelastung um $L_{eq} = 40$ dB(A) in den Laborstudien benutzt.

In den gleichen Studien werden hinsichtlich der Maximalpegel deutliche Effekte auf den Schlaf sowie auf kardiale und vaskuläre Parameter ab L_{max} von ca. 50 dB(A) beobachtet. Der Anstieg setzt sich mit zunehmendem Wert von L_{max} fort. Eine signifikant erhöhte Aufwachwahrscheinlichkeit wurde von Elmenhorst bei $L_{max} = 80$ dB(A) ermittelt.

Anzumerken ist jedoch, dass die Studien nicht in erster Linie dazu entworfen wurden, um Schwellenwerte für Bahnlärmwirkungen zu ermitteln, sondern um die physiologische Reaktion auf den Bahnlärm zu untersuchen. Somit kann es auch unterhalb dieser Werte durchaus Reaktionen des Körpers geben, wenn auch entsprechend geringere oder weniger häufige.

3.1.3 Stresshormone

Tabelle 2 zeigt die Übersicht über die ausgewertete Literatur zu Stresshormonen.

Die erhöhte Ausschüttung von Stresshormonen unter Lärmbelastungen wird im Modell der Entstehung chronischer Gesundheitsschäden durch Lärm als ein Zwischenschritt betrachtet. Die durch Lärm verursachte Stressreaktion wird insbesondere durch die HPA - (Hypothalamus-*Hypophysen*-Nebennierenrinden)-Achse vermittelt. Eine Aktivierung dieser Achse ist insbesondere mit einer Erhöhung des Cortisolspiegels verbunden. Stressreaktionen können auf Dauer zu einer „Entgleisung“ der normalen neurovegetativen und hormonellen Prozesse führen und zentrale Körperfunktionen beeinflussen.

In diesem Bericht werden nur Originalarbeiten betrachtet, bei denen Bahnlärm als Lärmquelle angegeben wurde.

Basner 2008

In dieser Studie war kein signifikanter Einfluss von Lärm auf die Ausscheidung von Cortisol und Noradrenalin, untersucht in nächtlichen Urinproben, festzustellen. Alle Werte waren im Normbereich. Dieser Befund wird nur im Abstract zur ICBEN 2008 erwähnt, nicht jedoch im peer-Review Paper in dem derselbe Personenkreis untersucht wurde (Basner 2011).

Evans 2001

An Kindern wurde der Einfluss des Lärms auf den Gehalt an Stresshormonen des über Nacht gesammelten Urins untersucht. Im Urin erfolgte dazu die Bestimmung der Stressindikatoren Adrenalin, Noradrenalin, Cortisol und 20 α -Dihydrocortisol. Für den Gehalt an Cortisol und 20 α -Dihydrocortisol wurde mit dem Mann-Whitney-U-nichtparametrischen Test eine signifikante Erhöhung in der lärmbelasteten Gruppe gefunden. Die Lärmbelastung wurde jedoch allgemein als verursacht durch Straßen- und Bahnverkehr beschrieben. Eine weitere Differenzierung nach Lärmquellen fand nicht statt. Eine Hormonausscheidung ist hier chronisch erhöht und keiner kurzfristigen Lärmwirkung zugeordnet.

Tabelle 2: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu Stresshormone

ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

*falls nichts anderes genannt beziehen sich alle Werte auf Bahnlärm

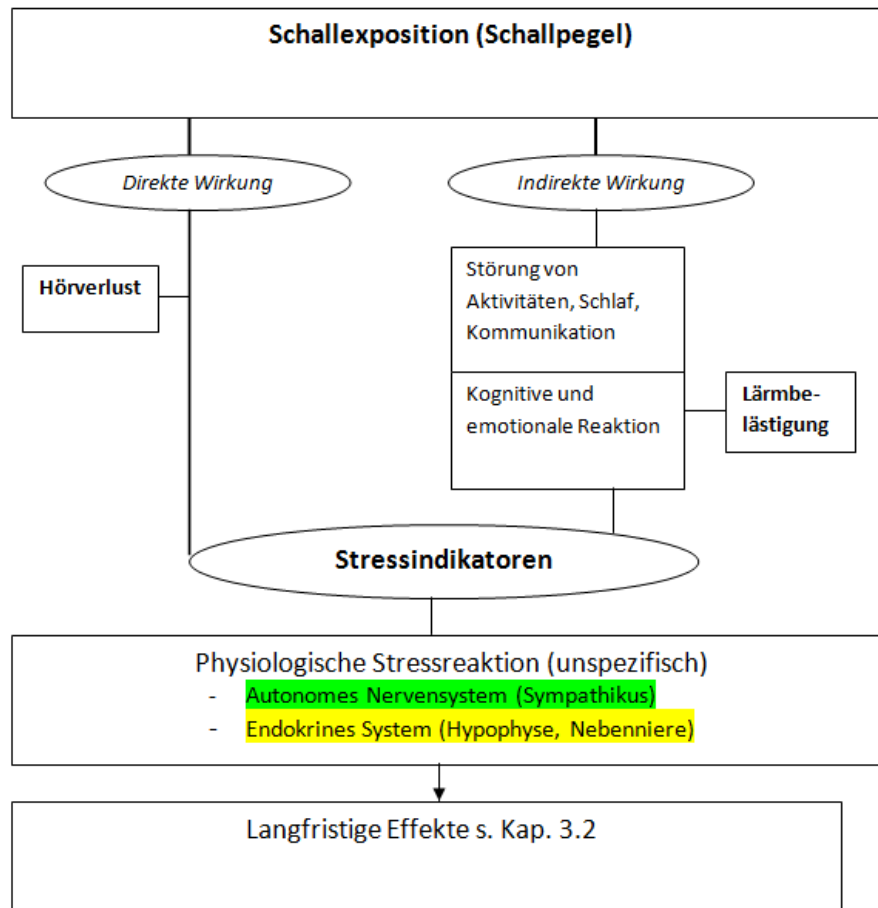
Erstautor	Jahr	Exposition*	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Basner	2008	Leq = ca. 40 dB(A) Schallereignisse: 45 - 65 dB(A)	Ausscheidung Stresshormone	Laborstudie	72 Personen / 32 Männlich	Bestimmung der Exkretionsrate Noradrenalin und Cortisol
Griefahn	2010	Leq bis 57,8 dB(A) maximaler Lmax 73,5 dB(A)	Cortisol-Aufwachreaktion	Laborstudie	12 Probanden	Bestimmung von Cortisol im Speichel
Griefahn	2010	Leq bis 54,3 dB(A) Auch Straßenverkehrslärm	Cortisol-Aufwachreaktion	Laborstudie	24 Frauen 22 Männer Nachbildung Schichtarbeit	Bestimmung von Cortisol im Speichel
Evans	2001	2 Gruppen Niedrigbelastet kleiner 50 dB(A) Hochbelastet grösser 60 dB(A) gemittelt Tag / Nacht aus Extrapolation Verkehr Bahn und Straße	Ausscheidung Stresshormone	Feldstudie	115 Kinder	Bestimmung im gesammelten Nachturin: Adrenalin Noradrenalin, freies Cortisol, 20a-Dihydrocortisol
Wagner	2010	Leq = 75 dB(A) Schallereignisse: 48 - 83 dB(A) Straßen und Schienenverkehr	Stress-Biomarker im Speichel	Laborstudie / Pilotstudie	10 Frauen 10 Männer	Bestimmung von Cortisol, Chromogranin A und alpha Amylase im Speichel

Griefahn 2010

Der Cortisolspiegel unterliegt einem bestimmten Tagesrhythmus, wobei die Cortisolausschüttung in der ersten Stunde nach dem Aufwachen stark ansteigt. Der Einfluss des Lärms auf diese sogenannte Cortisol-Aufwachreaktion wurde in 2 kleineren Studien untersucht. Cortisol kann in diesem Zusammenhang jedoch nicht als direkter Stressindikator gesehen werden; es wird die Veränderung einer normalen physiologischen Situation untersucht. Erst eine Veränderung des normalen Musters der Aufwachreaktion ist ein Indikator für einen negativen Einfluss der Lärmbelastung. Im ersten Studienteil wurden 12 Probanden in 3 aufeinanderfolgenden Nächten über einen Zeitraum von vier Zuggeräusche vorgespielt. Anschließend wurden nach dem Aufwachen Speichelproben genommen und deren Cortisolanstieg direkt nach dem Aufwachen sowie nach 45 min ermittelt. Im zweiten Studienteil wurde zusätzlich der Einfluss einer Tag-Nacht-Umstellung, wie er bei Schichtarbeitern auftritt, untersucht. Eine Abschwächung der Cortisol-Aufwachreaktion war nur in einer Untergruppe festzustellen. Diese Untergruppe hatte gerade vier Nachtschichten verbracht. Die Reaktion war nur in der Gruppe, die gegenüber dem höchsten Lärm exponiert war, zu beobachten. Schichtarbeiter werden von den Autoren als besonders vulnerable Gruppe gesehen.

Zwischenfazit:

Für Verkehrslärm werden weitere Biomarker wie Chromogranin A und alpha-Amylase auf ihre Anwendbarkeit hin geprüft (z. B. Wagner 2010). Während es für Verkehrslärm Studien gibt, die eine erhöhte Cortisol-Ausscheidung belegen (z. B. Ising 2002), gibt es keine Studien, die über die normale morgendliche Erhöhung von Cortisol hinaus von zusätzlicher Stresshormonausschüttung, verursacht durch Bahnlärm, berichten. Es ist jedoch aus der allgemeinen Lärmwirkungsforschung anzunehmen, dass Bahnlärm ähnliche Pathogenese-Mechanismen wie allgemeiner Verkehrslärm besitzt, in dem die hormonelle Stressreaktion eine bedeutsame Rolle spielt (siehe Abbildung 1 Stressmodell Babisch). Diese Annahme wird durch die Messung weiterer physiologischer Variablen wie korticale und kardiale Arousal gestützt, bei denen Bahnlärm ähnliche und teilweise stärkere Reaktionen hervorruft als allgemeiner Verkehrslärm.



Quelle: Babisch, 2002

Grün: gutes Evidenzniveau für Bahnlärm
Gelb: geringeres Evidenzniveau für Bahnlärm

Abbildung 1: Stressmodell nach Babisch 2002 modifiziert

3.1.4 Review-Arbeiten zu akuten physiologischen Reaktionen

Mersch-Sundermann 2010

In dem Review kommen die Autoren zu dem Schluss, dass in dem Kontinuum von eher subjektiv-psychischen, selbst berichteten Konstrukten wie der Belästigung, bis hin zu manifesten medizinisch-biologischen Aspekten im Bereich der physiologischen und endokrinen Reaktionen das Evidenzniveau sinkt. Es wird ein „klaffender“ Mangel im Bereich der medizinisch „harten“ objektiven Endpunkte konstatiert. Die Wirkung des Bahnlärms auf die Schlafstruktur wird von diesem Review mit dem Evidenzniveau der Stufe 2 „eindeutige Befunde aus Primärstudien“ bewertet. Auf die Unterschiede zwischen Feld- und Laborstudien bezüglich dieses Endpunktes im Vergleich zu den anderen Verkehrslärmarten wurde hingewiesen, wobei zwei neuere Feldstudien (Aasvang 2011, Elmenhorst 2012) in diesem Review noch

keine Berücksichtigung gefunden haben. Aus den Studien, die sich mit der Beeinflussung verschiedener Leistungsvariablen durch Bahnlärm befassten, ergab sich für die Autoren des Reviews nur eine geringe Evidenz oder die Einflüsse sind mit einer nur kleinen Studienzahl unzureichend belegt (Evidenzniveau Stufe 4). Im Bereich der physiologischen und endokrinen Reaktionen kommen die Autoren zu dem Schluss, dass nur schwache Veränderungen nachgewiesen werden konnten, die vor allem auf eine lärmbedingte Sympathikusaktivierung hindeuten. Insbesondere seien Langzeiteffekte durch lärmbedingte physiologische Veränderungen im Bezug auf Bahnlärm bisher kaum untersucht. Hier schätzen die Autoren die Kenntnisse mit der niedrigsten Evidenzstufe 4, geringe Evidenz (zu wenige Studien und widersprüchliche Befunde) ein.

Texas School of Public Health (UniTexas 2011)

Dieses Review beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Umweltlärms allgemein und nicht nur mit Bahnlärm. Bezüglich des Stresshormons Cortisol kommen die Autoren zum Schluss, dass lang anhaltender Stress die Fähigkeit, den Cortisolspiegel wieder herunter zu regulieren, beeinträchtigen kann. Lärm kann die physiologischen Parameter Herzfrequenz, Finger-Puls-Amplitude (FPA) und Motilität erhöhen. Die Autoren erwähnen auch die Möglichkeit einer geringeren Zeit im REM- und SWS-Schlaf durch Lärmeinwirkung.

WHO Night Noise Guidelines for Europe 2009

Für die biologischen Effekte des Nachtlärms (nicht allein des Bahnlärms) auf die Motilität, Schlafstruktur (Verteilung der Schlafphasen) und Veränderungen der kardiovaskulären Aktivität sehen die Guidelines der WHO ausreichende Evidenz gegeben. Die in den Guidelines zusammengestellten und mit gesundheitlichen Wirkungen verbundenen Werte sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Für eine erhöhte Stresshormonausschüttung sowie eine Beeinträchtigung der kognitiven Leistungsfähigkeit wird nur eine eingeschränkte Evidenz gesehen.

European Environmental Agency (EEA), Tech Report 2010

Die europäische Umweltbehörde (EEA) sieht ebenfalls ausreichende Evidenz für erhöhte Stresshormonausschüttung und verminderte Gedächtnisleistung als Reaktion auf Umweltlärm gegeben. Wie bei der WHO 2009 wird auch für die biologischen Effekte einer veränderten Schlafstruktur und erhöhten Motilität eine ausreichende Evidenz angenommen. Die Werte ab denen Wirkungen beobachtet werden, sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Lärmwerte und beobachtete Wirkungen nach der WHO 2009 und der EEA 2010

Effekt	WHO (2009)			EEA (2010)		
	Akustischer Indikator	Schwellenwert	Evidenzniveau	Akustischer Indikator	Schwellenwert	Evidenzniveau
Aufwachen	$L_{Amax\ inside}$	42	ausreichend	$SEL_{indoors}$	53	ausreichend
Schlaf (Motilität, Arousal Schlafqualität)	$L_{Amax\ inside}$	35, 42	ausreichend	$L_{max\ indoors}$	32	ausreichend
Herzfrequenz, Körperbewegungen während des Schlafes			ausreichend			
Hormonelle Schwankungen während des Schlafes			begrenzt			
Leistungsfähigkeit, Müdigkeit am nächsten Tag			begrenzt			
Stresshormone			begrenzt	$L_{max} L_{eq}$	NA	ausreichend
Lernen, Erinnerung, Leistung				L_{eq}	50	ausreichend

3.2 Effekte betreffend Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kommunikation

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die ausgewertete Literatur zu Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit.

Möhler 2000a, 2000b

In der Feldstudie von Möhler (Möhler 2000a, 2000b, siehe auch Kapitel Aktimetrie) wurde die Leistungsfähigkeit mit einem täglich morgens und abends auszuführenden Wahlreaktionstest bestimmt. Der Wahlreaktionstest bestand aus einem konventionellen (mit fester Reaktionszeit) und einem adaptiven Teil (mit variabler maximal erlaubter Reaktionszeit). In beiden Testarten lagen die Reaktionszeiten von Probanden, die Bahnlärm ausgesetzt waren, höher als bei denen, die Straßenlärm ausgesetzt waren. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass sich geräuschpegelabhängige Schlafstörungen mit den angewandten Methoden (wozu auch der Wahlreaktionstest zählt) weder in mit Bahnlärm noch in mit Straßenverkehrslärm belasteten Gebieten nachweisen lässt.

Lercher 2003

Diese Studie von Lercher befasst sich mit dem Lärmeinfluss auf die zufällige Erinnerung und die bewusste Gedächtnisleistung von Kindern des 4. Schuljahres. Dazu wurden aus einer größeren Anzahl von Kindern eine hinsichtlich anderer Einflussfaktoren (wie z. B. sozioökonomischer Status) homogene Gruppe ausgewählt und in eine hoch lärmbelastete und eine vergleichsweise wenig lärmbelastete Untergruppe eingeteilt. Die Quellen der Verkehrslärmbelastung wurden nicht genauer differenziert. Die Tests fanden in einem schallisolierten mobilen Labor statt. Das bewusste Gedächtnis wurde getestet, indem die Kinder einen Text in dem Wissen lesen sollten, nach 10 Minuten Fragen zum Text zu beantworten. Die zufällige Erinnerung wurde mit Hilfe von geometrischen Puzzles (lösbar und nicht lösbar), zu denen die Kinder während des Ausfüllens von Fragebögen befragt wurden, untersucht. Sowohl die bewusste als auch die zufällige Erinnerungsleistung ist bei Kindern aus der weniger lärmbelasteten Gruppe besser.

Tabelle 4: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kommunikation
Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Erstautor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Möhler	2000a 2000b	Schienegebiete: Außen: Leq = 40-70 dB(A) Innen: Leq = 20-57,5 dB(A)	Leistungsfähigkeit	Feldstudie	377 Teilnehmer (alle Lärmarten)	Wahlreaktionstest
Lercher	2003	(Verkehrs-)Lärmpegel zu Hause: Leq (24 h) = 60 dB(A) Lmax = 74 dB(A) Leq (24 h) < 50 dB (A) Lmax = 57 dB(A)	Erinnerungsvermögen	Feldstudie	123 Kinder Mean:9,7 Jahre	Bewusste Erinnerung Zufällige Erinnerung
Hygge	2003	Bahnlärm 2 Stufen: Leq = 66 dB(A) Lmax = 78 dB(A) Leq = 55 dB(A) Lmax = 68 dB(A)	Wiedererkennungsvermögen Erinnerungsvermögen	Feldstudie mit eingespielten Lärm	1358 Kinder in 80 Klassen 12-14 Jahre	Textverständnis anhand eines Fragebogens
Klatte	2007	Bahnlärm Leq(15s) = 59 dB(A) Sprache Leq(15s) = 57 dB(A) Kontrolle Leq(15s) = 36 dB(A)	Sprachwahrnehmung Satzverständnis Phonologisches Kurzzeitgedächtnis	Laborstudie	22 Kinder 6-8 Jahre	Sprachtests (siehe Abstract)
Griefahn Breimhorst (s.a. Physiologie)	2006 2009	Bahnlärm: lauteste Nacht: Leq (8 h) = 50,3 dB(A) Lmax 57,6-74,1 dB(A)	Leistungsfähigkeit Schlafstruktur	Laborstudie	32 Probanden 19-28 Jahre 8 in Kontrollgruppe Zur Hälfte Männer s. Kollektiv Griefahn 2008	Go/NoGo Test Switch-Test

Fortsetzung Tabelle 4: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit, , Konzentration und Kommunikation
Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Erstautor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Basner Elmenhorst (s.a. Physiologie)	2011 2013	Lärmereignis maximal 65 dB(A) Leq 39,7 dB(A)	Leistungsfähigkeit Schlafstruktur	Laborstudie	72 Probanden 32 Männer	Wortpaarungstest Psychomotorischer Vigilanztest 4 Buchstaben Erinnerungs- und suchaufgabe
Elmenhorst (s. a. Physiologie)	2012	Lmax = Median 49 dB(A) Bereich 23,4-81,3 dB(A) Leq = Median 37,1 dB(A) Bereich 23,1-50,9 dB(A)	psychomotorische Leistungsfähigkeit Schlafstruktur	Feldstudie (Rheinstrecke)	33 Teilnehmer 22 Frauen	Psychomotorischer Vigilanztest Polysomnogramm
Tassi	2013	Labor: Leq 8h = 41 dB(A) Lmax 48 = dB(A) (am Ohr des Schläfers) Zu Hause: Hohe Belastung (vorw. Bahnlärm) Leq 8h = 39 dB(A); Niedrige Belastung (kein Bahnlärm) Leq 8h = 31,4 dB(A)	Kognitive Leistungsfähigkeit Psychomotorische Leistungsfähigkeit Objektive Schläfrigkeit	Kombination Feldstudie Laborstudie	40 Probanden 20 Männer (kollektiv Tassi 2010b)	Modifizierter Attention Network Test (ANT) Psychomotorischer Vigilanztest EEG im Wachzustand

Hygge 2003

In der Studie von Hygge wurden Kinder gebeten, einen Text zu lesen, während ihnen Lärm im Klassenraum aus unterschiedlichen Quellen vorgespielt wurde. Zur Kontrolle wurden Texte in ruhiger Umgebung gelesen. Das Wiederkennungs- und Erinnerungsvermögen der Kinder wurde mit einem Fragenbogen anhand einer Bewertungsskala quantitativ abgeschätzt. Bahnlärm hatte im individuellen Vergleich der Kinder unter den Lernbedingungen laut/leise keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungen. Bemerkenswert ist, dass Fluglärm hier den größten Effekt hat, obwohl die Charakteristik des Fluglärms bezüglich Dauer, Zeitpunkt und Anzahl der Ereignisse dem Bahnlärm in dieser Studie sehr ähnelt. Die Autoren schlagen vor, dass die unterschiedlichen Effekte zwischen Flug- und Bahnlärm durch die Vorhersagbarkeit des Lärms und Fluktuationen der Schallpegel erklärt werden können.

