

Schlaf – nächtlicher Verkehrslärm – Stress – Gesundheit: Grundlagen und aktuelle Forschungsergebnisse

Teil II: Aktuelle Forschungsergebnisse*

Von C. Maschke, H. Ising und K. Hecht

Einleitung

Lärm kann den Schlaf nicht nur im Sinne einer subjektiven Lästigkeit (Erwachen) stören, sondern auch unterhalb der Weckschwelle zu tiefgreifenden Veränderungen in der Schlafstruktur führen. In diesem Zusammenhang ist besonders die Fragmentierung der Schlafstruktur, die Reduzierung des REM-Schlafes (Störung der geistig-emotionalen Vorgänge) und eine längere Verweildauer im oberflächlichen Schlaf zu nennen. Im Sinne der Stress-theorie ist nächtlicher Lärm als Stressor einzustufen. Biotisch (meßbar) drückt sich der Stress u. a. durch erhöhten Blutdruck, beschleunigte Atem- und Herzfrequenz, durch gesteigerten Stoffwechsel und herabgesetzten Hautwiderstand aus, sowie durch eine vermehrte Ausschüttung der Nebennierenhormone Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol (vgl. Teil I: Grundlagen). Die Hormone des nervösgesteuerten Nebennierenmarks haben eine Anstiegszeit von wenigen Sekunden bis zu einer Minute (Adrenalin) bzw. 7-12 Minuten (Noradrenalin). Das vom Hypothalamus und der Hypophyse gesteuerte Cortisol hat eine Anstiegszeit von ca. einer Stunde [42, 43]. Die Nebennierenmarkshormone Adrenalin, Noradrenalin halten die Stressreaktion für kurze Zeit aufrecht, das Nebennierenrindenhormon Cortisol bewirkt ihr längeres Bestehen.

Diese Erkenntnisse sowie die Ergebnisse von mehreren experimentellen und epidemiologischen Studien über die Stresshormonausscheidung bei nächtlichem Verkehrslärm werden in der Lärmwirkungsforschung kontrovers diskutiert (vgl. [44]). Wir halten es daher für sinnvoll, sowohl die Untersuchungen als auch deren Ergebnisse detailliert vorzustellen und präventivmedizinisch zu bewerten.

8 Forschungsergebnisse

8.1 Experimentelle Studien

(a) Carter, N. L., et al.: *Environmental noise and sleep – A study of arousals, cardiac arrhythmia and urinary catecholamines* [45]

In dieser Laborstudie wurden die Beziehungen zwischen Lärmereignissen, Aufwachreaktionen, Schlafstadien und ventrikulären vorzeitigen Kontraktionen (VVK) untersucht. Zusätzlich wurde geprüft, ob die gesamte nächtliche Ausscheidung von Katecholaminen im

Tabelle 4: Tabellarische Zusammenfassung der Studie

Autor	Carter et al.
Art der Studie	Labor
Art des Lärms	Fluglärm, Lkw-Lärm
Anzahl der Probanden	9
Alter der Probanden (Jahre)	26, 46-75
Eigenschaften	hatten Herzrhythmusstörungen
Kontrollierte Einflüsse	k. A.
Versuchsdauer (Tage)	mehr als 4
Anzahl der Lärmnächte	2
Schallbelastung	50 Flug- oder Lkw-Lärmereignisse, $L_{max} = 65-72$ dB(A)
Anzahl der Ruhenächte	1
Schallbelastung	L_{eq} (22.00–7.00) höchstens 32 dB(A)
Anzahl der Gewöhnungsnächte	1
Dauer der Exposition	ganze Nacht (Lärmereignisse willkürlich verteilt)
Erhobene Schallpegelgrößen	L_{Amax} , L_{Aeq}
Ort der Messung	innen
Erhobene Parameter	EEG, EOG, EMG, EKG (VVK), Adrenalin, Noradrenalin, Dopamin
Statistische Auswerteverfahren	Schlafstadienbestimmung nach Rechtschaffen und Kales, Varianzanalysen, log-lineare Modelle
Besonderheiten	VVK
Schlafstadienverteilung	k. A.
Schlafstadienwechsel	signifikant mehr ($p < 0,05$) in Lärm- als in Ruheintervallen
Schlafstadienlatenz	Latenz der Alphawellen war in Lärmintervallen signifikant kürzer als in Ruheintervallen (gilt für Stadien 1, 2, REM)
Arousalreaktionen	Def.: Auftreten einer Alphawelle im Vertex EEG, wenn die Versuchsperson erstens zu Beginn des Intervalls schlief und zweitens die Alphawelle erst innerhalb des lauten oder leisen Intervalls begann, 53 % der Lärmintervalle zeigten eine A., 11 % der Ruheintervalle zeigten eine A., Schlafstadien und Lärm korrelierten mit der Wkt. für eine A. ($p < 0,05$), Wkt. einer A. nahm vom Stadium 1 bis 4 ab, Wkt. im REM-Schlaf wie im Stadium 2
Herzrhythmusstörungen	4 Vpn. hatten VVK, VVK waren nicht signifikant mit Lärmereignissen korreliert (aber mit Schlafstadien)
Stresshormone	Konzentration von Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin war in Lärm- und Ruhenächten <i>nicht</i> unterschiedlich

* Teil I s. Bundesgesundhbl. 40, 1 (1997) 3–10.

Wkt = Wahrscheinlichkeit; k. A. = keine Angaben; VVK = vorzeitige ventrikuläre Kontraktionen.

Urin durch eine Lärmexposition während des Schlafes erhöht wird.

Neun Versuchspersonen mit Herzrhythmusstörungen, einer 26 Jahre alt, die