Klatte 2007

Von dieser Arbeitsgruppe wurden die Sprachwahrnehmung, das Satzverständnis und das verbale Kurzzeitgedächtnis untersucht. Die Leistung wurde unter Kontrollbedingungen, mit Bahnlärm und mit für die Schulkinder unverständlicher Sprache (dänisch) als akustische Hintergrundbelastung erhoben. Im Vergleich zu ruhiger Umgebung zeigte Bahnlärm einen signifikanten Einfluss auf die Wortidentifikation (gemessen durch Bilder ähnlich klingender Worte z. B. Arzt, Ast, Axt, die das Kind nach dem gesprochenen Wort markieren soll), nicht aber auf das Satzverständnis (gemessen durch mündliche Instruktionen) oder das Kurzzeitgedächtnis. Die für die Kinder nicht verständliche Sprache als Umgebungslärm hatte im Vergleich zu Bahnlärm einen stärker störenden Einfluss bei gleichen Schallpegeln. Die Autoren geben aber zu bedenken, dass der eingespielte Bahnlärm relativ gleichförmig war. Zusätzliche modulierende akustische Ereignisse wie Bremsgeräusche und Warnsignale eines Zuges könnten dann ebenso beeinträchtigende Wirkungen z. B. auch auf das Kurzzeitgedächtnis haben wie unverständliche Sprache.

Griefahn 2006, Breimhorst 2009

Neben der Untersuchung der Schlafstruktur mit Hilfe der Polysomnografie wurden in der Laborstudie von Griefahn 2006 morgens und abends je zwei Leistungstests durchgeführt. Zum einen der Go/NoGo Test: bei diesem Test werden die Worte „drück“ und „stopp“ auf einem Bildschirm angezeigt und bei „drück“ ist so schnell wie möglich eine Taste zu drücken. Im zweiten Teil des Testes erscheinen die Worte in Klein- und Großbuchstaben, und es soll nur auf „drück“ und „STOPP“ mit Tastendruck geantwortet werden. Ausgewertet werden sowohl die Reaktionszeiten als auch die Fehlerrate. Als weiterer Test wurde der Switch-Test

durchgeführt. Hier erscheint in der Ecke eines Rechtecks eine zweistellige Zahl. Erscheint diese Zahl über der gedachten horizontalen Mittellinie des Rechtecks, ist die gerade Ziffer der beiden Ziffern zu benennen. Erscheint die Zahl unterhalb der gedachten Mittellinie, ist die größere Ziffer anzugeben. Die Zahlen erscheinen im Uhrzeigersinn, die Probanden können sich also auf die nachfolgende Aufgabe (switch/non switch) vorbereiten. Ausgewertet wurden auch hier die Fehlerrate und die Reaktionszeit getrennt nach switch/non switch Aufgabe. Die Reaktionszeit stieg mit zunehmender Lärmbelastung im switch/non switch Test an. Die Art des Verkehrslärms zeigte aber keinen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeiten. Mit den in dieser Studie verwendeten Tests sollen die so genannten „Exekutiven Funktionen“ untersucht werden. Exekutive Funktionen steuern das bewusste Verhalten. In der Neuropsychologie versteht man darunter die Aufnahme und Auswahl von Informationen, die durch Aufmerksamkeitsprozesse vermittelt werden. Diese Informationen werden bereitgehalten und bearbeitet, indem auf Handlungsschemata zurückgegriffen wird und Handlungskontrollprozesse kontinuierlich durchgeführt werden, während sie mit Zielen beziehungsweise Unterzielen, die im Gedächtnis repräsentiert sind, vermittelt werden. Früher wurde angenommen, dass diese Funktionen im Frontallappen verortet ist, heute wird eher von der Vorstellung ausgegangen, dass diese Funktionen von über das gesamte Gehirn verteilten Netzwerken geleistet werden (Koch 2012). In der Veröffentlichung diskutieren die Autoren, dass Leistungstests, wie ein einfacher Reaktionstest oder ein 3-4 Auswahltest, die keine exekutiven Funktionen testen, nicht sensitiv genug sind, um von lärminduzierten Schlafstörungen beeinflusst zu werden. In der Korrelation zwischen SWS und der Reaktionszeit im Test sehen die Autoren einen Kausalzusammenhang.

In einer weiteren Veröffentlichung zur selben Laborstudie (Breimhorst 2009) wurde die Hypothese untersucht, ob eine Leistungseinbuße während der Tests durch eine vermehrte Anstrengung des Probanden kompensiert wird. Die Lidschlagfrequenz wird dabei als Indikator für die kognitive Anstrengung gesehen. Je niedriger die Frequenz des Lidschlags, desto höher wird die Konzentration des Probanden eingeschätzt. Die Lidschlagfrequenz während der Tests fiel zwar tendenziell mit steigendem Lärmpegel der vorherigen Nacht, allerdings nicht signifikant, so dass die Hypothese nicht bestätigt werden konnte. Allerdings sehen die Autoren die Hypothese auch nicht widerlegt. So könnte beispielsweise der Schlaf nicht im ausreichenden Ausmaß gestört worden sein, um eine höhere Anstrengung zu erfordern, die Testdauer könnte zu kurz gewesen sein, um kompensatorische Effekte zu sehen oder der Indikator Lidschlagfrequenz könnte nicht geeignet gewesen sein. Möglicherweise sind die Herzfrequenz und/oder die Untersuchung evozierter Potentiale im EEG bessere Indikatoren für eine erhöhte Anstrengung bei den Leistungstests.

Basner 2011

Neben der polysomnografischen Untersuchung wurden in den Laborstudien von Basner auch Leistungstests durchgeführt. Am Morgen nach der Nacht im Schlaflabor wurden Leistungsfähigkeitstests wie der Psychomotorische Vigilanztest (PVT), eine vier Buchstaben Erinnerungs- und Suchaufgabe sowie ein Wortpaarungs-Test durchgeführt. Beim PVT muss 10 Minuten lang möglichst schnell auf repetitiv präsentierte visuelle oder akustische Reize reagiert werden, in diesem Fall auch mit einem Tastendruck auf eine in unregelmäßigen Abständen auf dem Bildschirm eingeblendete Stoppuhr. Nur im PVT zeigte sich eine leicht signifikante Erhöhung der Reaktionszeiten nach lärmbelasteten Nächten.

Elmenhorst 2012

Neben der Polysomnografie wurde auch die psychomotorische Leistungsfähigkeit durch einen Psychomotorischen Vigilanztest abgeschätzt. Bahnlärm hatte hier keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Dies könnte den Autoren zufolge, auf die zu geringe Studienteilnehmerzahl zurückzuführen sein. Hinzu kommt, dass die Untersuchung als Feldstudie durchgeführt wurde und die Schlafgewohnheiten der Teilnehmer zu irregulär waren, um signifikante Unterschiede im Test zu erhalten. Die Reaktionszeiten waren nämlich mit der Schlafdauer signifikant erniedrigt.

Tassi 2013

Die Studie mit demselben Kollektiv wie Tassi 2010b untersucht die Fragestellung, inwieweit langfristige Belastung mit Bahnlärm Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit hat und inwieweit es in dieser Beziehung einen Gewöhnungseffekt gibt. Versuchsteilnehmer, die in der Nähe von Bahnstrecken leben, wurden mit Probanden, die in ruhiger Umgebung wohnen, unter diesem Aspekt verglichen. Dazu wurden sie im Schlaflabor für drei Nächte (eine Eingewöhnungsnacht, eine ruhige Kontrollnacht und eine bahnlärmbelastete Nacht) untersucht. Die kognitive Leistungsfähigkeit wurde mit einem neurophysiologischen Test, dem so genannten (modifizierten) Attention Network Test (ANT) gemessen. Mit diesem Test soll es möglich sein die 3 Komponenten der Aufmerksamkeit (Wachsamkeit, Orientierung und exekutive Kontrolle) separat zu bewerten. Der Test selbst besteht aus einer gezielten Kombination von Warntönen, Hinweisreizen und ablenkenden Reizen (Distraktoren) während der Durchführung einer Wahlreaktionsaufgabe, die auf einem Computermonitor präsentiert wird. Ausgewertet wurden die Schnelligkeit und die Fehlerhäufigkeit beim Lösen der Aufgabe. Vor dem Aufmerksamkeitstest wurde bei den Probanden ein EEG im Wachzustand erstellt, um möglichst objektiv deren Schläfrigkeit festzustellen. Nach dem Ausschluss von

Artefakten wurden Leistungsdichtespektren für die unterschiedlichen Frequenzbereiche im EEG (Delta-, Theta-, Alpha-, Beta-Wellen) erstellt. Die Leistungsdichtespektren aus dem EEG werden von den Autoren als guter Marker einer objektiven Tagesschläfrigkeit gesehen. Weder die kognitive Leistungsfähigkeit noch die durch das EEG objektivierte Schläfrigkeit wurden akut durch eine lärmbelastete Nacht beeinflusst. Deutliche Unterschiede zeigten sich aber zwischen den Gruppen der Probanden, die aus unterschiedlich lärmbelasteten Gebieten stammten. Bis auf die Theta-Wellen wurde in allen anderen Frequenzbereichen eine signifikante Zunahme der spektralen Leistungsdichte bei EEGs von Personen aus lärmbelasteten Gebieten festgestellt. Die Autoren werten dies als objektiven Befund der Tagesschläfrigkeit bei bahnlärmexponierten Personen und finden im chronischen Schlafmangel eine mögliche Erklärung. Auch in dem kognitiven Leistungstest zeigten sich signifikante Unterschiede. Die mittlere Reaktionszeit im ANT lag unabhängig von Hinweisreizen und der Tageszeit der Testdurchführung bei Personen aus bahnlärmbelasteten Gegenden höher als bei Probanden die in ruhiger Umgebung wohnten. Insbesondere wenn eine Aufgabe nicht durch Warntöne angekündigt war, machten chronisch bahnlärmbelastete Personen eher Fehler bei der Durchführung. Ebenso zeigte sich im psychomotorischen Vigilanztest eine verlängerte Reaktionszeit dieser Personengruppe. In ähnlich aufgebauten Studien (Möhler 2000a, 2000b, Elmenhorst 2012) wird dieser Effekt jedoch nicht so deutlich gesehen. Interessant ist, dass diese Leistungsdefizite sich nicht in der subjektiven Einschätzung der Versuchspersonen widerspiegeln, diese Gruppe sich also ihres Leistungsdefizits nicht bewusst ist.

Elmenhorst 2013

Es handelt sich hierbei um eine weitere Veröffentlichung der Studie die von Basner 2011 publiziert wurde. Es werden die gleichen Daten zur Leistungsfähigkeit ausgewertet. In der Diskussion wird darauf hingewiesen, dass eine ruhige Nacht nicht ausreicht, sich hinreichend zu erholen, um Nachwirkungseffekte lärmbelasteter Nächte im psychomotorischen Vigilanztest (PVT) auszugleichen.

Zwischenfazit

In den Leistungstests konnte bisher kein schlüssiger Zusammenhang zwischen Bahnlärmbelastung und vermindertem Leistungsvermögen nachgewiesen werden. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und bedeuten nicht, dass es tatsächlich zu keinen Leistungseinbußen kommt. So ist es möglich, dass die ausgewählten Leistungstests nicht die entscheidenden Zielvariablen wie z. B. exekutive Funktionen abdecken. Auch können durch eine erhöhte

kognitive Anstrengung Leistungseinbußen im Test kompensiert werden. Diese zusätzliche Anstrengung könnte sich wiederum bei gegenüber Bahnlärm exponierten Menschen in einem erhöhten Belästigungsempfinden widerspiegeln. Auch wurde in den meisten Fällen nur eine geringe Probandenzahl erfasst und die Effekte einer chronischen Lärmexposition nicht untersucht. So zeigt die neuere Studie von Tassi 2013, dass es zu Leistungseinbußen nach chronischer Bahnlärmexposition kommen kann. Diese Studie sollte aber durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Die chronische Bahnlärmbelastung am Wohnort der Studienteilnehmer wurde hier mit $L_{eq(8h)} = 39 \pm 1,22 \text{ dB(A)}$ in der lärmbelasteten Gruppe und mit $L_{eq(8h)} = 31,4 \pm 1,2 \text{ dB(A)}$ in der Kontrollgruppe abgeschätzt.

3.3 Neuere mechanistische Studien zur Lärmwirkung allgemein (nicht speziell zu Bahnlärm)

Tabelle 5 zeigt die Übersicht über die ausgewertete Literatur zu neueren mechanistischen Studien.

3.3.1 Einfluss des Alltagslärms auf die Herzfrequenzvariabilität

Kraus 2013

In einer neueren Studie (Kraus 2013) wurde der Einfluss des Lärms während täglicher Routineaktivität auf die Herzfrequenz untersucht. Insbesondere wurde die Variabilität der Herzfrequenz näher untersucht, um den Mechanismus der Beeinflussung der Reaktion des Herzens genauer zu charakterisieren. Eine verringerte Herzfrequenzvariabilität wird in der Medizin als Risikofaktor für kardiovaskuläre Ereignisse gesehen.

Im Hinblick auf ihre Zeitskala lassen sich Schwankungen der Herzfrequenz durch Fourier-Analyse (Spektralanalyse) näher charakterisieren. Diese Analyse kann, wie nachfolgend erläutert, genutzt werden, um den Einfluss des autonomen Nervensystems auf die Herzfrequenzvariabilität abzuschätzen. Signale des Sympathikus führen verzögert zu Reaktionen am Herzen, während der Parasympathikus für die vergleichsweise schnelle Regulation verantwortlich ist. Am Sinusknoten sind jedoch immer Parasympathikus und Sympathikus gleichzeitig aktiv, es entsteht eine Mischung aus langsamen (bradykarden), durch den Parasympathikus verursachten, und schnellen (tachykarden), durch den Sympathikuseinfluss bedingten, Herzrhythmen. Dieses Zusammenspiel macht wesentliche Teile der Herzratenvariabilität aus. In der Spektralanalyse ist das höher frequente HF-Band („schnelle Regulation“) daher parasympathisch dominiert, das niederfrequente LF-Band eine Mischung aus beiden Komponenten und weiteren Einflüssen. Eine Erhöhung des LF/HF-Quotienten deutet somit auf einen erhöhten Sympathikustonius oder verminderten Parasympathikustonius hin.

In der Studie wurde die durchschnittliche Lärmexposition in Fünf-Minuten-Intervallen ins Verhältnis zur Herzfrequenz und Herzratenvariabilität gesetzt. Die Herzfrequenz und der LF/HF-Quotient erhöhten sich im Bereich unterhalb von 65 dB(A) lärmabhängig. Der steigende LF/HF-Quotient ist mit einer Abnahme des parasympathischen Einflusses oder einer Steigerung der Einwirkung des Sympathikus auf das Herz erklärbar. Die gleichzeitige Abnahme der Leistung im LF-Band und HF-Band spricht jedoch für eine Reduktion der Parasympathikuswirkungen. Für die geringeren Schallpegel unter 65 dB(A) liegen diese Ergebnisse auf einer Linie mit denen von Graham 2009. Zu beachten ist jedoch, dass in der Arbeit von Graham 2009 der Einfluss des Lärms auf den Nachtschlaf betrachtet wurde. Während des nächtlichen Schlafs ist im Vergleich zum Wachzustand der Sympathikustonuss reduziert und der Einfluss des Parasympathikus ausgeprägter, so dass der Einfluss der Lärmbelastung auf das Herz über das autonome Nervensystem während des Schlafs und im Wachzustand nicht direkt vergleichbar ist. Für größere Schallpegel über 65 dB(A) zeigen sich andere Wirkungen des autonomen Nervensystems. Steigt in diesem Bereich die Lärmbelastung weiter an, so erhöht sich auch das Leistungsdichtespektrum des HF-Bandes. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass die parasympathische Aktivität zunimmt. Die gleichzeitige Erhöhung der Herzfrequenz sowie der direkte Anstieg im Leistungsdichtespektrum des LF-Bandes sprechen dafür, dass ein erhöhter Sympathikustonuss die parasympathische Modulation übersteigt. Dieser Sympathikuseinfluss führt dann auch zu einer geringeren Herzfrequenzvariabilität.

Die Mechanismen der Beeinflussung des Herzens durch das autonome Nervensystem unterscheiden sich in dieser Studie somit bei hohem und niedrigem Lärmpegel. Die Veränderung der Herzfrequenzvariabilität bei geringer Lärmbelastung beruht auf einem Rückgang des parasympathischen Einflusses. Bei höheren Schallpegeln, bei denen eine weitere Zunahme der Schallpegelbelastung als besonders anstrengend empfunden werden kann, ist eine Verminderung der Herzfrequenzvariabilität zu beobachten. Dies kann laut den Autoren der Studie, auf den erhöhten Sympathikustonuss sowie die Ausschüttung von Stresshormonen zurückzuführen sein. Langfristig kann eine eingeschränkte Herzfrequenzvariabilität ein erhöhtes kardiovaskuläres Risiko bedeuten.

In dieser Studie wird nicht explizit der Bahnlärm untersucht. Für den betrachteten Untersuchungsgegenstand, die physiologischen Wirkungen des Bahnlärms, ist die Studie dennoch wertvoll. Sie zeigt, dass über die Störung der nächtlichen Erholungsphase hinaus auch die alltägliche Lärmbelastung, insbesondere im Bereich hoher Lautstärken, das Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen erhöhen kann.

3.3.2 Fluglärm und endotheliale Dysfunktion

Schmidt 2013

In einer neueren Studie zu Mechanismen der Lärmwirkungen wurde als primärer Endpunkt der Einfluss von nächtlichem Flugverkehrslärm auf die endotheliale Funktion gemessen. Die Probanden wurden zunächst in ihrer gewohnten häuslichen Umgebung belassen und mit Fluglärm beschallt. In zufälliger Reihenfolge gab es eine ruhige Nacht, eine Nacht mit 30 und eine Nacht mit 60 Lärmereignissen. Mit einem portablen Gerät wurden ein Elektrokardiogramm, die Sauerstoffsättigung des Blutes, ein Aktigramm, die Lichtverhältnisse im Schlafraum und abgeleitete Parameter aufgezeichnet. Einer der abgeleiteten Parameter ist die Pulswellenlaufzeit. Nach der Nacht zu Hause wurde im Labor Blut für die Labordiagnostik abgenommen und die endotheliale Funktion mit der flussabhängigen Dilatation (Flow-mediated dilatation FMD) bestimmt. Dazu wird kurzzeitig der Blutfluss im Oberarm mit einer Manschette abgeschnürt. Nach der Wiederdurchblutung (reaktive Hyperämie) kommt es zu einer Scherkraft-vermittelten Erweiterung (Dilatation) der vorgeschalteten (vor der Manschette liegenden) Leitungsarterie, hier der A. brachialis. Die Dilatation der Arterie wird durch Ultraschall gemessen und so die FMD bestimmt. Die FMD wird fast ausschließlich durch Stickstoffmonoxyd (NO) vermittelt und gilt als nicht-invasiver, spezifischer Standardtest der Endothelfunktion. Eine gestörte Endothelfunktion, die sich in einer verminderten FMD zeigt, wird mit der Entwicklung arterieller Hypertension (Bluthochdruck) und Arteriosklerose in Verbindung gebracht und ist somit ein Risikofaktor für kardiovaskuläre Ereignisse.

Im einfachen statistischen Standardvergleichstest ANOVA zeigte sich kein signifikanter Effekt des Lärms auf die FMD. Wurden jedoch alle drei Lärmniveaus miteinander verglichen und betrachtet die Lärmexposition als pseudokontinuierliche Kovariable, so ergab sich für die lineare Beziehung zwischen Lärmexposition und verminderter, gestörter FMD eine Signifikanz. Die Autoren gingen der Frage nach, inwieweit oxidativer Stress bei der Entstehung der endothelialen Dysfunktion eine Rolle spielt. Oxidativer Stress ist durch die exzessive Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (wie z. B. dem Hydroxylradikal), die durch endogene antioxidative Mechanismen nicht mehr inaktiviert werden können, gekennzeichnet.

Tabelle 5: Übersicht über die ausgewertete Literatur zu neueren mechanistischen Studien
Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Erstautor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik		
				a) Studientyp	b) Zielgruppe	c) Messmethode
Kraus	2013	Alltagslärm Individuelle Expositionsmessung Niedriger belastete Gruppe Leq < 65 dB(A) Durchschnitt Leq = 60,4 dB(A) Höher belastete Gruppe Leq > 65 dB(A) Durchschnitt Leq = 77,3 dB(A)	Herzfrequenz Herzfrequenzvariabilität Analyse der Herzfrequenzvariabilität	Feldstudie mit Expositionsmessung im Alltag Dauer 6 h	110 Teilnehmer Davon 69 Männer Durchschnittsalter 61,3 Jahre	Portables EKG und Schallmessgerät
Schmidt	2013	Fluglärm 3 Lärmniveaus Maximaler Schallpegel: Kontrolle 49,6 dB(A) 59,9 dB(A); 60,9 dB (A) Äquivalente Schallpegel: Kontrolle 35,4 dB(A) 43,1 dB(A); 46,3 dB(A)	Endotheliale Dysfunktion Stresshormone Entzündungsmarker Fettstoffwechsel Herzreaktion	Exposition per Lautsprecher im häuslichen Umwelt Weitere Messungen im Labor (FMD)	75 Gesunde junge Erwachsene 61% Frauen (Durchschnitt 26 Jahre)	Flow-mediated dilatation „flussabhängige Dilatation“ Adrenalin, Cortisol, IL-6, C-reactive Protein HDL, LDL, Triglyceride, Pulse transit time “Pulswellenlaufzeit” Herzfrequenzbeschleunigung
Croy	2013	Bahnlärm Lauteste Nacht: Lmax = 49,8 dB(A) Leq = 45,6 dB(A) und Vibrationen	Herzfrequenz Herzfrequenzvariabilität Schlafstruktur	Laborstudie Bahnlärm und Vibration	24 Probanden 11 Männer	Polysomnografie Elektrokardiografie

Dieser oxidative Stress kann zur verstärkten Inaktivierung des Stickstoffmonoxids führen, das so seine Rolle als Signalmolekül der Vasodilatation nicht mehr erfüllen kann. Ascorbinsäure (Vitamin C) ist ein Radikalfänger und Reduktionsmittel und kann oxidativem Stress entgegenwirken. Eine Unter-gruppe von 5 Probanden erhielt 2 g Vitamin C. Nach 2 Stunden wurde die FMD gemessen. Die FMD war gegenüber der Kontrollgruppe verbessert (Signifikanz $P = 0,017$). Dies ist für die Autoren ein Indiz, dass oxidativer Stress bei der Lärmwirkung auf die Gefäßfunktion eine Rolle spielt. Wie der Lärm diesen oxidativen Stress in den Blutgefäßen direkt auslösen könnte, erörtern die Autoren nicht. Als abgeleitete Größe wurde die Pulswellenlaufzeit (Pulse Transit Time PTT) bestimmt. Das ist die Zeit, die eine Pulswelle benötigt, um eine bestimmte Strecke im Gefäßsystem zurückzulegen. Hier wurde die Strecke vom Herzen zum Zeigefinger gewählt und die Zeit zwischen der R-Zacke (EKG-Maximum) und dem Signal am Pulsoxymeter am Zeigefinger gemessen. Die Autoren berichten von einer signifikanten Abnahme der Pulswellenlaufzeit. Je höher der Blutdruck, desto kürzer sind die Pulswellenlaufzeiten. Die Pulswellenlaufzeit kann also, bei entsprechender Kalibrierung, über kurze Zeit-räume zur Abschätzung des Blutdrucks dienen. Der mittlere systolische Blutdruck war in dieser Studie allerdings nicht signifikant verändert.

Es wird von den Autoren diskutiert, dass die Pulswellenlaufzeit ein Maß für die Versteifung der Arterien darstellt. Über Pulswellengeschwindigkeiten, die in der Fachliteratur auch als Marker für Gefäßsteifigkeit erwähnt werden, wird in der Veröffentlichung nicht berichtet. Diese waren wahrscheinlich nicht mit den portablen Messgeräten zu Hause bei den Versuchsteilnehmern messbar. Auch könnte mit weitergehender Analyse der Pulswellen ein Augmentationsindex gemessen werden, der als weiterer Marker für eine endotheliale Dysfunktion gilt und die mit der FMD gewonnenen Daten stützen könnte. Der Augmentationsindex zeigt das Ausmaß der Pulswellenreflexion an, das durch die Druckerhöhung der reflektierten Pulswelle quantifiziert wird. Die Pulswellenreflexion ist wiederum u. a. von der Endothelfunktion abhängig. Eine durch die Lärmbelastung von 1-2 Nächten ausgelöste endotheliale Dysfunktion (wie in der Studie beschrieben) sollte zunächst durch weitere Untersuchungen untermauert werden.

Von den Parametern der Labordiagnostik (u. a. Cortisol, die Entzündungsmarker Interleukin-6, C-reaktives Protein, die Parameter des Fettstoffwechsels Gesamtcholesterin, HDL, LDL, Triglyceride) war nur Adrenalin nach lärmbelasteten Nächten erhöht. Von den Autoren wird angeführt, dass es sich bei den Probanden um junge gesunde Erwachsene handelt und somit die physiologischen Reaktionen anderer Bevölkerungsgruppen nicht abzuschätzen sind. Die Endothel-unabhängige Vasodilatation wurde nicht abgeschätzt, da die Test-

substanz Nitroglycerin (die exogen, nicht-körpereigenes NO bereitstellt) nicht so verträglich war, dass sie von den Probanden akzeptiert wurde.

In der vorliegenden Studie konnten nur akute Effekte erfasst werden. Offen ist daher die Frage, ob es mittelfristig zu einer Gewöhnung an die Lärmbelastung kommt. Weiterhin wäre zu klären, ob diese kurzfristigen Effekte des Lärms auf die endotheliale Funktion langfristig zu Herz-Kreislaufkrankungen führen. Bei endothelialer Dysfunktion anderer Genese (z. B. durch bestehenden Bluthochdruck) wird dies als Anfangsstadium von kardiovaskulären Ereignissen gesehen.

Zwischenfazit

Die genannten Studien beleuchten bisher nicht untersuchte Aspekte der (Bahn-)Lärmbelastung und tragen so zur Aufklärung von Ursache-Wirkungsbeziehungen von möglichen Gesundheitsschäden durch (Bahn-)Lärm bei.

Gesamtwzwischenfazit akute physiologische Wirkungen von Bahnlärm (Kap. 3.1 bis 3.3)

Für die Lärmquelle Bahnlärm bestätigen die Untersuchungen viele Ergebnisse aus der Lärmwirkungsforschung mit anderen Lärmarten. Die Störung des Schlafes (Aufwachen) und der Schlafstruktur durch Bahnlärm wurde durch Labor- und inzwischen auch durch Feldstudien belegt. Nachgewiesen werden konnte auch die Modulation des autonomen Nervensystems, insbesondere in Bezug auf seinen Einfluss auf das Herz.

Nicht schlüssig konnte ein Einfluss des Bahnlärms auf die Stresshormonkonzentration belegt werden. Auch signifikante Leistungseinbußen nach kurzzeitiger Bahnlärmbelastung ließen sich mit den verwendeten Tests im Allgemeinen nicht aufzeigen. Möglicherweise könnten hier Tests höherer kognitiver Funktionen klarere Ergebnisse liefern. Vielleicht ist auch eine kompensatorisch größere Anstrengung der lärmbelasteten Versuchsteilnehmer für die nicht eindeutigen Ergebnisse verantwortlich. Die akuten physiologischen Wirkungen des Bahnlärms haben für sich genommen noch keinen Krankheitswert. Bei dauerhafter Lärmexposition können sie jedoch zu krankhaften (pathologischen) Veränderungen führen, die sich in chronischen Krankheiten manifestieren können.

3.4 Langfristige Effekte

3.4.1 Herz-Kreislaufkrankungen

Hintergrund

In Europa zählen Herz-Kreislaufkrankungen zu den häufigsten Todesursachen. Neben Rauchen und Bewegungsmangel sind Blutzucker- und Fettstoffwechselstörungen sowie Bluthochdruck wesentliche Risikofaktoren. Als bedeutendster Umweltstressor neben der Luftverschmutzung begünstigt bzw. verstärkt Verkehrslärm die Wirkung dieser Risikofaktoren und trägt so erheblich zur umweltbezogenen Krankheitslast bei.

Das Umweltbundesamt (UBA) geht davon aus, dass etwa 13 Millionen Bewohner Deutschlands verkehrslärmbedingt einem erhöhten Risiko ausgesetzt sind, eine ischämische Herzerkrankung zu entwickeln. Unter diesem Begriff werden alle Erkrankungen aufgrund mangelnder Durchblutung des Herzmuskels einschl. Herzinfarkte gefasst. Es wird geschätzt, dass ca. 2-3% der ischämischen Herzerkrankungen auf Verkehrslärm insgesamt zurückgehen (Babisch 2002). Dabei wird angenommen, dass oberhalb eines Immissionspegels von tagsüber 65 dB(A) und nachts 55 dB(A) jeweils außerhalb der Wohnungen das Risiko für eine Erkrankung wesentlich ansteigt. Gegenüber den Ergebnissen früherer Untersuchungen lassen neuere Studienergebnisse keinen Schwellenwert für eine Risikoerhöhung erkennen. Dies bedeutet, dass schon bei relativ niedrigen Schallpegeln geringfügig erhöhte Herz-Kreislauf-Risiken bestehen. Die WHO kommt zu dem Schluss, dass Umweltlärm in Bezug auf die Gruppe der ischämischen Herzerkrankungen für den Verlust von mindestens 3% gesunder Lebensjahre („disability adjusted life-years“) in Europa verantwortlich ist (WHO 2009, 2011).

Wirkmechanismen

Lärm aktiviert entweder direkt oder indirekt unter Beteiligung des zentralen Nervensystems das vegetative (sympathische) Nervensystem und das hormonelle (endokrine) System. In der Folge kommt es zu Regulationsstörungen im Stoffwechselverhalten und, wenn Belastungen anhalten, auch zu veränderten Werten messbarer biologischer Risikofaktoren, die für die Entstehung von Herzkreislaufkrankungen bedeutsam sind (z.B. Blutzuckerspiegel).

Im Wirkungsgefüge der psycho-physiologischen Regelkreise wird zwischen Stressindikatoren (z.B. Cortisol als Stress-Hormon), Risikofaktoren (z.B. erhöhter Blutdruck, ungünstige Blutfettzusammensetzung) und manifesten Krankheiten (z.B. Herzinfarkt) unterschieden.

Wie chronische Lärmbelastung dabei die Entwicklung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen fördert, folgt einer bewusst nicht steuerbaren körperlichen Reaktionskette, Diese Reaktionskette basiert auf dem Schema der „Kampf-Flucht-Reaktion“ und diente ursprünglich der bestmöglichen Abwehr von körperlichen Gefahren, die sich aus ungewohnten Geräuschen ergeben könnten. Der Körper stellt sich auf Kampf oder Flucht ein, stellt Energiereserven zur Verfügung, unterbindet die für Flucht oder Kampf nicht nötigen körperlichen Funktionen.

Bei Kampf oder Flucht werden nun die bereitgestellten Energiereserven aktiv verbraucht, in der nachfolgenden Ruhephase werden die Speicher wieder aufgefüllt und der kurzzeitig bestehende „Stress“ wieder zurückgeführt.

Auch Lärm, direkt oder indirekt wirkend, empfindet der Körper als Stress (Lärmstress) und reagiert autonom nach dem archaischen „Kampf- oder Flucht-Muster“, jedoch bauen sich im Falle des Arbeits- und/oder Umgebungslärms die im Rahmen der „Kampf-Flucht-Reaktion“ vom Körper bereitgestellten „Energieförderer“, wie z.B. Blutzucker und Blutfette, mangels fehlender bzw. nicht ausreichender körperlicher Aktivitäten nicht rasch ab.

Das führt bei chronischer Lärmbelastung ohne ausreichende Lärmpausen und mangelnder körperlicher Aktivität, als Folge der andauernden Dysregulation, zu letztlich dauerhaft erhöhten Blutspiegeln dieser Stoffe. Die Folgen wiederum sind Arteriosklerose durch Gefäßwandveränderungen und später Gefäßverschluss. Letztlich kann dies zum Herzinfarkt oder Schlaganfall (Apoplex) führen.

Eine weitere „Stressfolge“ ist eine vermehrte Herzaktion (das Herz schlägt schneller als Folge der Ausschüttung von Adrenalin und Noradrenalin) und der Blutdruck steigt.

Der erhöhte Blutdruck (Hypertonie) treibt dann die negativen Gefäßwandveränderungen weiter voran. Das schneller schlagende Herz benötigt raschen Nachschub der „Energieförderer“ über das Blut. Bei verengten Gefäßen am Herzen gelingt dies nicht ausreichend. Folge: Angina pectoris-Beschwerden (Brustkorb-Engegefühl) als erstes Warnzeichen eine Herzgefäß-Krankheit, einer koronaren Herzkrankheit (KHK). Wie chronische Lärmbelastung dabei die Entwicklung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen beeinflussen kann, zeigt Abbildung 2 das bereits erwähnte (vereinfacht) Schema von Babisch (2002):

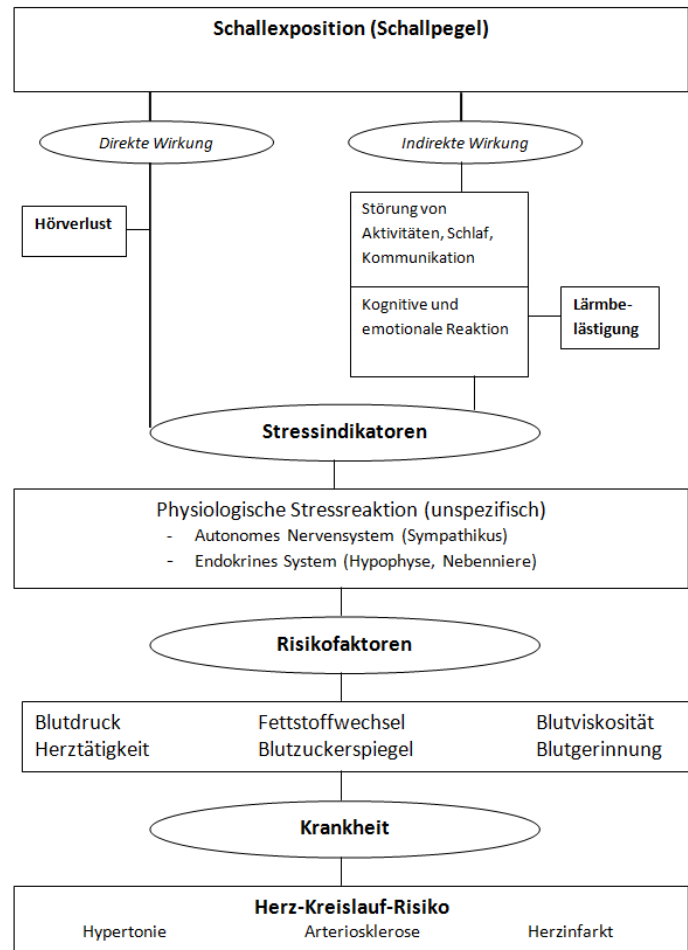
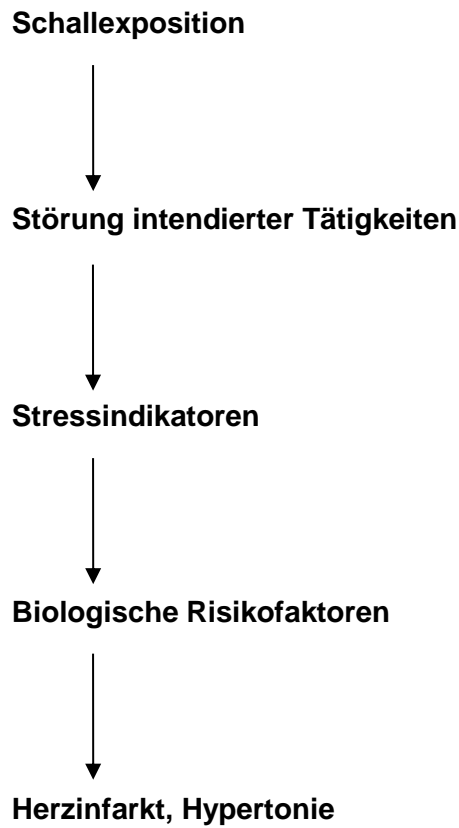


Abbildung 2

Quelle: Babisch, 2002

3.4.2 Originalarbeiten

3.4.2.1 Endpunkt Herz-Kreislaufferkrankungen

In Tabelle 6 sind die hier ausgewerteten Originalarbeiten zu langfristigen Effekten von Bahnlärm - insbesondere zu Herz-Kreislaufferkrankungen - zusammengefasst.

Tabelle 6: Originalarbeiten - langfristige Effekte – Herz-Kreislaufkrankungen

Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Erstautor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik	Bemerkungen
Eriksson	2012	Verkehrsbelastung (gefährte Fahrzeug-km pro Jahr 500 m um Wohnadresse); in Teilkollektiv: Lärmbelastung aus Lärmkartierung	kardiovaskuläre Erkrankungen	Querschnittstudie; retrospektiv	Verwendung nationaler Gesundheits-Survey-Daten aus 2007
Sørensen	2011b	Straßen- und Bahnverkehrslärm (berechnet)	Blutdruck (Messungen)	Kohortenstudie	Berücksichtigung Luftschadstoffe
Dratva	2012	Bahn- und Straßenverkehrslärm (aus Lärmdatenbank)	Blutdruck (Messungen)	Kohortenstudie	SAPALDIA-Studie, Schweiz
Rüdiger	2008	Bahnlärm	Schlafmittel-Gebrauch (Krankenversicherungs-Daten)	Querschnittstudie	ALPNAP-Studie
Lercher	2010	Bahn- und Straßenverkehrslärm (modelliert)	Schlafmittel-Gebrauch (Fragebogenangaben)	Querschnittstudie	ALPNAP-Studie
Bluhm	1998	Bahnlärm	Bluthochdruck (Fragebogenangaben)	Querschnittstudie	

Eriksson 2012

Die Autoren untersuchten im Rahmen einer bevölkerungsrepräsentativen Querschnittsstudie in sieben Regionen Schwedens, ob Hypertonie und kardiovaskuläre Erkrankungen bei Erwachsenen (N=25.851) in Zusammenhang mit der Verkehrsbelastung stehen. Eingeschlossen waren Personen im Alter von 18-80 Jahren, die zuvor mindestens 5 Jahre lang in Schweden gelebt hatten. Individuelle Angaben zu ärztlich diagnostizierter arterieller Hypertonie, zu Erkrankungen der Herzkranzgefäße und zu diesbezüglich relevanten Einflussfaktoren und Confoundern wurden dem nationalen Umwelt- und Gesundheits-Survey des Jahres 2007 entnommen. Spezielle Blutdruckmessung während der Durchführung der Studie erfolgte nicht. Die Survey-Daten wurden um staatliche Registerdaten zu Wohnadresse, Geburtsland, Einkommen und Bildungsstatus ergänzt. Die Verkehrsbelastung wurde für jede Person als gefahrene Fahrzeug-Kilometer pro Jahr innerhalb eines 500m Radius um die jeweilige Wohnadresse erfasst. Für ein großstädtisches Teilkollektiv des Surveys (N=2.498) aus den Städten Stockholm, Malmö und Göteborg standen Lärmkartierungen entsprechend den Standards der europäischen Umgebungslärmrichtlinie zur Verfügung. Dies ermöglichte eine kleinräumige, nach Straßen- und Bahnlärm differenzierte Bestimmung der Lärmbelastung, so dass die individuelle Exposition an der jeweils am stärksten belasteten Fassadenseite der jeweiligen Wohnung bestimmt werden konnte. Als Maß dienten mittlere A-gewichtete, 24h-äquivalente, Schalldruckpegel (L_{den} , dB(A)). Die Schalldruckpegel wurden mit einem Zuschlag von 5 dB(A) während der Abendstunden (19.00-23.00 Uhr) und 10 dB(A) während der Nacht (23.00-07.00 Uhr) gewichtet und in dB(A)-Klassen mit jeweils 5 dB(A) Klassenbreite kategorisiert. Um konkurrierende Effekte auf die Zielgrößen durch Luftschadstoffbelastungen bei der statistischen Analyse abgrenzen zu können, wurden die wohnadressenspezifischen Immissionsbelastungen für PM₁₀ und NO₂ berechnet.

Für die Berechnungen wurde das Gesamtkollektiv anhand der Daten zur Verkehrsbelastung in Quintile aufgeteilt, mit dem untersten Quintil als Referenz. In Bezug auf das großstädtische Teilkollektiv erfolgte die Kategorisierung der Exposition in „Schalldruckpegel-Klassen“ von <50, 50-54, 55-59, 60-64 und ≥ 65 dB(A) mit der untersten Belastungsgruppe als Referenz. Für die auf Schienenlärm bezogenen Berechnungen wurden aufgrund zu geringer Besetzungszahlen die beiden oberen Belastungsklassen zusammengefasst. Folgende a priori relevante Einflussgrößen und Confounder fanden Berücksichtigung: Alter, Geschlecht, Bildungsstatus, Geburtsland, Rauchen, Außenluftexposition gegenüber NO₂ und PM₁₀ und die geografische Region.

Die Lärmbelastung im großstädtischen Teilkollektiv lag bei 57 dB(A) L_{den} für Straßenverkehr und 43 dB(A) L_{den} für Bahnverkehr. Personen, die mit 50 dB(A) L_{den} und höher belastet

waren, hatten insgesamt einen höheren Bildungsstatus, waren häufiger gebürtige Schweden und waren höher durch Luftschadstoffe belastet im Vergleich zu Personen die unter 50 dB(A) L_{den} lärmbelastet waren. Während die Autoren eine klare Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen L_{den} und subjektiver Lärmbelastigung bzw. Schlafstörungen fanden, war ein entsprechender Zusammenhang mit Hypertonie und kardiovaskulären Erkrankungen nicht erkennbar. Insgesamt ergaben sich im großstädtischen Teilkollektiv niedrigere Prävalenzen für Hypertonie (17%) und kardiovaskuläre Erkrankungen (7%) im Vergleich zum Gesamtkollektiv (21% bzw. 10%).

Die Ergebnisse der multiplen logistischen Regressionsanalysen ergaben für die Straßenverkehrslärmpegel L_{den} keinen signifikanten Zusammenhang mit den Prävalenzen für Hypertonie und kardiovaskuläre Erkrankungen, während durch Bahnlärm höher belastete Anwohner (> 50 dB(A) L_{den}) ein grenzwertig signifikant erhöhtes Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen aufwiesen (prävalentes OR=1,55, 95% KI 1,00-2,40). Zu den Prävalenzen für Hypertonie bestand kein Zusammenhang. Weder NO_2 noch PM10 waren mit den Zielvariablen assoziiert, nach Adjustierung und Einschluss in die Regressionsmodelle zeigte sich kein Einfluss auf die Effektstärke der Lärmpegel.

Ähnlich wie andere Studien zeigt auch diese, dass sich der Effekt des Verkehrslärms auf Erkrankungen der Blutdruckregulation von gleichgerichteten Effekten der Luftbelastungen wie z.B. Dieselruß durch statistische Analyse trennen lässt, wenn für verschiedene konkurrierende Einflussgrößen und Confounder adjustiert wird. Den fehlenden Effekt des Verkehrslärms erklären die Autoren mit methodischen Problemen, bei modellierten Expositionsdaten eine ausreichende Trennung der Effekte durch multivariate Regressionsanalysen zu erreichen.

Eine Limitierung der Studie liegt darin begründet, dass Daten zu einigen a priori relevanten Einflussgrößen sowohl für Hypertonie als auch für kardiovaskuläre Erkrankungen in den Survey-Daten nicht zur Verfügung standen. Dazu gehören körperliche Aktivität, Ernährung, Body-Mass-Index und familiäre bzw. genetische Faktoren. Die Autoren schließen daher residuales Confounding nicht mit Sicherheit aus. Wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse dürfte dies allerdings kaum haben.

Sørensen 2011b

Bei dieser Studie stand die Frage im Mittelpunkt, ob chronischer Straßenverkehrs- und Bahnlärm den Blutdruck der Allgemeinbevölkerung erhöht und ein Risiko für manifeste Hypertonie darstellt. Expositionen gegenüber Luftbelastungen sollten berücksichtigt werden. Das Studienkollektiv (N=57.053) ist Teil einer großen dänischen Kohortenstudie aus der

Region Kopenhagen und Aarhus (Danish Diet and Cancer and Health Cohort). Die zum Zeitpunkt der Aufnahme in die Studie in den Jahren 1993-1997 50-64 jährigen Personen wurden mittels standardisiertem Fragebogen u.a. auf bestehende und in der Vergangenheit aufgetretene Hypertonie und die Einnahme blutdrucksenkender Medikamente befragt. Die individuelle Lärmexposition an der jeweiligen Wohnadresse wurde für die 5 Jahre, die der Aufnahme in die Studie vorausgingen, und eine 5-jährige Beobachtungsphase bis 2000-2002 berechnet. Die Schalldruckpegel wurden wohnadressengenau für die jeweilige Gebäudefassade bestimmt. Grundlage waren Lärmkartierungen angelehnt an die Standards der europäischen Umgebungslärmrichtlinie. Für Straßenverkehrslärm wurden A-gewichtete, kontinuierliche und tageszeitlich gewichtete Schalldruckpegel ($L_{aeq,24h}$, L_{den} , dB(A)) als Expositionsmaß berechnet.

Im Gegensatz zum Straßenverkehrslärm gehen die Autoren bei Bahnlärm von konstanten Lärmpegeln aus und begründen dies mit fehlenden Veränderungen in Zusammensetzung und Ausmaß des Schienenverkehrs. Die Werte aus den Jahren 1993 - 2000 wurden als repräsentativ für die gesamte Studienperiode (1992 - 2002) angenommen. Auch hier wurden Schallschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt. Für Bahnlärm berücksichtigt das Modell Expositionen erst ab 60 dB(A) bis 80 dB(A). Es bleibt unklar, ob hier analog zum Straßenverkehrslärm ein Zuschlag für die Zeitspanne Abendstunden bzw. Nacht vorgenommen wurde. Personen, die zusätzlich >50 dB(A) Fluglärm ausgesetzt waren, waren von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Teilnehmer, die bei Aufnahme oder zuvor blutdrucksenkende Medikamente eingenommen hatten (N= 6285), wurden nicht in die Zusammenhangsanalyse einbezogen.

Um die Einflüsse durch Luftschadstoffe berücksichtigen zu können, wurden Jahresmittelwerte für NO_x für jede Wohnadresse modelliert. Dies berücksichtigt lokale (straßenbezogene), urbane und überregionale Belastungen. NO_x zeigte sich dabei als hochkorrelierend mit der kleinräumigen Verteilung von Feinstaub PM10 und der gesundheitsrelevanten Partikelanzahlkonzentration.

Probanden mit niedriger Belastung durch Straßenverkehr hatten einen höheren Sozialstatus, rauchten weniger, waren körperlich aktiver, geringer luftschadstoffbelastet und auch weniger durch Bahnlärm belastet. Straßenverkehrslärm war mit der Erhöhung des systolischen Blutdrucks, nicht aber mit dem diastolischen Blutdruck oder Bluthochdruck assoziiert. Die Effekte waren stärker für Männer und für ältere Personen. Bahnlärm über 60 dB(A) war mit der Zunahme von Bluthochdruck assoziiert.

Dratva 2012

In dieser Studie, basierend auf der schweizerischen Kohortenstudie „Air Pollution and Lung disease in Adults“ (SAPALDIA), untersuchten die Autoren im Rahmen der zweiten Befragung (SAPALDIA 2) bei N=6450 Erwachsenen (Altersspanne 18-60 Jahre, MW=52 Jahre) die langfristigen Auswirkungen von chronischem Bahn- und Straßenverkehrslärm auf den Blutdruck. Ein weiteres Ziel war es, potenziell sensible Gruppen für lärmbedingte Blutdruckeffekte zu identifizieren.

Die Individuelle Exposition wurde auf Basis einer nationalen Datenbank (SONBASE) zur räumlichen Verteilung der Schienen- und Straßenverkehrslärmbelastung während der Tages- (06 - 22 Uhr) und Nachtzeiten (22 - 06 Uhr) bestimmt. Zur Evaluierung konkurrierender Einflüsse auf den Blutdruck durch die Außenluftbelastung, standen für jede Wohnadresse - bezogen auf das Vorjahr - Daten der Feinstaub (PM10) - und Stickstoffdioxid (NO₂)-Belastung zur Verfügung, die bei der Bewertung berücksichtigt wurden.

Darüber hinaus gingen zahlreiche Confounder bzw. modifizierende Einflussvariablen wie soziodemographische Variablen, Lebensstilfaktoren, Angaben zum Gesundheitsstatus und Angaben zur Lärmexposition, Gebäudecharakteristika in die Erhebungen mit ein. Der Expositions-Wirkungszusammenhang wurde auf Basis multivariater, gemischt-linearer Regressionsmodelle untersucht.

Das Untersuchungskollektiv war durchschnittlichen Straßenverkehrsbelastungen von 51 dB(A) tagsüber und 39 dB(A) nachts ausgesetzt, wobei jeweils Mittelungspegel zugrunde gelegt wurden. Die entsprechenden Belastungen durch Bahnlärm betragen im Mittelungspegel 19 dB(A) tagsüber und 17 dB(A) nachts. Die Lärmbelastungen am Tage korrelierten sehr gut mit den entsprechenden Belastungen in der Nacht. Nur geringe Korrelationen bestanden zwischen Bahnlärm- und Außenluftbelastungen durch PM10 und NO₂.

Das Gesamtkollektiv zeigte keinen Zusammenhang von Straßenverkehrslärm und gemessenen Blutdruckwerten. Dagegen ergaben sich unter chronischen Bahnlärmbelastungen - insbesondere wenn diese nachts bestehen - signifikant höhere Blutdruckwerte. Ein Anstieg der chronischen nächtlichen Bahnlärmbelastung um 10 dB(A) ging einher mit einer signifikanten Erhöhung des Blutdrucks. Effekte durch Bahnlärmbelastungen am Tage waren geringer ausgeprägt und nicht durchgehend signifikant. Teilkollektive, die über Jahre kontinuierlich an derselben Wohnadresse leben, zeigten in Relation zur Exposition stärkere Blutdruckeffekte im Vergleich zu Personen die umgezogen waren. Bei den Teilkollektiven waren die Effekte auf den Blutdruck unter nächtlichem Bahnlärm deutlicher ausgeprägt.

Die Analyse innerhalb von Teilkollektiven zeigte stärkere Effekte mit zunehmender Lärmbelastung auf den Blutdruck bei Personen, die bei Untersuchung bereits an Vorerkrankungen wie Diabetes, Bluthochdruck oder kardiovaskulären Erkrankungen litten. Dagegen fand sich im Teilkollektiv der blutdruckgesunden Personen kein signifikanter Effekt durch dauerhafte nächtliche Lärmbelastungen.

Die vorliegende Studie weist für vulnerable Gruppen mit einer umfassenden Datengrundlage und einem hochdifferenzierten Studiendesign auf einen gesundheitlich negativen Effekt von Bahnlärm in Bezug auf die Entwicklung von Bluthochdruck hin. Die Effekte sind besonders ausgeprägt, wenn eine anhaltende nächtliche Belastung vorliegt. Die Effekte sind bereits unterhalb der Schwellenwerte der Night noise guidelines der WHO (2009) erkennbar. Die Studie zeigt auch, dass nach Adjustierung für mögliche Luftschadstoffeffekte (NO₂, PM10) die Effektstärke des Bahnlärms unverändert bleibt. Die Effekte des Bahnlärms zeigen sich nicht im Gesamtkollektiv, sondern nur in der Gruppe der an Diabetes oder Arteriosklerose der Herzkranzgefäße erkrankter Personen. In diesen Gruppen sind die Effekte des Bahnlärms stärker ausgeprägt bzw. – was den Straßenverkehrslärm betrifft – überhaupt erst erkennbar.

Rüdisser 2008

Im Rahmen des ALPNAP-Projektes zu Verkehrslärm in Alpentälern wurde der Einfluss von Bahnlärm auf den Gebrauch von Schlafmitteln untersucht (siehe auch Lercher 2010). Dazu wurden von 30.322 Einwohnern Daten zum Arzneimittelgebrauch über die Krankenkassenversicherungen erhoben und der Gebrauch an Medikamenten in Relation zur Entfernung des Wohnorts zur Verkehrslärmquelle gesetzt. Als gegenüber Bahnlärm exponierte Gruppe wurden Anwohner betrachtet, welche in einem Bereich von 150 m um eine Bahnlinie mit hohem Güterverkehrsanteil lebten. Für die so definierte bahnlärmexponierte Gruppe wurde ein signifikantes Quotenverhältnis (Odds-Ratio) für einen höheren Verbrauch an Schlafmitteln sowie weiteren Arzneimittelklassen wie Antacida, Antihypertensiva und Antiallergika festgestellt. Die am stärksten betroffene Untergruppe der gegenüber Bahnlärm exponierten Personen waren die über 70jährigen Anwohner von Bahnstrecken. Die Autoren (siehe auch Lercher 2010) selbst warnen jedoch, hieraus definitive Schlussfolgerungen zu ziehen, da u.a. verschiedene Arzneimittelanwendungen zusammengefasst wurden und der Abstand zur Bahnlinie als Ersatz für die tatsächliche Exposition diene.

Die Interpretation der vorliegenden Analyse sollte den Autoren zufolge mit der notwendigen Vorsicht erfolgen, da die Analyse auf aggregierten Daten basiert. Die Autoren schränken weiterhin ein, dass die Möglichkeit der Kontrolle der Kovariablen (z.B. sozioökonomischer

Status, die am Wohnort tatsächlich verbrachte Zeit, die Arbeitsbedingungen) nur sehr gering ist, was eine verbleibende Unsicherheit in der Datenanalyse bedeutet und die eine kausale Interpretation verhindert.

In der betrachteten Studie wird nichts zu weiteren möglichen Kovariablen wie Luftverschmutzung und Raucherstatus der Teilnehmer mitgeteilt. Auch gibt es keine Lärm-messungen. Für die Untersuchung der Beziehung zwischen Lärm und Gesundheit werden somit für beide Untersuchungsgegenstände indirekte Indikatoren, nämlich der Abstand zur Bahnlinie und der Medikamentenverbrauch, mit allen sich hieraus ergebenden weiteren Unsicherheiten, genutzt.

Eine Ableitung von Schwellenwerten durch diese Art von Studiendesign erscheint somit mit Unsicherheitsfaktoren auf vielen Ebenen behaftet.

Lercher 2010

Die Teilnehmer dieser Studie wurden nach dem Zufallsprinzip, gestützt auf ein GIS-System (geografisches Informationssystem), nach der Nähe der Transportlärmquelle (Autobahn, Hauptstraße und Bahnlinie) zum Wohnort ausgewählt und telefonisch kontaktiert. Selektionskriterien waren eine mindestens einjährige Ansässigkeit an der aktuellen Adresse, ein Alter zwischen 25 und 75 Jahren, sowie ausreichendes Hör- und Sprachvermögen. Insgesamt nahmen 1643 Menschen an dieser Studie teil, was 35 % der ursprünglichen Gesamtauswahl an Personen entsprach. Frauen waren mit 61,5 % überrepräsentiert. Im Telefoninterview wurden u. a. Bildungsniveau, Arbeitsplatzbelastung, Krankheiten sowie Einstellung und Umgang mit Lärm abgefragt. Die Frage nach der Häufigkeit der Anwendung von Schlafmitteln war Teil einer Liste von Fragen zum Arzneimittelgebrauch. Für die Studie wurden zwei verschiedene Methoden (ISO und MITHRA) benutzt, um die Lärmbelastung zu modellieren. Anschließend wurde die so ermittelte Belastung in Beziehung zum Medikamentenverbrauch gesetzt. Abhängig vom benutzten Modell war ab Mittelschallpegeln von 55 - 65 L_{den} dB(A) (MITHRA) bzw. 60-70 L_{den} dB(A) (ISO) ein signifikantes Quotenverhältnis bezüglich des Arzneimittelverbrauchs zu beobachten. Die Autoren schließen, dass wahrscheinlich ein Mittelschallpegel im Bereich von 50 L_{den} dB(A) nachts mindestens nötig ist, um Anwohner vor negativen Auswirkungen auf die Gesundheit durch gestörten Schlaf zu schützen.

Bluhm 1998

Da nur wenige epidemiologische Untersuchungen zu Bahnlärm vorliegen, wurde die Studie von Bluhm in die vorliegende Auswertung eingeschlossen, obwohl diese vor dem in der

Literaturrecherche betrachteten Zeitraum ab dem Jahr 2000 publiziert wurde. Die Prävalenz der Hypertonie in der betrachteten Bevölkerung der Stadt Sollentuna/Schweden wurde mittels Selbstauskunft über einen Fragebogen ermittelt. Die Antwortrate auf diesen Fragebogen betrug ca. 76 %. Die Lärmbelastung wurde über die individuelle Adresse der Studienteilnehmer abgeschätzt und lag bei gegenüber Bahnlärm exponierten Personen bei $L_{eq,24h} = 55 - 65$ dB(A), in nicht lärmbelastetem Gebiet unter 50 dB(A). Die in bahnlärm-belasteten Gebieten wohnenden Menschen hatten ein nicht signifikantes geringeres relatives Risiko (0,8), an Hypertonie erkrankt zu sein als die nicht-belastete Kontrollgruppe. Trotzdem war in der bahnlärmbelasteten Gruppe die Prävalenz an Belästigung und Schlafstörung durch Lärm höher als in der straßenlärmbelasteten Gruppe und in der nicht belasteten Kontrollgruppe.

3.4.2.2 Weitere Endpunkte

Sørensen 2013

In einer Kohortenstudie (Untergruppe der Danish Diet and Cancer Cohort) von 29875 Frauen in Dänemark, die bei der Aufnahme in die Studie 50 - 64 Jahre alt waren, wurden im Beobachtungszeitraum von im Mittel 12,3 Jahren, 1219 Ereignisse, d.h. Fälle von postmenopausalem Brustkrebs, festgestellt. Die Lärmbelastung wurde entsprechend den Wohnadressen der Frauen für Bahnlärm und Straßenlärm durch ein Lärmausbreitungsmodell errechnet. Brustkrebs kann molekularbiologisch unter anderem in Östrogenrezeptor-positive (ER+) und negative (ER-) Subtypen unterteilt werden. Je nach Subtyp geht man von einer unterschiedlichen Prognose und Genese des Brustkrebsgeschehens aus. Die Autoren der Studie fanden bei einer Erhöhung der gemittelten Bahnlärmbelastung um $L_{den} = 10$ dB(A) innerhalb der bahnlärmbelasteten Gruppe $L_{den} \geq 55$ dB(A) ein größeres Risiko an ER- Brustkrebs zu erkranken.

Die Verfasser der Studie weisen als mögliche Ursache auf das hier schon dargestellte Stressmodell für Bahnlärm hin und diskutieren eine mögliche Rolle des Cortisols beim Tumorwachstum von ER- Brustkrebsfällen. Nach der Ansicht der Autoren könnte auch die Störung des circadianen Rhythmus, verbunden mit einer veränderten, reduzierten Melatonin-ausschüttung, eine Erklärung für das erhöhte Risiko, an ER- Brustkrebs zu erkranken, sein.

Die Analyse von ER- Brustkrebs unter Bahnlärmbelastung stützt sich hierbei auf eine sehr kleine Gruppe von 19 Fällen, die nach der Modellrechnung über $L_{den} = 55$ dB(A) belastet waren. Die Autoren selber warnen, dass diese Zusammenhänge erst noch durch Studien bestätigt werden müssen, bevor weitere Schlüsse hieraus gezogen werden können.

3.4.3 Übersichtsarbeiten

WHO 2009

In der Publikation „Night noise guidelines for Europe“ werden die gesundheitlichen Auswirkungen nächtlicher Lärmbelastung sowie das Verhältnis zwischen Ausmaß und Wirkung der Belastung geprüft und sowohl vorläufige als auch endgültige Richtwerte vorgestellt. Grundlage sind Daten und Erkenntnisse aus der Europäischen Region der WHO. Der Entwurf zu den Leitlinien wurde in Fachkreisen überprüft und zur Konsensfindung zwischen Fachleuten und Beteiligten („stakeholder“) erörtert. Die Publikation soll politischen Entscheidungsträgern („policy-makers“) als Orientierungshilfe dienen, wie die Folgen des Nachtlärms eingedämmt und damit zu mehr Gesundheit in Europa beigetragen werden kann.

Die WHO gibt als Richtwert zu Vermeidung von Schlafstörungen für den nächtlichen äquivalenten Dauerschallpegel in Innenräumen 30 dB(A) an. Der Richtwert ist daran orientiert, dass nicht nur durchschnittlich lärmempfindliche Personen geschützt werden, sondern auch sensible Gruppen wie z.B. Kinder, Schwangere oder ältere Personen mit Vorerkrankungen (WHO 1999).

Eine Erhöhung des Risikos für Myokardinfarkt wird – ausgehend von den betrachteten Studien - tagsüber ab 65 dB(A) gesehen (bei chronischer Einwirkung). Für nächtlichen Lärm ist die Datenlage nicht so deutlich. Vorhandene Untersuchungen deuten aber darauf hin, dass der Risikoanstieg nachts bei niedrigeren Lärmpegeln (geschätzt ab 50 dB(A)) beginnt.

WHO 2011

Mit der Publikation „Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost“ hat die WHO einen Bericht zur Abschätzung der Krankheitslast durch Umgebungslärm in Europa vorgelegt. Danach führt Verkehrslärm im Westen der Europäischen Region jährlich zum Verlust von über einer Million gesunder Lebensjahre („DALYs lost“) durch Erkrankung, Behinderung oder vorzeitigen Tod. Es entfallen 61.000 Jahre auf ischämische Herzkrankheiten, 45.000 Jahre auf kognitive Beeinträchtigungen bei Kindern, 22.000 Jahre auf Tinnitus und 903.000 Jahre auf Schlafstörungen. Legt man den erweiterten Gesundheitsbegriff der WHO („state of complete physical, mental and social well-being“) zugrunde, kommen noch 587.000 Jahre aufgrund erheblicher Belästigung durch Umweltlärm hinzu.

Auf der Liste der die Krankheitslast vergrößernden Umweltfaktoren steht Umweltlärm nach Luftverschmutzung an zweiter Stelle. Jeder dritte Bürger fühlt sich tagsüber durch Lärm belästigt und jeder fünfte wird im Schlaf durch Straßen-, Schienen- und/oder Flugverkehr

beeinträchtigt. Dadurch erhöht sich das Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen und Bluthochdruck.

Die Veröffentlichung stellt die Ergebnisse einer vom Regionalbüro und von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission koordinierten internationalen Studie vor, in der Erkenntnisse über Gesundheitsfolgen geprüft, Orientierungshilfen zur Quantifizierung der Risiken durch Umweltlärm gegeben und Einschätzungen der daraus in den westlichen Ländern der Europäischen Region resultierenden Krankheitslast vorgenommen werden. Die Veröffentlichung richtet sich vornehmlich an Politikgestalter, Sachverständige, Hilfsorganisationen und andere Akteure, welche die Folgen von Umgebungslärm abschätzen und handhaben müssen. Sie bietet eine Grundlage zur Überarbeitung der Lärmleitlinien des Regionalbüros, welche die Mitgliedstaaten auf der Fünften Ministerkonferenz Umwelt und Gesundheit 2010 in Parma forderten.

Mersch-Sundermann 2010

Diese Literaturobwertung kommt im Hinblick auf Herz-Kreislaufstörungen zu dem Schluss, dass Langzeiteffekte des Bahnlärms – im Gegensatz zu Langzeiteffekten anderer Verkehrslärmquellen – bislang zu wenig untersucht wurden. Dies gilt für lärmbedingte, anhaltende, physiologische Veränderungen, die als Risikofaktoren oder Vorstufen für Herz-Kreislaufkrankungen angesehen werden ebenso wie für manifeste Erkrankung. Den verfügbaren Studienergebnissen wird eine geringe Evidenz zugesprochen: es sind zu wenige Studien verfügbar, die zudem widersprüchliche Befunde aufweisen [Stufe 4 (+/-)]

Die Möglichkeit, über Analogieschlüsse zu Wirkungsuntersuchungen aus dem Straßen- bzw. Flugverkehr die Evidenzlage im Hinblick auf Bahnlärmexpositionen zu verbessern, wird kritisch bewertet. Zwar gibt es geeignete Untersuchungen von Straßen- und Flugverkehr (Babisch 2006/2008/2009), doch der Vergleich der Schallbelastungsdaten auf der Basis standardisierter Mittelungspegel wird grundsätzlich als problematisch angesehen. Die Anstiegssteilheit von Schienenlärm, das dynamische Erregungsprofil und das empfundene Lärmprofil im menschlichen Organismus bestimmen das Maß der physiologischen Reaktion. Diese wirkungsrelevanten Charakteristika gehen aber in die Berechnungen des Mittelungspegels, der Grundlage fast aller Expositionsbestimmungen ist, nicht ein, so dass bei gleichen Mittelungspegeln beim Schienenlärm stärkere oder auch abweichende psycho-physiologische Wirkungen zu erwarten sind. Die Datenlage im Hinblick auf Herz-Kreislaufstörungen erlaubt daher keine analoge Schätzung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für den Schienenlärm aus den Ergebnissen der Wirkungsuntersuchungen zum Straßen- und Fluglärm.

Auch wenn Analogieschlüsse kritisch bewertet werden, so wird den Ergebnissen der Untersuchungen zu Straßen- und Fluglärm dennoch eine wichtige Indikatorfunktion zugesprochen, die den notwendigen Handlungsbedarf aufzeigen und für das Risikomanagement im Bereich Schienenlärm genutzt werden sollte. In diesem Zusammenhang wird auch die Indikatorfunktion von Untersuchungen zur Verordnungshäufigkeit von Blutdruck und das Herz regulierenden Arzneimitteln bewertet. Dies geschieht konkret am Beispiel einer epidemiologischen Studie zur Auswirkung von Fluglärm im Umfeld des Flughafens Köln/Bonn. Nach Meinung der Autoren wird die Aussagekraft von Studien, die auf Sekundärdaten beruhen allerdings dadurch eingeschränkt, dass a) keine individuellen Angaben zu kardiovaskulären Risikofaktoren vorliegen und b) die Repräsentativität der zugrundeliegenden Krankenkassendaten in Frage steht. Folgendes Argument wird angeführt: „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.“ Belege für diese Hypothese, z.B. aus Sensitivitätsanalysen, werden nicht genannt.

Babisch 2008

Ausgehend von mehreren epidemiologischen Untersuchungen zum Zusammenhang von verschiedenen Verkehrslärmarten mit Herz-Kreislauf-erkrankungen (z.B. UBA 2006), sieht der Autor ausreichend wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, die einen relevanten Zusammenhang von Verkehrslärm und ischämischen Herzerkrankungen belegen. Im Gegensatz dazu wird ein Zusammenhang mit chronisch erhöhtem Blutdruck bzw. Bluthochdruckerkrankungen als bislang nicht hinreichend nachgewiesen beurteilt.

Für die Zusammenhänge zwischen Fluglärm und Bluthochdruck sowie zwischen Straßenverkehrslärm und Herzinfarkt-Risiko wurden auf der Grundlage von Meta-Analysen Dosis-Wirkungsbeziehungen abgeleitet (Babisch und v. Kamp 2009; Babisch 2008), die auf einen Anstieg des Risikos für Bluthochdruck bzw. Herzinfarkt mit steigender Lärmbelastung schließen lassen. Dazu hat Babisch (2006) eine Review-Arbeit zu „Transportation Noise“ und kardiovaskulärem Risiko veröffentlicht, bei der insgesamt 61 epidemiologische Studien, jedoch nur eine Studie über Schienenlärm, zur Bewertung kamen. Aus der quantitativen Risikoabschätzung geht hervor, dass 2,9% aller Herzinfarktfälle auf den Straßenverkehrslärm zurückzuführen sind. Entsprechende Analysen für Schienenverkehr liegen in Ermangelung von Untersuchungsdaten allerdings nicht vor.

Lercher 2011

Lercher 2011 fasst die Ergebnisse verschiedener österreichischer Studien der vorausgehenden 25 Jahre zusammen. Er beleuchtet und diskutiert verschiedene Einflüsse und Confounder. Als Resultat hält er u. a. fest, dass im Rahmen der ALPNAP-Studie die Daten keinen Einfluss von Luftschadstoffen auf die gefundenen Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge für Lärm erkennen lassen. Der Autor hält ausgehend von den Ergebnissen einen Maximalpegel in Wohngebieten von 55 dB(A) für erforderlich.

Rööfli (2013)

Der Autor wendet das Konzept der allostatistischen Last von McEwen auf Lärm an. Das Konzept von McEwen besagt, dass langandauernde intensive Anforderungen an den Körper zu einer dauerhaften Sollwertverschiebung (= Allostase) physiologischer Parameter führen. Die allostatistische Last ist dabei die Summe derartiger Sollwertverschiebungen und gilt als Maß für pathophysiologische Veränderungen. Der Autor erwähnt in diesem Zusammenhang insbesondere - ähnlich dem Lärmwirkungsmodell von Babisch (2002) - die Hyperaktivierung des autonomen Nervensystems und des Hormonsystems als Ausdruck der allostatistischen Last, welche in der Folge chronische Krankheiten wie z. B. Bluthochdruck verursachen kann.

Der Autor merkt an, dass es kaum Studien zu langfristigen Auswirkungen des Lärms auf das Immunsystem und den Metabolismus gibt, obwohl solche Auswirkungen im Rahmen des Lärmwirkungsmodells plausibel erscheinen. Als Beispiel einer solchen Studie wird die dänische Kohortenstudie (Danish Diet and Cancer Cohort) von Sørensen et al. (2013) aufgeführt. In dieser Studie wurde das zusätzliche Risiko an Diabetes zu erkranken mit 8 % pro Anstieg des Lärmpegels um 10 dB(A) Straßenlärm abgeschätzt. Ein solcher Zusammenhang für Bahnlärm wurde jedoch in dieser Studie ausdrücklich nicht gefunden.

3.4.4 Risikogruppen

Van Kamp 2013

Dieses Review befasst sich mit den Auswirkungen des Lärms auf vulnerable Personengruppen, also nicht speziell mit den Auswirkungen des Bahnlärms. In dem Review wird unterschieden zwischen der Vulnerabilität, d.h. der Anfälligkeit einer Person oder Gruppe gegenüber schädlichen Auswirkungen des Lärms und Lärmsensitivität, worunter eine gesteigerte Reaktivität (z.B. physiologischer Parameter) verstanden wird. Bisher haben sich nur wenige Studien mit der Sensitivität gegenüber Lärm beschäftigt. Als Risikogruppen werden in diesem Review Kinder, ältere Menschen, chronisch Kranke und Menschen mit vermindertem Hörvermögen genannt. Bezüglich der Schlafstörung durch Lärm werden von

den Autoren in der Literatur Belege angeführt, dass Kinder weniger sensitiv gegenüber lärminduziertem Aufwachen und Verschiebungen der Schlafstruktur sind, dafür aber die Reaktionen bei den Parametern Blutdruck und Motilität stärker ausgeprägt auftreten. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass vulnerable Gruppen bisher zu wenig untersucht wurden. Die bisherigen Studien zeigten, dass Kinder vulnerabler gegenüber den kognitiven Effekten der Lärmbelastung sind. Dies liegt eher darin begründet so die Autorin, dass Kinder sich in einer sensitiven Entwicklungsphase befinden und ihre Bewältigungsstrategien (coping strategies) unvollständig entwickelt sind und weniger daran, dass Kinder per se vulnerabler seien. Ältere Menschen wiederum erscheinen möglicherweise bezüglich der kardiovaskulären Effekte des Lärms vulnerabler, vielleicht auch als Kombinationseffekt mit der Luftverschmutzung. Besondere Aufmerksamkeit wird für das besondere Risiko einer Lärmbelastung für bestimmte Gruppen wie psychisch Kranke, Schichtarbeiter und Menschen, die an Tinnitus leiden, gefordert.

Mersch-Sundermann 2010

In einem Review wird den verfügbaren Studien zu Schienenlärmwirkungen bei Kindern überwiegend mangelnde Evidenz oder aber ungenügend häufig replizierte Ergebnisse aus einzelnen Primärquellen zugeschrieben und somit mit 3 von 4 die zweitniedrigste Evidenzstufe vergeben: Evidenzstufe 3(++/-).

Zwischenfazit:

Unterhalb der Schwelle akut Gehör schädigenden Lärms können auch bei chronisch / langfristig einwirkenden Lärmereignissen niedrigerer Intensität gesundheitliche Belastungen auftreten.

Diese sind die Folgen fehlender Lärmpausen, insbesondere zur Nachtzeit, und führen über die in Kapitel 3.1-3.3 diskutierten kurzfristigen physiologischen Reaktionen zur Erhöhung von Risikofaktoren wie Bluthochdruck und verändertem Fettstoffwechsel. Diese Risikofaktoren können sich nachfolgend als Krankheit z. B. in arteriosklerotischen Gefäßablagerungen mit Gefäßverschlüssen und in Herzinfarkt und / oder Schlaganfall manifestieren.

Entscheidend ist die Chronizität der Lärmbelastung, die eine ausreichende Erholung des Körpers aufgrund fehlender oder zu kurzer Lärmpausen verhindert. Die WHO (2009) ermittelt einen Zielwert von 40 dB (A)_{ausßen}, der vor den negativen Auswirkungen nächtlichen Lärms schützt.

Besonders vulnerable Gruppen sind Kinder und Ältere, jeweils mit unterschiedlichen Schwerpunkten der Anfälligkeit gegenüber Lärmeinwirkungen.

Hinsichtlich der gesundheitlichen Endpunkte von chronischen Bahnlärmeinwirkungen, wie Bluthochdruck und Herzinfarkt, gibt es allerdings nur (konsistente) Hinweise aus epidemiologischen Studien, wobei wiederum vielfältige Confounder, wie beispielsweise Lebensstil, Nikotinabusus, Feinstaubbelastung und altersgemäße körperliche Veränderungen differenzierend in die Betrachtung einbezogen werden müssen.

Dennoch kann als wissenschaftlich hinreichend belegt gelten, dass chronische Bahnlärmeinwirkung insbesondere in der Nacht mit Störung eines erholsamen Schlafes über längere Zeit zu körperlichen Beschwerden und Schädigungen führt.

3.5 Wirkungen von Erschütterungen und Infraschall

3.5.1 Einleitung

Eine Untersuchung der Wirkungen von Erschütterungen und niedrig frequentem Schall sowie Infraschall aus dem Bahnverkehr auf den Menschen ist wegen des komplexen Zusammenspiels der Expositionen und der Wahrnehmung bzw. Reaktion der Betroffenen äußerst schwierig. Zum einen kann der Anteil des niedrig frequenten Schalls - außer in Laborsettings - nicht von der gesamten Lärmeinwirkung abgegrenzt werden. Das Gleiche gilt für die Wirkung der Erschütterungen.

Zum anderen können Erschütterungen und die Art des Gebäudes/Raumes sekundäre Effekte bewirken, die die Schalleinwirkungen aber auch die wahrnehmbaren Effekte verändern: dazu gehören durch Vibration ausgelöster sekundärer Luftschall, niedrig frequenter Schall aus Gebäudeschwingungen, Resonanzen im Raum und daraus folgende stark schwankende Verteilung der Schallpegel im Raum, aber auch die Wahrnehmung von Vibrationen nicht nur über das Fühlen sondern auch über Sehen und Hören (z. B. Schwingen von Lampen, Klirren von Gläsern). Abbildung 3 stellt dieses komplexe Zusammenspiel dar.

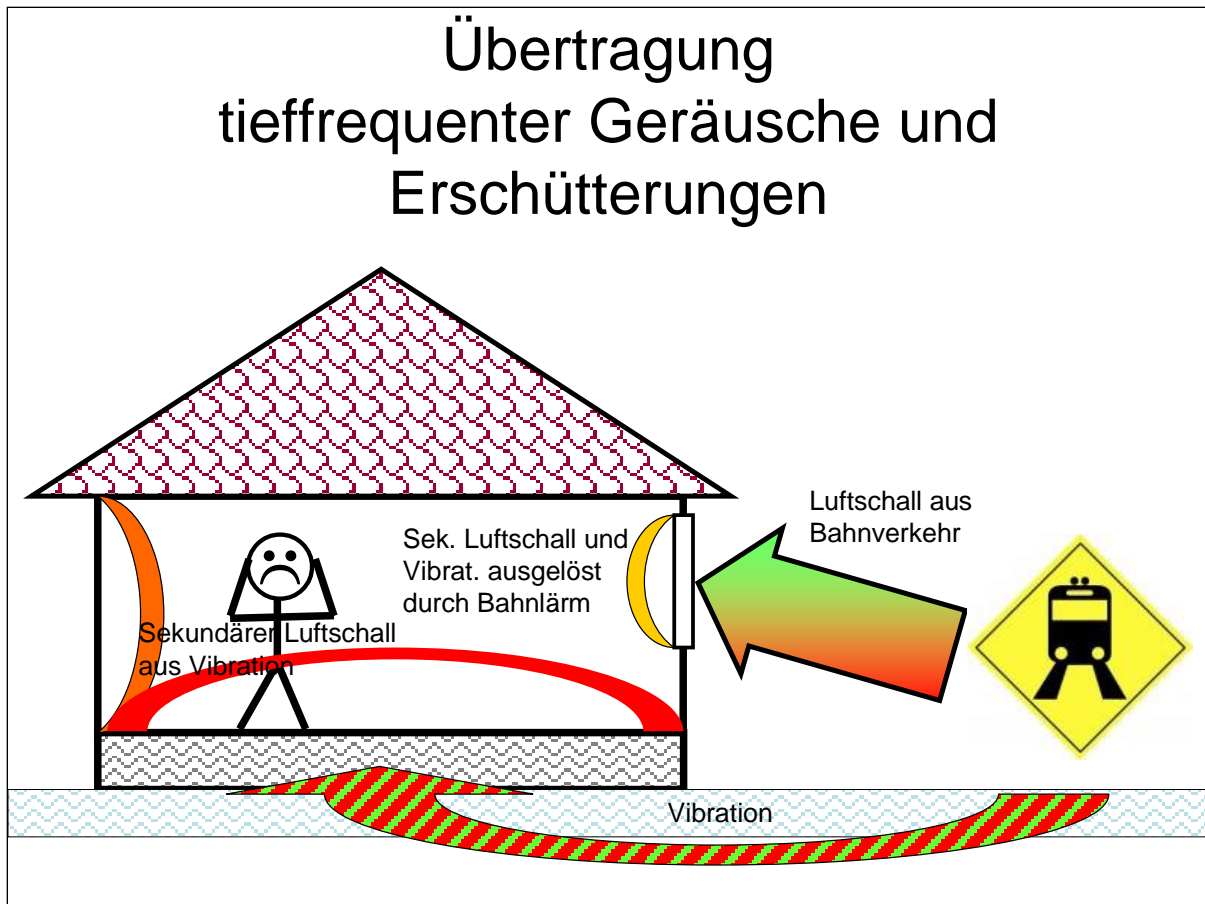


Abbildung 3: Zusammenwirken von Lärm, niedrig frequentem Schall und Erschütterungen

Darüber hinaus werden Erschütterungen in unterschiedlichen Metriken gemessen oder angegeben, ebenso niedrig frequenter Schall bzw. Infraschall (siehe Tabelle 7):

Tabelle 7: Messgrößen zur Beschreibung von Erschütterungen und niedrig frequentem Schall

Messgröße	Beschreibung	Einheit	
v	Schwinggeschwindigkeit	mm/s	3 Ausbreitungsrichtungen; proportional zur Energie
α	Schwingbeschleunigung	m/s ²	proportional zur Kraft
KB _F	bewertete Schwingstärke (gleitender Effektivwert)	---	Höchste bewertete Schwingstärke (KB _{Fmax}) und Beurteilungsschwingstärke (KB _{FTr}) werden zur Bewertung nach DIN 4150-2 herangezogen
VDV	Vibrationsdosis	m/s ^{1,75}	v. a. im Arbeitsschutz angewandt
L	Schalldruckpegel A-bewertet	dB(A)	Für niedrige Frequenzen nur eingeschränkt geeignet
L	Schalldruckpegel C-bewertet	dB(C)	Geringe Frequenzabhängigkeit
L	Schalldruckpegel Z-bewertet	dB(Z)	keine Frequenzbewertung

Die DIN 4150-2 (1999) bietet Anhaltswerte zur Beurteilung, ob schädliche Umwelteinwirkungen auf Menschen in Gebäuden im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes durch Vibration gegeben sind. Sachgerechte Messungen müssen immer in Innenräumen ausgeführt werden.

Als niedrig frequenter Schall wird im Allgemeinen Schall mit Frequenzen < ca. 100 Hz bezeichnet; Schall mit Frequenzen < 20 Hz wird Infraschall genannt. Damit Schall bei niedrigen Frequenzen noch hörbar ist, muss der Schalldruck deutlich höher sein als bei höheren Frequenzen. Niedrig frequenter Schall kann zudem bei entsprechenden Frequenzen nicht nur mit dem Gehör, sondern auch mit dem Körper wahrgenommen werden (Resonanz im Körper). Sekundärer Luftschall niedriger Frequenzen (z. B. durch Vibrationen

verursacht) ist zudem dadurch besonders lästig, dass eine Zuordnung zu einer definierten Schallquelle für den Betroffenen nicht möglich ist.

Mit niedrig frequentem Schall oder Infraschall werden eine Vielzahl von Wirkungen verknüpft: neben Belästigung und Schlafstörungen werden u. a. auch Ohrendruck, verringerte Herzschlagfrequenz, Müdigkeit, Angst, Gleichgewichtsstörungen, Konzentrationsstörungen oder Unsicherheitsgefühle berichtet oder diskutiert. Nachfolgend wurden Studien ausgewertet, die Belästigung (bzw. Gestörtheit), Schlafstörungen/Schlafqualität und Auswirkung auf Aufmerksamkeitsparameter untersuchten. Nur eine Studie in der Auswahl (Ising 2004) untersuchte die Stressreaktion bei Kindern durch Analyse des Cortisolgehalts im Speichel am Morgen.

Es werden zunächst Originalstudien ab ca. dem Jahr 2000 sowie anschließend Übersichtsarbeiten betrachtet.

3.5.2 Originalarbeiten zu Erschütterungen und Infraschall

In Tabelle 8 sind die zu den Wirkungen von Vibration und Infraschall ausgewerteten Originalarbeiten zusammengefasst.

TVANE-Projekt (Teilprojekt 2006 – 2011)

Das schwedische TVANE-Projekt (Train Vibration and Noise Effects) ist eines der wenigen Untersuchungsvorhaben, in dem gezielt die Auswirkungen von Vibration aus dem Schienenverkehr auf Anwohner von Bahnstrecken untersucht wurden. Das Gesamtprojekt lief von 1997 bis 2011 mit Mitteln des schwedischen Zentralamts für Verkehrswesen.

Zu den neueren Veröffentlichungen aus dem TVANE-Projekt, die die Feld- und Laboruntersuchungen zu Vibration beschreiben, gehören:

Öhrström 2009

Die Untersuchung bezieht 980 Teilnehmer ein, die in unterschiedlichem Abstand zu einer Bahnstrecke leben und sich auf zwei Regionen mit unterschiedlichem Ausmaß an Vibration verteilen. Bezogen auf die Vibration wird ein Bereich von 0,10 bis 1,43 mm/s Schwinggeschwindigkeit abgedeckt. Zusätzlich zu den Felduntersuchungen werden Laboruntersuchungen an 21 jungen Erwachsenen präsentiert, mit denen der Einfluss von Lärm und Vibration auf den Schlaf getestet wird. Die untersuchten Endpunkte in der Feldstudie waren

Belästigung und Störung des Schlafs. Im Labor wurden die Störung des Schlafs sowie die Schlafqualität untersucht.

Im Ergebnis zeigen die Felduntersuchungen, dass das Ausmaß der Lärmbelastigung in der Region mit hoher Vibration deutlich höher ist als in der Region mit geringer Vibration – bei vergleichbaren Schallpegeln ($L_{Aeq,24h}$ von < 45 dB(A) bis 65 dB(A)). Das Gleiche gilt umgekehrt auch bei gleichem Niveau der Vibrationseinwirkung. Der Belästigungsunterschied zwischen Gebieten mit starker bzw. schwacher Vibration wird besonders deutlich bei Schallpegeln > 50 dB(A). Der Index für die Schlafstörung (einbezogen: Einschlafverhalten, Aufwachreaktionen und Veränderung der Schlafqualität) steigt sowohl mit dem Ausmaß der Vibration als auch mit dem Schallpegel L_{night} an. Vibration beeinflusst den Schlaf ab 55 dB (L_{night} , Messung außen; Fenster geschlossen) deutlich.

Hinsichtlich der Schlafqualität als auch der Schlafstörungen bestätigen die Laboruntersuchungen die Ergebnisse der Feldstudie und zeigen – in diesem Fall – einen höheren Einfluss der Vibration (0,4 mm/s gegen 1,4 mm/s) als des Lärms (28 dB $L_{Aeq, 8h}/48 L_{AFmax}$ gegen 31 dB $L_{Aeq, 8h}/54 L_{AFmax}$ innen). Allerdings ist die im Labor gewählte Differenz in der Vibration (0,4 mm/s: spürbar gegen 1,4 mm/s: deutlich spürbar) auch deutlich höher in der Wahrnehmung zu bewerten, als die Differenz des angelegten Lärmpegels (3 dB L_{Aeq} Unterschied werden als gerade wahrnehmbar betrachtet).

Ögren 2009

Weitere Laboruntersuchungen zum kombinierten Einfluss von Lärm und Vibration auf den Schlaf (Einschlafdauer, Aufwachreaktionen, Schlafqualität) mit den gleichen Probanden von Öhrström 2009 beschreibt Ögren 2009. Es wurden Zugvorbeifahrten mit zwei unterschiedlichen Pegelmaxima (48 bzw. 54 dB L_{AFmax}) simuliert, in Kombination mit schwacher (0,2-0,4 mm/s) sowie starker (1,1-1,5 mm/s) Vibration. Hinsichtlich der Einschlafzeit sowie der Aufwachreaktionen ergeben sich Unterschiede zwischen den Kombinationen von Lärm und Vibration, die jedoch nicht signifikant sind. Ein deutliches Bild ergab jedoch die selbstberichtete Schlafqualität, die sowohl durch Lärm, stärker jedoch noch durch Vibration beeinträchtigt war.

Tabelle 8: Originalarbeiten zu Erschütterungen/Vibration und Infraschall

Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Autor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik	Bemerkungen
Öhrström	2009	Lärm + Vibration	Belästigung + Schlafstörung	Feld- und Laborstudien	TVANE
Ögren	2009	Lärm + Vibration	Einschlafzeit, Aufwachereignisse, Schlafqualität	Laborstudie	TVANE
Gidlöf- Gunnarsson	2012	Lärm + Vibration	Belästigung	Feldstudie	TVANE
Zeichart	1994	Lärm + Vibration	Belästigung / Gestörtheit	Feldstudie	
DEFRA	2007	Vibration	Belästigung	Feldstudie	Pilotstudie; Defra- Projekt
Koziel	2011	Lärm + Vibration	Belästigung, Schlafstörung	Feldstudie	Defra-Projekt
Peris	2011	Vibration	Belästigung	Feldstudie	Defra-Projekt
Peris	2012	Vibration	Belästigung	Feldstudie	Defra-Projekt
Woodcock	2011	Vibration	Belästigung	Feldstudie	Defra-Projekt
Said	2001	Vibration	Wahrnehmungsschwelle	Laborstudie	
Ljungberg	2007	Lärm + Vibration	Kognitive Effekte (Aufmerksamkeit)	Laborstudie	
Croy	2013	Lärm + Vibration	Herzfrequenz	Laborstudie	
Ising	2004	Niedrig frequenter Schall	Cortisolzyklus (Cortisol im Speichel)	Feldstudie / Kinder	

Gidlöf-Gunnarsson 2012

In Ergänzung zu den TVANE-Untersuchungen wurden hier 1695 Probanden befragt. Sie wohnten in Regionen mit Lärmbelastungen (durch Bahnverkehr) von 45-65 dB(A) ($L_{Aeq,24 h}$) und unterschiedlicher Belastung durch Vibration (0,1 bis 1,5 mm/s) aus dem Bahnverkehr. Neben der Belästigung wurde auch die Anzahl der Zugvorbeifahrten sowie die Orientierung und Nutzung der Wohnräume in Bezug zur Bahnstrecke einbezogen. Die Vibration wurde in den Innenräumen gemessen. Die bisherigen Ergebnisse der TVANE-Untersuchungen wurden bestätigt. Die wichtigsten neuen Ergebnisse sind:

1. Für ein gleiches Maß an Belästigung muss der Schallpegel in Gebieten mit hoher Vibration um ca. 5-7 dB niedriger sein.
2. Es wurde eine starke Beziehung zwischen der Belästigung durch Vibration und der gemessenen Schwinggeschwindigkeit gefunden. Bei einer Schwinggeschwindigkeit von 0,4 mm/s wurde eine Art Schwellenwert für einen starken Anstieg der Belästigung identifiziert.

Weitere Originalarbeiten

Zeichart 1994

Zeichart untersucht in dieser Feldstudie den Einfluss von Vibration, Zugvorbeifahrten und Geräuschbelastung auf die „Gestörtheit“ (Störung von Aktivitäten und Schlaf, Wahrnehmung von Erschütterung, Vergleich der Störung durch Erschütterung mit der Störung durch Lärm) an 765 Probanden. Das Ergebnis zeigt eine signifikante Wechselwirkung beider Belastungsfaktoren: Der Beitrag der Erschütterungsbelastung zur Gestörtheitsreaktion bei Anwohnern, die gleichzeitig einer stärkeren Geräuschbelastung ausgesetzt sind, ist geringer als bei Anwohnern mit einer geringeren Geräuschbelastung. Die Maximalpegel der Zugvorbeifahrten lagen zwischen 39,6 und 72,9 dB(A), die Erschütterung betrug – je nach Deckenmaterial der Häuser – 0,02 bis 0,77 (Median 0,17) bzw. 0,05 bis 2,66 (Median 0,32) KB_WZ (Kenngröße für die typische Belastung eines Tages; jeweils aus den gem. DIN 4150 Tl. 2 berechneten Maximalwerten der bewerteten Schwingstärke der einzelnen Zugvorbeifahrten gebildet).

DEFRA 2007

Dieser Bericht im Auftrag des „Department for Environment, Food and Rural Affairs“, UK, beschreibt die Entwicklung einer Herangehensweise incl. einer Pilotstudie zur Untersuchung der Einwirkung von Erschütterungen aus der Umwelt auf den Menschen (u. a. Bahnlärm). Erschütterungen wurden sowohl außen als auch in den Wohnungen gemessen. In der Pilotstudie wurden mehr als hundert Probanden, für die auch Vibrationsmessungen vorlagen,

befragt. Zielgröße war die Belästigung, deren Zusammenhang mit primären und sekundären Vibrationseffekten sowie dem Zusammenwirken von Vibration und Lärm. Die Belästigung stieg mit dem Ausmaß der Erschütterung an (sowohl bezogen auf Außen- als auch Innenpegel). Die Wahrnehmung von Vibration durch Spüren (prim. Effekt) hatte einen stärkeren Belästigungsanstieg zur Folge als die sekundären Effekte (Wahrnehmung durch Hören und Sehen). Ein deutlicher Unterschied in der Belästigungswirkung von Erschütterung einerseits und Lärm andererseits war nicht festzustellen.

Koziel 2011

Diese MSc-Arbeit basiert auf der durch DEFRA finanzierten Hauptfeldstudie „Human Response to Vibration in Residential Environments“ (s. auch DEFRA 2007). Für 931 Probanden wurden Datensätze (Lärm- und Vibrationsmessungen, Belästigung sowie Schlafstörungen) ausgewertet. Der Anstieg der Belästigungsreaktionen mit zunehmender Vibration (hier gemessen als Vibrationsdosis $VDV [m/s^{1,75}]$) läuft parallel mit der Wahrnehmung der Vibration und ist ausgeprägter in der Nacht im Vergleich zum Tag. In einem beobachteten Vibrationsbereich von $VDV_{h,24h} 0,0009 m/s^{1,75}$ bis $0,5 m/s^{1,75}$ stieg der Prozentsatz der Schlafgestörten von 5 auf 50 %. Parallel dazu nahm der Prozentsatz der hoch Belästigten von 3,7 % auf 16 % zu.

Für die kombinierte Wirkung von Vibration und Lärm findet Koziel keine signifikante Interaktion: sowohl Belästigung als auch Schlafstörungen steigen (jeweils für sich) sowohl mit zunehmender Vibration als auch mit zunehmender Lärmexposition an (betrachteter Schallpegelbereich: ca. 40 bis 75 dB(A) L_{den} außen). Der Anteil des Lärms am Anstieg der Belästigung ist unter der gegebenen Exposition etwas höher als der der Vibration.

Peris 2011 und Peris 2012

Im Rahmen der von DEFRA (s. o.) finanzierten Hauptfeldstudie wurden die Untersuchungen von Peris in den Jahren 2009 und 2010 durchgeführt. Es wurden die gleichen Datensätze wie bei Koziel 2011 verwendet, hier jedoch nur unter dem Gesichtspunkt der ausschließlich durch Bahnverkehr hervorgerufenen Erschütterungen sowie unterschiedlicher Tageszeiten ausgewertet und der Einfluss auf die Belästigung ermittelt. Mit den ausgewählten 931 Probanden wurde darüber hinaus versucht, in etwa die Bevölkerung Großbritanniens repräsentativ abzubilden. Die Belästigungswerte einer bestimmten Tageszeit wurden der in dieser Tageszeit gemessenen Vibrationsdosis zugeordnet. Das Ausmaß der Belästigung bei einer gegebenen Vibrationsdosis steigt in der Reihenfolge Tag < Abend < Nacht. Z. B. wurden bei einer Vibrationsdosis VDV_b von $0,05 m/s^{1,75}$ folgende Anteile hoch belästigter Probanden im

Kollektiv ermittelt: 4 % (Tag), 7 % (Abend), 15 % (Nacht). Peris schlägt daher für die Aufstellung von Expositions-Wirkungskurven (Vibration/Belästigung) eine Gewichtung der Tageszeiten im Hinblick auf das Ausmaß der Vibration vor. Zudem stellt er für die Einwirkung von Erschütterungen in der Nacht eine bessere Korrelation der Belästigung mit dem Maß horizontaler Vibration (liegende Position des Schläfers!) fest.

Woodcock 2011

Woodcock gibt einen Überblick über die gesamte Hauptstudie des DEFRA-Projektes. Er beschreibt allerdings im Gegensatz zu Koziel 2011 einen etwas größeren Einfluss der Vibration auf die Belästigung im Vergleich zum Einfluss des Lärms speziell für Vibration und Lärm aus dem Bahnverkehr.

Said 2001

Said untersuchte in einer Laboranordnung, welcher Minimalbetrag der Erschütterungsenergieänderung gerade noch wahrnehmbar ist. Sie beschränken sich dabei auf Eisenbahnspezifische Erschütterungen. Die Wahrnehmung von Erschütterungen hat nach DEFRA 2007 auch einen Einfluss auf das Ausmaß der Belästigungsreaktion. Es wurde die Wahrnehmungsschwelle, der Einfluss der Pausendauer zwischen Erschütterungsereignissen und die Bedeutung des Maximalwertes eines Erschütterungsereignisses untersucht. Die Untersuchungen wurden bei vier unterschiedlichen Erschütterungsintensitäten (KB_{Fmax} -Werte: 0,2; 0,4; 0,8 und 1,6) unter Einfluss von drei verschiedenen Innengeräusch-Vorbeifahrtpegeln (<30; 45 und 55 dB(A)) durchgeführt.

Die mittlere Labor-Unterschiedsschwelle, ab der eine Intensitätsdifferenz feststellbar ist, lag bei einer relativen Erhöhung des Signals um 25 %. Die Pausendauer zwischen den Ereignissen zeigte praktisch keinen Einfluss auf die Wahrnehmung (keine wesentliche Veränderung der Unterschiedsschwelle selbst bei einer Verlängerung der Pause auf das 50fache – von 3 s auf 150 s). Der Spitzenwert eines Erschütterungsereignisses hat zwar einen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung, dieser ist jedoch sehr gering. Im Vergleich mit dem Spitzenwert ist der Energiegehalt von Erschütterungsereignissen (KB_{eq}) die geeignetere Größe für die Bewertung der subjektiven Wahrnehmung der Erschütterung.

Ljungberg 2007

In dieser Laboranordnung wurden unterschiedlich lärmempfindliche männliche Studenten (n = 32) daraufhin untersucht, welche Auswirkung Lärm und Vibration auf die Aufmerksamkeit

nach der Einwirkung hat. Die Exposition orientierte sich an Erschütterungen und Lärm, wie sie von forstwirtschaftlichen Fahrzeugen ausgehen können.

Die Lärmempfindlichkeit hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Vibration verminderte die Aufmerksamkeitsleistung nach der Exposition, unabhängig davon, ob gleichzeitig Lärmexposition stattfand oder nicht (die Probanden hielten sich zwar für wacher und arbeiteten schneller, dies aber auf Kosten der Genauigkeit). Synergistische oder antagonistische Effekte der Lärm- und der Vibrationseinwirkung konnten nicht beobachtet werden.

Croy 2013

Es handelt sich um eine Laborstudie mit 24 jungen, gesunden Erwachsenen. Die Probanden wurden in vier Nächten unterschiedlich häufig eingespielten Zugvorbeifahrten (20 bzw. 36 Züge pro Nacht im Bereich 42,4 – 45,6 dB(A)_{eq} sowie 47,2 – 49,8 dB(A)_{max}) mit hohem und niedrigem Vibrationslevel (ungewichtete Schwingbeschleunigung: 0,072 bzw. 0,036 m/s²) ausgesetzt. Als Effekt wurden die Herzfrequenz gemessen und Aufwachreaktionen registriert.

Beim höheren Vibrationsniveau wurden durchgehend mehr Aufwachreaktionen, ein stärkeres Ansteigen der Herzfrequenz sowie deren langsames Abklingen beobachtet. Männer reagierten etwas stärker als Frauen (dieses Ergebnis ist jedoch durch die geringe Teilnehmerzahl in der Aussage begrenzt). Die Anzahl der Züge pro Nacht und die Lärmempfindlichkeit der Probanden hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse (Anm.: dies mag der moderat gewählten Lärmbelastung geschuldet sein). Eine gesteigerte Herzfrequenz hat auch Auswirkungen auf die Schlafstruktur. Die Autoren schlussfolgern daraus u. a., dass Vibration die negativen Wirkungen von nächtlichem Lärm verstärken kann. Sie machen aber die Einschränkung, dass ihr Studiendesign nicht geeignet ist, um aus den Ergebnissen die klinische Relevanz der beobachteten Wirkungen abschätzen zu können.

Ising 2004

In einer der sehr wenigen neueren Originalarbeiten zur Untersuchung des Einflusses von niedrig frequentem Lärm auf gesundheitsbezogene Parameter wurden hier in einer Feldstudie 68 Kinder untersucht. Die Untersuchung umfasste insgesamt die Wirkung von Lärm und Schadstoffen aus dem Verkehr auf die Bronchitishäufigkeit sowie auf den Cortisolgehalt im Speichel der Kinder am Morgen. Die hoch Lärm exponierten Kinder des Kollektivs ($L_{\text{night},8\text{h}} = 54\text{-}70$ dB(A) außen) wohnten nahe an einer in hohem Maße von schweren LKWs benutzten Straße und waren demnach einem hohen Anteil niedrig frequenten Lärms - auch in der Nacht - sowie Erschütterungen ausgesetzt. Diese hoch exponierten Kinder wiesen am

Morgen einen signifikant erhöhten Cortisolgehalt im Speichel auf (im Vergleich zu allen anderen Kindern der Studie), was als Stressreaktion interpretiert wird. Es erfolgt jedoch keine klare Abgrenzung zum höher frequenten Anteil der Lärmexposition. Zusätzlich waren die hoch exponierten Kinder auch Erschütterungen aus den Vorbeifahrten der LKW ausgesetzt.

3.5.3 Übersichtsarbeiten Erschütterungen und Infraschall

Den Überblick über die ausgewerteten Übersichtsarbeiten zu den Wirkungen von Vibration und Infraschall aus Bahnlärm zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Übersichtsarbeiten Erschütterungen/Vibration und Infraschall

Ausgewiesen ist immer der Erstautor der Publikation

Erstautor	Jahr	Exposition	Zielgröße	Untersuchungsmethodik	Bemerkungen
Mersch-Sundermann	2010	Vibration (in Kombination mit Lärm)	Belästigung	Literaturlauswertung	Belästigung steigt sowohl mit Vibration als auch mit Lärm (in untersch. Ausmaß und sich gegenseitig beeinflussend)
Elias + Villot	2012	Vibration + Niedrig-frequenter Schall	Belästigung + Schlafstörung	Literaturlauswertung	u. a. Defra, TVANE
Berglund	1996	Niedrig-frequenter Schall	Belästigung, Sprachverständnis, Hörschwellenverschiebung,	Literaturlauswertung	Wirkung auf Gleichgewichtssinn o. Atmung nur bei sehr hohen Pegeln (150 – 172 dB); Kreislaufeffekte im Labor; Vgl. mit Fluglärmwirkung wg. hohem Infrasch.-Anteil
Leventhall	2003	Niedrig-frequenter Schall	Diverse	Literaturlauswertung	Hpts. Lit. Von 1970 - 1990
Waye	2004	Niedrig-frequenter Schall	Schlaf (Qualität)	Literaturlauswertung	
UniTexas	2011	Niedrig-frequenter Schall	Cortisolgehalt im Speichel nach Aufwachen	Literaturlauswertung	Unterschiedliche Einflüsse auf Cortisolgehalt; keine eindeutigen Ergebnisse

Mersch-Sundermann 2010

Diese Literaturlauswertung zum Krankheitswert von Schienenlärm betrachtet bzgl. des Zusammenwirkens von Lärm und Vibration von den neueren Studien hauptsächlich die Ergebnisse des schwedischen TVANE-Projekts von 1997 bis 2007 (s. auch Originalarbeiten). Prinzipiell nimmt die Belästigung durch Lärm durch den zusätzlichen Einfluss der Vibration zu – und umgekehrt. Die Zunahme ist im Vergleich eines Gebietes mit Vibration und eines Gebietes ohne Vibration signifikant. Um die gleiche Belästigung bei gleicher Anzahl von Zügen zu erzeugen, muss in Gebieten mit Vibration der L_{eq} um mindestens 10 dB(A) leiser sein.

Weitere von Mersch-Sundermann ausgewertete Studien weisen darauf hin, dass der Anteil des Lärms an der Belästigung höher ist als der Anteil der Vibration.

Elias und Villot 2012

In diesem aktuellen, von der EU geförderten Bericht zum RIVAS-Projekt (Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project) werden die Wirkungen der Vibration (und teilweise auch von niedrig frequentem Schall) auf den Menschen zusammengetragen. Auch diese Zusammenstellung zitiert das TVANE-Projekt, aber auch die Untersuchungen für das britische Umweltministerium DEFRA (DEFRA 2007). In erster Linie werden Untersuchungen zu Belästigung und Schlafstörungen (meist selbstberichtet) ausgewertet. Ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien untereinander ist nicht möglich wegen unterschiedlicher Messgrößen für die Vibration. Insgesamt werden aber die Ergebnisse der TVANE-Untersuchungen (gegenseitige Verstärkung der Auswirkung von Lärm und Vibration auf das Belästigungsempfinden) durch andere Studien bestätigt.

Berglund 1996

In dieser Zusammenstellung wurden ältere Studien zur Wirkung von niedrig frequentem Schall (vor 2000) ausgewertet. Da nicht viele Untersuchungen zu umweltbedingtem niedrig frequentem Schall vorliegen, wurde diese ältere Übersichtsarbeit mit berücksichtigt. Vornehmlich wurden Effekte wie Belästigung, Sprachverständnis oder zeitweise Hörschwellenverschiebung betrachtet. Weitere Effekte, z. B. Reaktionen des Herz-Kreislauf-Systems oder Gleichgewichtsstörungen wurden erst bei sehr hohen Pegeln beobachtet, wie sie normalerweise nicht in der Umwelt auftreten. In Laboruntersuchungen konnte auch für niedrig frequenten Schall eine Wirkung auf das Kreislaufsystem festgestellt werden. Viele Studien können die Exposition durch niedrig frequenten Schall nicht vom Einfluss gleichzeitiger Vibration bzw. Lärm höherer Frequenzen trennen.

Leventhall 2003

Im Auftrag des britischen Umweltministeriums wurde diese Literaturlauswertung zu den Wirkungen niedrig frequenten Schalls durchgeführt. Es werden Untersuchungen zur Wirkung von niedrig frequentem Schall auf das kardiovaskuläre System, den Gleichgewichtssinn, das Gehör, das Hormonsystem, das zentrale Nervensystem, die Atmung und die Schlafstruktur erwähnt. Der Autor weist aber darauf hin, dass es sich in allen Fällen - sowohl was die Exposition als auch was die Effekte betrifft - nicht um isolierte Phänomene handelt und eine Interpretation der Zusammenhänge daher schwierig bzw. nicht möglich ist. Deutliche, auf niedrig frequenten Schall zurückzuführende Auswirkungen, sind erst bei sehr hohen Schallpegeln sicher festzustellen (z. B. Druckgefühl oder Schmerzen im Ohr ab > 140 dB(A); Müdigkeitsreaktion ab 10 dB(A) über Hörschwelle). Als niedrigschwelligster Effekt werden Belästigungsreaktionen genannt. Gesichert sind Veränderungen des Schlafmusters durch die Einwirkung von Infraschall. Moderate Infraschalleinwirkungen können einen beruhigenden Effekt haben. Ab Überschreiten der Hörschwelle treten als unangenehm empfundene Wirkungen in den Vordergrund.

Waye 2004

Es wurden für diese Übersicht zur Wirkung von niedrig frequentem Schall nur Studien ausgewählt, die Auswirkungen auf den Schlaf untersuchen und die die Exposition zusätzlich zum A-gewichteten Schalldruck auch durch C-Gewichtung oder Analysen des Frequenzspektrums beschreiben. Waye weist ausdrücklich auf die Notwendigkeit von Messungen im Innenraum bei der Erfassung der Exposition durch Infraschall hin. Die ausgewählten Studien erfassen die Effekte u. a. in Form von selbstberichteten Schlaf-/Einschlafstörungen.

Insgesamt weisen die Studien auf einen negativen Einfluss von niedrig frequentem Schall im Frequenzbereich 20 - 200 Hz bereits bei relativ niedrigen Schalldruckpegeln (z. B. 69 dB(A) bei 50 Hz; liegt aber bereits über der Hörschwelle!) auf die Schlafqualität (insbesondere erschwertes Einschlafen) hin.

UniTexas 2011

In diesem Bericht zu Umweltlärm (alle Arten) wird u. a. auf Laboruntersuchungen zum Zusammenhang der Einwirkung niedrig frequenten Schalls (< 125 Hz, 40 dB(A)) mit dem Cortisolgehalt im Speichel nach dem Aufwachen hingewiesen, bei denen eine verringerte Cortisolkonzentration als in der Vergleichsgruppe gefunden wurde. Andere, ähnliche Untersuchungen kamen nicht zu solchen eindeutigen Ergebnissen.

Direkte gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Erschütterungen und niedrig frequenten Schall aus dem Bahnverkehr können aus den hier betrachteten Studien und Übersichten nicht herausgelesen werden. Jedoch gibt es einige Hinweise darauf, dass Vibration – und in geringerem Maße auch niedrig frequenter Schall – insbesondere über die Wirkung auf den Schlaf prinzipiell ähnliche gesundheitliche Relevanz besitzen können wie Lärm. Gesichert ist durch viele Untersuchungen der deutliche Beitrag der Vibration zu Belästigungsreaktionen (v. a. TVANE, DEFRA) und die Wirkung auf die Herzfrequenz (Croy 2013).

Vibration und Lärm haben beide einen Einfluss auf das Ausmaß der Belästigung. Je nach Studie wird einmal der Lärm, ein anderes Mal die Vibration als dominierend im Beitrag zur Belästigung festgestellt. Diese Ergebnisse wurden jedoch bei unterschiedlichen Lärm- und Vibrationspegeln ermittelt, so dass davon auszugehen ist, dass der Beitrag der beiden Expositionsgrößen zur Belästigung jeweils davon abhängt, wie sich die beiden Expositionen überlagern. So können bei niedrigen Lärmpegeln auch noch geringe Erschütterungen deutlich wahrgenommen werden bei insgesamt eher niedriger Belästigung. Hohe Lärmpegel dagegen können einerseits die Wahrnehmung von Vibrationen „übertönen“, andererseits kann zusätzlich wahrgenommene Vibration bei bereits hohen Lärmpegeln als besonders störend empfunden werden, bzw. es können hier nur starke Erschütterungen zusätzlich wahrgenommen werden, die entsprechend stark zusätzlich belästigen.

Im Rahmen des TVANE-Projektes wurde eine Schwinggeschwindigkeit von 0,4 mm/s als eine Art Schwellenwert für die deutliche Zunahme der Belästigungsreaktion ermittelt (Gidlöf-Gunnarsson 2012). In unterschiedlichen Untersuchungen dieses Projektes wurde der zusätzliche Einfluss der Vibration auf die Lärmbelästigung einmal mit 5-7 dB sowie mit 10 dB angegeben (je nach absoluter Höhe des Lärmpegels). D. h. bei zusätzlicher Vibration müsste der Lärmpegel um 5-10 dB niedriger sein, um zur gleichen Belästigungsreaktion zu führen. Zudem wurde ein Unterschied zwischen verschiedenen Tageszeiten aufgezeigt (Peris 2011 und 2012): abends und insbesondere nachts fiel die Belästigung durch Vibration stärker aus als am Tag. Dies wird bestätigt durch die Untersuchungen zur Wirkung auf den Schlaf (s. u.).

Im Grundsatz das gleiche Bild wie für die Belästigungsreaktionen ergibt sich aus den Untersuchungen zum Einfluss von Erschütterungen auf den Schlaf bzw. die Schlafqualität. Unter Vibration wurden übereinstimmend in mehreren Untersuchungen (sowohl im Feld als auch im Labor) Schlafstörungen und Minderung der Schlafqualität festgestellt (Kozziel 2011, Ögren 2009, Öhrström 2009). Der Einfluss der Vibration ist diesbezüglich qualitativ genauso zu betrachten wie der Einfluss des Lärms auf den Schlaf. Da verminderte Schlafdauer und -qualität in einem Wirkungszusammenhang u. a. mit dem kardiovaskulären System sowie

Stressfaktoren stehen, ist die Verbindung zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Betracht zu ziehen. Zudem geht die Verminderung von Schlafdauer und -qualität auch mit Beeinträchtigungen der Aufmerksamkeit am Folgetag einher.

Hilfreich wären vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Messmetriken für die Vibration in der betroffenen Wohnumgebung (in Innenräumen!) an Bahnstrecken, um z. B. Ergebnisse der Situation vor Ort mit den Studien aus Schweden oder Großbritannien vergleichen und (zumindest teilweise) quantitative Einschätzungen der Beeinträchtigungen vornehmen zu können.

Schwierig ist die Einschätzung, inwieweit niedrig frequenter Schall (sowohl niedrig frequente Anteile des Bahnlärms als auch niedrig frequenter sekundärer Luftschall aus Lärm und Vibration) einen Beitrag zu gesundheitlicher Beeinträchtigung leisten kann. In Felduntersuchungen ist keine klare Abgrenzung zu den Wirkungen höher frequenten Schalls möglich (z. B. Ising 2004). Konkrete Schlüsse zur gesundheitlichen Wirkung von Infraschall aus Verkehrslärm können aus diesen Untersuchungen nicht gezogen werden. Oft wird der A-gewichtete Schallpegel gemessen, der die niedrig frequenten Anteile unzureichend erfasst. Aus Laboruntersuchungen ergibt sich ein klareres Bild. Hier zeigen sich Beeinträchtigungen (z. B. Müdigkeit, Druckgefühle) erst ab relativ hohen Schalldruckpegeln (> 100 dB), wie sie in umweltrelevanten Situationen (z. B. an Bahnstrecken) im Bereich der niedrigen Frequenzen normalerweise nicht auftreten. Allerdings wurden auch bei niedrigeren Schalldruckpegeln (z. B. 69 dB(A) bei 50 Hz; hörbarer Bereich) bereits Belästigungsreaktionen und eine Beeinträchtigung des Schlafs festgestellt (Waye 2004). Auch hier wären für eine erste Einschätzung Expositionsmessungen (in Innenräumen) in realen Situationen an Bahnstrecken hilfreich.

Zwischenfazit

Die aufgelisteten Studien zeigen, dass Erschütterungen - in geringerem Maß auch niedrig frequenter Schall - im Hinblick auf Belästigung, negative Beeinflussung des Schlafs und Beeinträchtigung der Aufmerksamkeitsleistung prinzipiell die gleiche Wirkung zeigen wie Lärm, bzw. dass sie dessen negative Wirkung verstärken („Schwellenwert“ aus TVANE-Untersuchungen: Schwinggeschwindigkeit 0,4 mm/s). Dies gilt auch, wenn hohe Lärmpegel die Erschütterungen in der Wahrnehmung Betroffener „übertönen“ (sie können bei > 50 dB(A) $L_{\text{night, außen}}$ aber auch die Störwirkung in besonderem Maße verstärken). Zwischen 0,0009 und $0,5 \text{ m/s}^{-1,75}$ Vibrationsdosis stellt Koziel 2011 einen kontinuierlichen Anstieg (von 5 auf 50 %) des Anteils der Schlafgestörten fest.

Von einzelnen Autoren werden im Hinblick auf die Störung des Schlafs die gleichen Wirkungspfade der Erschütterungsbelastung wie bei der Lärmeinwirkung vermutet (z. B. vegetative Aktivierung des Herz-Kreislaufsystems). Die Wirkung von Vibrationen bei Zugvorbeifahrten (ungewichtete Schwingbeschleunigung $0,036 - 0,072 \text{ mm/s}^2$) auf die Herzfrequenz (Croy 2013) unterstützt dieses Ergebnis. Hoch lärmbelastete Anwohner von Bahnstrecken, die - abhängig von Boden- und Gebäudebeschaffenheit - häufig auch vermehrt Erschütterungen ausgesetzt sind, sind daher als besonders belastet zu bewerten. Bahnverkehrsbedingte Erschütterungen lassen sich somit als zusätzlicher Stressor für die Anwohner einschätzen. Zur Höhe eines in dB(A) umgerechneten Belastungswertes wurde in einigen Literaturquellen und in Zusammenhang mit Belästigungsreaktionen Abschätzungen zwischen 5 - 10 dB(A) genannt.

Eine genaue Expositionserfassung in Wohn- und Schlafräumen ist die Voraussetzung für eine quantitative Abschätzung der Auswirkungen von Vibrationen sowie auch des niederfrequenten Schalls auf die Betroffenen. Hier stehen vor allem Fragen der Wirkung auf den Schlaf bzw. auf die Schlafqualität und zusätzliche Aufwachreaktionen im Vordergrund.

4 Fazit

Mit der vorliegenden Literaturlauswertung zu gesundheitlichen Auswirkungen von Bahnlärm ist der Stand der Wissenschaft bis zum Jahresende 2013 zu den folgenden Fragestellungen zusammengestellt:

- Welche Kenntnisse zu gesundheitlichen Auswirkungen von Bahnlärmbelastungen einschließlich Bahnverkehrs-bedingter Erschütterungen liegen vor?
- Sind diese Erkenntnisse ausreichend, um sowohl die gesundheitlichen Auswirkungen von Bahnlärmbelastungen auf in der Nachbarschaft von Schienenverkehrswegen lebende Menschen bewerten als auch um die Notwendigkeit von Lärm-minderungsmaßnahmen einschätzen zu können?
- Unterscheiden sich die gesundheitlichen Auswirkungen als Folge von Bahnlärm-belastungen von denen anderer Lärmarten?

Im Ergebnis der Literatursichtung zeigt sich, dass zwar die Anzahl der wissenschaftlichen Studien ausschließlich zu Bahnlärmbelastungen im Vergleich zu anderen Lärmarten geringer ausfällt, jedoch können aus der vorliegenden Literatur bereits wichtige Aussagen zu den gesundheitlichen Wirkungen getroffen werden.

Zunächst unterscheidet sich die Lärmcharakteristik des Bahnlärms von der Lärmcharakteristik anderer Verkehrsträger deutlich. So werden Geräusche von vorbeifahrenden Zügen allgemein durch einen schnellen und steilen Schalldruckpegelanstieg, ein je nach Zuglänge andauerndes hohes Lärmplateau und ein rasches Abfallen des Schalldruckes nach Vorbeifahrt des Zuges wahrgenommen. Die vergleichsweise sehr hohen Maximalpegel können je nach Zugart (Güterzug, Personenzug, Hochgeschwindigkeitszug u.a.), Wartungs-zustand von Gleisanlagen und Waggons, der technischen Ausrüstung der Waggons sowie in Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit Pegel über 100 dB(A)_{außen} an der angrenzenden Wohnbebauung erreichen.

Bahnlärm-Exponierte nehmen nicht den Mittelungspegel sondern aktuelle Einzelereignisse wahr, die im Vergleich zum Mittelungspegel deutlich höher ausfallen können. Bei Zuggeräuschen korreliert der Maximalpegel mit dem Pegelanstieg stärker als z.B. beim Straßenverkehrs- oder Fluglärm. Zudem lassen sich infolge von Zugvorbeifahrten auch Vibrationen nachweisen, die eine zusätzliche Belastungssituation bzw. Exposition der Anwohnerinnen und Anwohner nahe der Bahnstrecke / dem Gleiskörper darstellen.

Zur Bewertung von gesundheitlichen Auswirkungen von Bahnlärmbelastungen zeigen sich in den Schlaflaborstudien vergleichbare Effekte auf die Schlafarchitektur sowie Hinweise auf kardiale Reaktionen wie bei anderen Verkehrslärmarten. Schienenlärm erhöht die Aufwachwahrscheinlichkeit, wobei diese Erhöhung bei Exposition gegenüber einem Güterzug höher ausfällt als bei einem Personenzug oder bei entsprechender Fluglärmexposition.

Es ergeben sich insbesondere bei Schlafenden deutliche Zusammenhänge zwischen den Maximalpegeln und physiologischen Effekten. Bei gleichem Schallpegel hat die Charakteristik des Schallereignisses - insbesondere die Schnelligkeit des Pegelanstiegs oder die Dauer des Schallereignisses - einen modulierenden Einfluss. Grundsätzlich bewegen sich dabei die physiologischen Reaktionen unabhängig von der Lärmart in derselben Größenordnung.

Zur Annahme langfristiger gesundheitlicher Auswirkungen von Bahnlärm liegen ausreichend Untersuchungsergebnisse und begründete Hinweise vor. Epidemiologische Studien bringen zwar die grundsätzliche Schwierigkeit mit sich, unterschiedliche Lärmquellen nicht hinreichend voneinander abzugrenzen zu können und andere Einflussgrößen (confounder) wie z. B. Feinstaubbelastung und/oder sozioökonomische Faktoren von der eigentlichen Bahnlärmwirkung zu trennen. Trotz dieser Einschränkungen stützen die epidemiologischen Ergebnisse zu Bahnlärmbelastungen die Erkenntnisse, die u.a. bei der Untersuchung akuter, kurzfristiger Bahnlärmwirkungen gewonnen wurden, und sie liegen darüber hinaus auf einer Linie mit entsprechenden Studienbefunden zu anderen Lärmquellen. Besonders die Befunde zu Schlafstörungen sind als relevant für die Entstehung langfristiger Erkrankungen des kardio-vaskulären Systems einzuordnen.

Trotzdem bleiben die einzelnen Schritte des Übergangs von akuten physiologischen Reaktionen zu manifestierten Gesundheitsbeeinträchtigungen weiterhin Gegenstand der Forschung. Für schlüssige Zusammenhänge zwischen Bahnlärmbelastung und Leistungsfähigkeit bedarf es ebenso weiterer Forschungsaktivitäten.

Die bisherigen Erkenntnisse erlauben, vulnerable Gruppen gegenüber Bahnlärmbelastungen zu benennen. Es gibt Hinweise, dass der kindliche Organismus weniger sensitiv gegenüber lärminduziertem Aufwachen und Verschiebungen der Schlafstruktur reagiert, dafür akute Reaktionen wie Blutdruckänderungen und Motilität vergleichsweise stärker ausgeprägt auftreten können. Weiter zeigen sich bei Vorgeschiedigten (z. B. Diabetes mellitus oder Arteriosklerose der Herzkranzgefäße) stärkere gesundheitlich negative Effekte in Bezug auf die Entwicklung von Bluthochdruck.

Anhand der ausgewerteten Literatur ist weiter ersichtlich, dass Vibrationseinflüsse eine Beeinträchtigung der Schlafstruktur und Schlafqualität zusätzlich zur Lärmeinwirkung hervorrufen können. Die Kombinationswirkung von Lärm und Vibrationen ist allerdings bislang nicht ausreichend und abschließend wissenschaftlich bearbeitet. Weitere diesbezügliche Untersuchungen werden daher als wertvoll angesehen.

Unbestritten ist aus gesundheitlicher Sicht, dass Lärm gleich welcher Herkunft und Charakteristik, insbesondere wenn er als störend empfunden wird, als ein starker Stressor für den Körper zu bewerten ist und der Körper diesbezüglich mit einer Alarmreaktion / Fluchtreaktion antwortet. Diese äußert sich unter anderem in - messbaren - Veränderungen von physiologischen Parametern. Solche körperlichen Reaktionen dienen dem Ziel, jederzeit eine adäquate Schutzreaktion durch Kampf oder Flucht möglich zu machen. Diese Vorgehensweise läuft, willentlich nicht beeinflussbar, immer nach dem gleichen Muster ab.

Der menschliche Organismus ist nicht in der Lage, häufige Alarmreaktionen, die starke Stressoren für den Körper darstellen, langfristig zu kompensieren. Im Falle fehlender ausreichender Erholungsphasen treten zwangsläufig körperliche Beschwerden und Funktionsstörungen als Folge der chronischen Belastung auf. Auf diesen Vorgängen beruhen letztlich alle Theorien zum Schädigungsmuster von Lärm mit dem langfristigen Endpunkt Herz-Kreislaufkrankungen. Es ist davon auszugehen, dass dies auch bei Bahnlärm zutreffend ist. Diese Annahme spiegelt sich auch in den Ergebnissen der ausgewerteten Studien zu Bahnlärmbelastungen wider.

Aus der Literaturoswertung ergeben sich Hinweise, ab welchen Pegelwerten von Bahnlärm-Expositionen deutliche Effekte gefunden werden:

Ab Mittelungspegeln im Bereich von 40 bis 45 dB(A)_{innen} zeigen sich Zusammenhänge für akute Effekte wie Anstieg der Herzfrequenzamplitude, Zunahme von Arousal und Veränderungen der Schlafarchitektur. Für diese Effekte konnten auch bei Maximalpegeln (L_{max}) im Bereich von 48 dB(A)_{innen} bis 66 dB(A)_{innen} Assoziationen gefunden werden. Zudem war in einzelnen Studien die Korrelation der Effekte mit den Maximalpegeln höher als mit den Durchschnittspegeln. Langzeituntersuchungen der Auswirkungen von Bahnlärm lassen nur begrenzt Angaben über eine Expositions-Wirkungsbeziehung im Hinblick auf Herz-Kreislaufstörungen zu. Für Pegelbelastungen oberhalb 50 dB(A) L_{den} (außen) zeigt sich jedoch ein schwach signifikant erhöhtes Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen und oberhalb 60 dB(A) (außen) eine Assoziation mit der Zunahme von Bluthochdruck.

Zusammenfassend betrachtet, reichen die bisherigen Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung zur sachgerechten Beurteilung von gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Gesundheitsgefahren durch Bahnlärmbelastung aus. Insbesondere zeigen die ausgewerteten Studien, dass Analogieschlüsse zu den Bewertungen anderer Lärmquellen möglich sind.

Aus Vorsorgegründen sollten unter gesundheitlichen Gesichtspunkten auch in Bezug auf Bahnlärm die Interim- und Zielwerte der WHO (2009) für Lärmbelastungen (z. B. langfristig max. 40 dB(A) $L_{\text{night, outside}}$ und als Interims-Zielwert 55 dB(A) $L_{\text{night, outside}}$) als Orientierung dienen.

Es ist davon auszugehen, dass Vibrationen die Entwicklung gesundheitsschädlicher Folgen (langfristige Wirkungen) des parallel einwirkenden Bahnlärms verstärken. Vibrationseinflüsse in Folge von Schienenverkehr sind daher bei der Bewertung der Belastungssituation gegenüber Bahnlärm zukünftig ausreichend einzubeziehen.

Im Mittelrheintal wurden über längere Zeiträume Bahnlärmexpositionen gemessen (z. B. maximale Spitzenwerte oberhalb von 107 dB(A); Mittelungspegel von ca. 78 dB(A)), bei denen - nach den Ergebnissen der vorliegenden Auswertung - von gesundheitsschädigenden langfristigen Auswirkungen auszugehen ist. Zum Gesundheitsschutz der Betroffenen müssen umfassende Anstrengungen zur Minderung von Bahnlärm zeitnah unternommen werden. Ungeachtet dessen, ergaben Vibrationsmessungen in Häusern an der Mittelrheintal-Bahntrasse im Jahr 2010 Messwerte, die nach geltendem Immissionsschutzrecht als erheblich belästigend (die Anhaltswerte der DIN 4150-2 (1999) waren deutlich überschritten) und damit als schädliche Umwelteinwirkung einzustufen waren (HLUG 2011). Auch entlang der Rheinschiene bei Bonn ist die Belastung von Anwohnern durch Bahnlärm, vor allem durch Güterverkehr, stellenweise als hoch zu bewerten.

Daneben ist zu beachten, dass allgemein die Lärmschutzmaßnahmen, wo immer möglich, primär an der Lärmquelle selbst anzusetzen sind, um nicht ungewollt die Lebensqualität der Betroffenen durch sekundäre und stark ins Wohnumfeld eingreifende Maßnahmen (z. B. hohe Schallschutzwände, eingeschränkte Fensterlüftungen) zusätzlich zu mindern.

Als Schlussfolgerungen der vorliegenden Bewertung des aktuellen Sachstands zu gesundheitlichen Wirkungen als Folge von Bahnlärmbelastungen sind festzustellen:

- **Es liegen ausreichende Kenntnisse aus wissenschaftlich anerkannten Studien vor, um die gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Gesundheitsgefahren durch Bahnlärm sachgerecht beurteilen zu können.**
- **Analogieschlüsse zu den gesundheitlichen Bewertungen anderer Lärmquellen sind möglich. Ab Mittelungspegeln von 40 bis 45 dB(A)_{innen} zeigen sich Zusammenhänge für akute Effekte (Anstieg der Herzfrequenzamplitude, Zunahme von Arousal, Veränderungen der Schlafarchitektur). Für Pegelbelastungen oberhalb 50 dB(A) $L_{den,au\beta en}$ zeigt sich ein schwach signifikant erhöhtes Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen und oberhalb 60 dB(A)_{au\beta en} eine Assoziation mit der Zunahme von Bluthochdruck.**
- **Die Interims- bzw. Zielwerte der WHO (2009) für Lärmbelastungen können für Bahnlärm als Orientierung zur Formulierung von Anforderungen an den Lärmschutz dienen.**
- **Maximalpegel einzelner Zugvorbeifahrten und die Häufigkeit der Schallereignisse stehen in Zusammenhang mit den ab Maximalpegeln von 48-66 dB(A)_{innen} beobachteten Wirkungen. Der Maximalpegel ist insbesondere bei der Betrachtung des Schlafes zu berücksichtigen. Es gibt Hinweise auf einen engeren Bezug der Wirkungen zu Maximalpegeln (im Vergleich zu Durchschnittspegeln).**
- **Die Lärmcharakteristik – beschrieben durch die Steilheit des Pegelanstiegs oder die zeitliche Dauer der Ereignisse - kann physiologische Effekte verstärken.**
- **Bahnverkehrs-bedingte Vibrationen vermögen über ihre Effekte auf die Schlafstruktur die gesundheitsbeeinträchtigenden Lärmwirkungen zu verstärken. Dies sollte bei der Bewertung des Risikos für langfristige Bahnlärmwirkungen berücksichtigt werden.**
- **Forschungsbedarf besteht in erster Linie zum genauen Zusammenhang zwischen Höhe der Maximalpegel, Häufigkeit der Ereignisse und den damit verbundenen gesundheitlichen Wirkungen sowie zum Einfluss von Vibration.**

5. Glossar

A-Bewertung	Bewertung des Hörfrequenzbereichs, die dem menschlichen Ohr am nächsten kommt
C-Bewertung	Frequenzbewertung, die die tieferen Frequenzen im Vergleich zur A-Bewertung stärker einschließt
dB	Dezibel, physikalische Maßeinheit (logarithmisch) u.a. für den Schallpegel
dB(A)	Einheit Dezibel des A-bewerteten Schallpegels
L_{AF}	A-bewerteter Schallpegel mit der Zeitbewertung F (fast)
L_{AS}	A-bewerteter Schallpegel mit der Zeitbewertung S (slow)
L_{ASmax}	Maximalwert des A-bewerteten Schallpegels mit der Zeitbewertung S (slow)
L_{eq}	äquivalenter Dauerschallpegel über den Zeitraum t gemessen
L_{Aeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel
$L_{Aeq,8h}$	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel gemittelt über eine Beurteilungsdauer von 8 bzw. 24 Stunden (h)
$L_{Aeq,24h}$	
$L_{eq\ night}$	nächtlicher Dauerschallpegel gemittelt von 22-06 Uhr
L_{den}	24-Stunden-Mittelungspegel mit unterschiedlicher Gewichtung für day/evening/night
L_{max}	Maximaler Schallpegel
SEL	Sound Exposure Level: auf die Einwirkzeit von einer Sekunde bezogene Dosis

6 Literaturverzeichnis

Aasvang (1981) - Aasvang GM, Engdahl B und Rothschild K. Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels. *Applied Acoustics* 68, no. 9:970-981.

Aasvang (2008) - Aasvang GM, Mowm T, Engdahl B. 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,.

Aasvang (2011) - Aasvang GM, Øverland B, Ursin R, Mowm T. A field study of effects of road traffic and railway noise on polysomnographic sleep parameters. *J. Acoust. Soc. A.* 129 (6) 3716-3726.

ALPNAP (2007) - Heimann D, de Franceschi M, Emeis S, Lercher P, Seibert P (Eds.). *Air Pollution, Traffic Noise and Related Health Effects in the Alpine Space – A Guide for Authorities and Consultants*. ALPNAP comprehensive report. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 335 pp.

Babisch (2002) - Babisch W, The noise/stress concept, risk assessment and research needs, *Noise & Health*, 4(16) 1-11.

Babisch (2006) - Babisch W, Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased, *Noise & Health*, 8(30) 1-29.

Babisch (2008) - Babisch W, Road traffic noise and cardiovascular risk, *Noise & Health*, 10(38) 27-33.

Babisch (2009) - Babisch W, van Kamp I, Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension, *Noise & Health*, 11(44) 161-168.

Basner (2008) - Basner M, Elmenhorst EM, Maaß H, Müller U, Quehl J, Samel A, Vejvoda M. 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,.

Basner (2011) - Basner M, Müller U, Elmenhorst EM. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *SLEEP*; 34(1):11-23.

Basner (2012) - Basner M, Brink M, Elmenhorst EM. Critical appraisal of methods for the assessment of noise effects on sleep. *Noise & Health* 14 321-329.

Berglund (1996) - Berglund B, Hassmen P, Job RFS, Sources and effects of low-frequency noise, *Journal of the Acoustical Society of America* 99(5) 2985-3002.

Bluhm G, Rosenlund M, Berglund N. Traffic noise and health effects. In: Carter N, Job RF, editors. *Noise Effects 98. Proceedings of the 7th International Congress on Noise as a Public Health Problem*, Sydney, Vol. 1. National Capital Printing Act: Sydney; 1998. pp 247-50.

Breimhorst (2009) - Breimhorst M, Marks A, Robens S, Griefahn B Blink rate during tests of executive performance after nocturnal traffic noise. *Noise & Health* 11 (45) 217-222.

Croy (2013) - Croy I, Smith M, Persson Wayne K. *Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: an experimental study*. *BMJ open*, 3, e002655.

DEFRA (2007) - Defra UK (Hg.) Human response to vibration in residential environments, Final Report
(<http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/noise/research/documents/human-response-vibration-residential-environments.pdf>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

DIN 4150-2 (1999) – Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Berlin Beuth Verlag

DLR (2010) - Müller U, Elmenhorst EM, Maass H, Rolny V, Pennig S, Quehl J, Basner M. Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS - Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten; Teilvorhaben DLR: Metaanalyse und Feldstudie; Abschlussbericht / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft. Projektleiter: U. Müller. - [Köln], 126 S. : graph. Darst., Kt. - Förderkennzeichen BMBF 19U6014B. - Verbund-Nr. 01050291 (in der TIB/UB Hannover unter der Signatur F 10 B 2688 vorhanden (gedruckte Version))

(<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Dratva (2012) - Dratva J, Phuleria HC, Foraster M, Gaspoz JM, Keidel D, Kunzli N et al. Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults. *Environ Health Perspect*; 120:50-5.

EC (2000) - Position paper on dose-response relationships between transportations noise and annoyance. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg: European Commission

EC (2002) - Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*; 189:12-25.

EEA (2009) - Transport at a crossroads (Report No 3/2009). Copenhagen: European Environment Agency.

EEA (2010) - Good practice guide on noise exposure and potential health effects (Technical report No 11/2010). Copenhagen: European Environment Agency.

Elias & Villot (2012) - Elias P, Villot M. Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration (RIVAS-Project), WP1. Assessment and monitoring procedures, T1.1. Assessment of human exposure (http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/rivas_cstb_wp1_d1_4_v03_assesment_human_response.pdf, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Elmenhorst (2012) - Elmenhorst EM, Pennig S, Rolny V, Quehl J, Mueller U, Maaß H, Basner M. Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance. *Science of the total Environment* 242, 48-56.

Elmenhorst (2013) - Elmenhorst EM, Hörmann H-J, Oeltze K, Pennig S, Vejvoda M, Wenzel J, Leistungsmessung in der Luftfahrt: portabler 3-min PVT. Konferenzbeitrag DGLRM

Eriksson (2012) - Eriksson C, Nilsson ME, Stenkvis D, Bellander T, Pershagen G. Residential traffic noise exposure assessment - Application and validation of Environmental

Noise Directive maps. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2012; (4 July 2012; doi: 10.1038 / jes.2012.60), (<http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2012;volume=14;issue=59;spage=140;epage=147;aulast=Eriksson>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Evans (2001) - Evans GW, Lercher P, Meis M, Ising H, Kofler, WW. Community noise exposure and stress in children. *J Acoust Soc Am* 2001 109(3) 1023-7.

Gidlöf-Gunnarsson (2011) - Gidlöf-Gunnarsson A, Öhrström E, Ögren M, Jerson T. Comparative studies on railway and road traffic noise annoyances and the importance of number of trains. Proceedings of the 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem, ICBEN 2011. London, UK. p. 686-694.

Gidlöf-Gunnarsson (2012) - Gidlöf-Gunnarsson A, Ögren M, Jerson T, Öhrström E. Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise & Health [serial online]* 2012 [cited 2012 Oct 17];14 (59) 190-201. (<http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2012/14/59/190/99895>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Graham (2009) - Graham JM, Janssen SA, Vos H, Miedema HM. Habitual traffic noise at home reduces cardiac parasympathetic tone during sleep. *Int J Psychophysiol* 72 (2) : 179-86.

Griefahn (2006) - Griefahn B, Marks A, Robens S. Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *Journal of Sound and Vibration* 295:129-140.

Griefahn (2007a) - Griefahn B. Noise and sleep. In: *Noise and its effects* (eds. L. Luxon, D. Prasher), pp. 567-587. Wiley.

Griefahn (2007b) - Griefahn B. Forschungsverbund leiser Verkehr Bereich 2000 Einzelaufgabe 2311: Lärmbedingte Schlafstörungen: Verkehrslärmarten, Frequenzspektren, temporäre Verkehrsruhe Schlussbericht.

Griefahn (2008) - Griefahn B, Marks A, Robens S. Temporarily limited nocturnal traffic curfews to prevent noise induced sleep disturbances. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN).

Griefahn (2008b) – Griefahn B, Bröde P, Marks A, Basner M. Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. SLEEP 31(4):569-577.

Griefahn (2010) - Griefahn B, Robens S. Experimental studies on the effects of nocturnal noise on cortisol awakening response. Noise & Health 12(47) : 129-36.

Groothuis-Oudshoorn (2002) K. Sleep disturbance and aircraft noise exposure - exposure effect relationship, TNO, Netherlands, Report 2002-27.

HLUG (2011) Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie – Messbericht über Erschütterungsmessungen an Wohngebäuden an der rechtrheinischen Schienenstrecke

Horne (1994) - Horne J, Sleep related vehicle accidents. British Medical Journal, 310:565–567.

Hygge (2003) - Hygge S. Classroom experiments on the effects of different noise sources and sound levels on long-term recall and recognition in children. Appl. Cognit. Psychol. 17 895-914.

Ising (2002) - Ising H, Ising M, Chronic cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise, Noise & Health 4(16) 13 – 21.

Ising (2004) - Ising H, Lange-Asschenfeldt H, Moriske HJ, Born J, Eilts M, Low frequency noise and stress: Bronchitis and cortisol in children exposed chronically to traffic noise and exhaust fumes, Noise & Health 6(23) 21 – 28.

Kaku (2004) - Kaku J, Hiroe M, Kuwano S, Namba S. Sleep disturbance by traffic noise: an experimental study in subjects' own houses using a portable CD player. Journal of Sound and Vibration 277 459-464.

Klatte (2007) - Klatte M, Meis M, Sukowski H, Schick S Effects of irrelevant speech and traffic noise on speech perception and cognitive performance in elementary school children. Noise & Health 9:36 64-74.

Koch (2012) - Koch J, Exekutive Funktionen und Gedächtnis. Deutsches Ärzteblatt 11 518.

Koziel (2011) - Koziel Z. Exposure Response Relationships from Railway Noise in the Presence of Vibration, M. sc. Thesis, School of Computing, Science and Engineering, University of Salford, Salford UK.

Kraus (2013) - Kraus U, Schneider A, Breitner S, Hampel R, Ruckerl R, Pitz M, Geruschkat U, Belcredi P, Radon K, Peters A. Individual daytime noise exposure during routine activities and heart rate variability in adults: a repeated measures study. *Environm. Health Perspect.* 121(5) 607-12.

Lercher (1992) - Lercher P. Auswirkungen des Straßenverkehrs auf Lebensqualität und Gesundheit: Transitstudie - Sozialmedizinischer Teilbericht. Amt der Tiroler Landesregierung.

Lercher (2003) - Lercher P, Evans GW, Meis M. Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. *Environment and behaviour* 35 725-735.

Lercher (2010) - Lercher P, Brink M, Rudisser J, Van RT, Botteldooren D, Baulac M, Defrance J. The effects of railway noise on sleep medication intake: results from the ALPNAP-study. *Noise Health*, 12:110-119.

Lercher (2011) - Lercher P, Botteldooren D, Widmann U, Uhrner U, Kammeringer E. Cardiovascular effects of environmental noise: Research in Austria, *Noise Health* 2011, 13:234-250, (<http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2011/13/52/234/80160>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Leventhall (2003) - Leventhall G A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects; Report für Defra, UK , (http://westminsterresearch.wmin.ac.uk/4141/1/Benton_2003.pdf, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Ljungberg (2007) - Ljungberg JK, Neely G, Cognitive after-effects of vibration and noise exposure and the role of subjective noise sensitivity, *Journal of Occupational Health* 49 (2007) 111-116.

Maschke (2007) - Maschke C, Hecht K. Schlaf und Lärm. *Prakt. Arb. Med.* 7 12-19.

Mersch-Sundermann (2010) - Mersch-Sundermann V, Schmidt S, Adrian C, Grimm S, Braeunig M, Schöner J. Macht Schienenlärm krank? - Studie des Universitätsklinikums Freiburg zur Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm, Freiburg, Hrsg. Regionalverband Südlicher Oberrhein; 2010 (<http://www.uniklinik-Freiburg.de/iuk/live/Aktuelles/IUKFreiburg2010Schienenlaerm> Bericht.pdf; zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Moehler (2000a) - Moehler U, Liepert M, Schuemer R, Schuemer-Kohrs A, Schreckenberger D, Mehnert P und Griefahn B. Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Straßen- und Schienenverkehr. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 47 (4).

Moehler (2000b) - Moehler U, Liepert M, Schuemer R, Griefahn B. Differences between railway and road traffic noise. Journal of Sound and Vibration 231(3):831-864.

Muzet (1983) - Muzet A. Research on noise-disturbed sleep since 1978. In: Rossi G, ed. Noise as a Public Health Problem. Milano; Edizioni Tecniche a cura del Centro Ricerche e Studi Amplifon 883-93.

Öhrström (1980) - Öhrström E, Björkman M, Rylander R. Laboratory annoyance and different traffic noise sources. Journal of Sound and Vibration 70, no. 3 (Juni 8): 333-341.

Öhrström (1996a) - Öhrström E, Skånberg AB. 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.

Öhrström (1997a) - Öhrström E. Community reactions to railway traffic - effects of countermeasures against noise and vibration. InterNoise '97: Budapest, Hungary.

Öhrström (1997b) - Öhrström E. 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 (2005) - Öhrström, E, Skanberg AB, Barregard L, Svensson H, Ängerheim P. Effects of simultaneous exposure to noise from road- and railway traffic. InterNoise '05: Rio de Janeiro, Brasil.

Öhrström (2006) - Öhrström E, Skånberg A. Litteraturstudie avseende effekter av buller och vibrationer från väg- och tågtrafik. ["Literature review on effects of noise and vibrations from railway and road traffic"]. Report 112. Gothenburg, Sweden: Occupational and Environmental Medicine, University of Gothenburg.

Öhrström (2007a) - Öhrström E, Barregård L, Andersson E, Skånberg A, Svensson H, Ängerheim P. Annoyance due to single and combined exposure from railway and road traffic noise. *J Acoust Soc Am* 2007;122:2642-52.

Öhrström (2007b) - Öhrström E, Andersson E, Skånberg A, Barregård L. Relationships between annoyance and exposure to single and combined noise from railway and road traffic. *InterNoise '07: Istanbul, Turkey*.

Öhrström (2007c) - Öhrström E, Gunnarsson AG, Ögren M. Listening experiments on effects of road traffic and railway traffic noise occurring separately and in combination. *InterNoise '07: Istanbul, Turkey*.

Öhrström (2007d) - Öhrström E, Barregård L, Andersson E, Skånberg AB, Svensson H, Angerheim P. 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.

Öhrström (2008) - Öhrström E, Ögren M, Jerson T, Gidlöf-Gunnarsson A. 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 (2009) - Öhrström E, Gidlöf-Gunnarsson A, Ögren M, Jerson T. Effects of railway noise and vibration in combination: field and laboratory studies, *Proceedings of EURONOISE 2009, Edinburgh*, (<http://toc.proceedings.com/06782webtoc.pdf>, zulezt aufgerufen am 09.12.2013).

Ögren (2009) - Ögren M, Öhrström E, Effects of railway noise and vibrations on sleep – experimental studies within the Swedish research program TVANE, *Proceedings of EURONOISE 2009, Edinburgh*, (<http://toc.proceedings.com/06782webtoc.pdf>, zulezt aufgerufen am 09.12.2013).

Peris (2011) – Peris E, Woodcock J, Sica G, Moorhouse A, Waddington D. Community reaction to railway vibration at different times of the day, 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem ICBEN (2011), London, UK , (<http://www.icben.org/2011/pdf/ICBEN2011.pdf#page=823>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Peris (2012) - Peris E, Woodcock J, Sica G, Moorhouse AT, Waddington DC (2012). Annoyance due to railway vibration at different times of the day. The Journal of the Acoustical Society of America, 131(2), EL191 - EL196.

Quehl (2008) - Quehl J, Basner M. 2008. Nächtlicher Flug-, Straßen- und Schienenverkehrslärm: Belästigungsunterschiede und kumulative Wirkungen. Lärmbekämpfung 3(6), 240-246.

Quehl (2011) - Quehl J, Müller U, Maass H, Pennig S, Rolny V, Basner M, Elmenhorst EM. Dosis-Wirkungsbeziehungen aus einer Feldstudie zur Wirkung nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf, die psychomotorische Leistung und die Belästigung, Lärmbekämpfung 6(5), 188-196.

Rechtschaffen (1968) - Rechtschaffen A, Kales, A. A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System For Sleep Stages of Human Subjects. US Dept of Health, Education, and Welfare; National Institutes of Health.

Röösli (2013) - Röösli M, Auswirkung von Lärm auf die Gesundheit. Therapeutische Umschau 2013, 70(12), DOI 10.1024/0040-5930/0000470.

Rüdissler (2007) - Rüdissler J, Lercher P, Heller A. Adressbasierte Analyse von Gesundheitsdaten - eine Medikationsstudie im Nordtiroler Wipptal, GIS-Zeitschrift für Geoinformatik, 5-11.

Rüdissler (2008) - Rüdissler J, Lercher P, Heller A. Traffic exposure and medication - a GIS based study on prescription of medicines in the Tyrolean Wipptal. Ital J Public Health 5:261-7.

Said (2001) - Said A, Fleischer D, Kilcher H, Fastl H, Grütz HP. Zur Bewertung von Erschütterungsimmissionen aus dem Schienenverkehr. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 48 (6) 191-201.

Saremi (2008) - Saremi M, Grenèche J, Bonnefond A, Rohmer O, Eschenlauer A, Tassi P: Effects of nocturnal railway noise on sleep fragmentation in young and middle-aged subjects as a function of type of train and sound level. *Int J Psychophysiol.* Dec;70(3):184-191.

Schmidt (2013) - Schmidt F, Basner M, Kröger G, Weck S, Schnorbus B, Muttray A, Sariyar M, Binder H, Gori T, Warnholtz A, Münzel T. Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *Eur Heart J* 34(45):3508-14.

Sørensen (2011a) - Sørensen M, Hvidberg M, Andersen ZJ, Nordsborg RB, Lillelund KG, et al. Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study. *Eur Heart J* 32: 737–744.

Sørensen (2011b) - Sørensen et al.: Exposure to road traffic and railway noise and associations with blood pressure and self-reported hypertension: a cohort study. *Environmental Health* 10:92.

Sørensen (2012) - Sørensen M, Andersen ZJ, Nordsborg RB, Jensen SS, Lillelund KG, et al. Road Traffic Noise and Incident Myocardial Infarction: A Prospective Cohort Study. *PLoS ONE* 7(6): e39283.

doi:10.1371/journal.pone.0039283,

(<http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0039283>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Sørensen (2013) - Sørensen M, Andersen ZJ, Nordsborg RB, Becker T, Tjønneland A, Overvad K, Raaschou-Nielsen O. Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study, *Environ Health Perspect* 121:217-222.

Swart (2003) - Swart E, Gesundheitliche Auswirkungen von Lärmexpositionen: Welche Rolle spielen Indikatoren der sozialen Stellung? *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 50 Nr. 4.

Tassi (2010a) - Tassi P, Saremi M, Schimchowitsch S, Eschenlauer A, Rohmer O, Muzet A. Cardiovascular responses to railway noise during sleep in young and middle-aged adults. *Eur J Appl Physiol*, 108(4):671-680.

Tassi (2010b) Tassi P, Rohmer O, Schimchowitsch S, Eschenlauer A, Bonnefond A,

Margiocchi F, Poisson F, Muzet A. Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age. *Environ Int.* 36(7):683-689.

Tassi (2013) - Tassi P, Rohmer O, Bonnefond A, Margiocchi F, Poisson F, Schimchowitch S. Long term exposure to nocturnal railway noise produces chronic signs of cognitive deficits and diurnal sleepiness. *Journal of Environmental Psychology* 33 45-52.

TNO (2002) - Passchier-Vermeer W, Vos H, Steenbekkers JHM, Van der Ploeg FD,

TNO (2003) - Passchier-Vermeer W. Night-time noise events and awakening. Delft, TNO, Netherlands, Report 2003-32.

TNO (2007) - Passchier-Vermeer W, Vos H, Janssen SA, Miedema HME, Slaap en verkeersgeluid, TNO, Netherlands, Report 2007-D-R0012/A, (www.tno.nl/slaapverstoring, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

TVANE (2011) - Öhrström E, Gidlöf-Gunnarsson A, Ögren M, Jerson T, Slutrapport Forskningsprogrammet TVANE (train vibration and noise effects), Effekter av buller och vibrationer från tag och vägtrafik – tagbonus, skillnader och samverkan mellan tag – och vägtrafik, Rapport nr 1:2011, Enheten för Arbets- och miljömedicin Avdelningen för Samhällsmedicin och Folkhälsa, Göteborgs Universitet, (www.tvane.se, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

UniTexas (2011) - The University of Texas School of Public Health, Environmental Noise and Non-Aural Health Effects - A Research Summary, Institute for Health Policy Research Into Action Initiative, 2001, (<https://sph.uth.edu/content/uploads/2011/12/Noise-Pollution-Research-Summary.pdf>; zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

UBA (2006) - Transportation Noise and Cardiovascular Risk. WaBoLu-Hefte 01/06.

Van Kamp (2013) - van Kamp I, Davies H, Noise and health in vulnerable groups: A review. *Noise & Health* 15(64) 153-159.

Wagner (2010) - Wagner J, Cik M, Marth E, Santner MI, Gallasch E, Lackner A, Raggam RB. Feasibility of testing three salivary stress biomarkers in relation to naturalistic traffic noise exposure. *Int. J. Environ. Health* 213 153-155.

Waye (2004) - Waye KP, Effects of low frequency noise on sleep, *Noise & Health* 6(23) (2004) 87 – 91.

WHO (1999) - *Guidelines for Community Noise*. Geneva: World Health Organization.

WHO (2009) - *Night noise guidelines for Europe*. Geneva: World Health Organization.

WHO (2011) - *Burdens of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: The WHO European Center for Environment and Health, Bonn Office: WHO Regional Office for Europe.

Woodcock (2011) - Woodcock J, Peris E, Sica G, Koziel Z, Moorhouse AT, Waddington DC. Human response to vibration in residential environments: Establishing exposure-response relationships, 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem ICBEN (2011), London, UK, (<http://www.icben.org/2011/pdf/ICBEN2011.pdf#page=720>, zuletzt aufgerufen am 09.12.2013).

Zeichart (1994a) - Zeichart K, Sinz A, Schuemer-Kohrs A, Schuemer R. Erschütterungen durch Eisenbahnverkehr und ihre Wirkungen auf Anwohner - Teil 1: Zum Zusammenwirken von Erschütterungs- und Geräuschbelastung. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 41 (1994) 43-51 Springer-Verlag.

Zeichart (1994b) - Zeichart K, Sinz A, Schuemer-Kohrs A, Schuemer R. Erschütterungen durch Eisenbahnverkehr und ihre Wirkungen auf Anwohner - Teil 2: Überlegungen zu Immissionsrichtwerten für Erschütterungen durch Schienenverkehr. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 41 (1994) 104-111 Springer-Verlag.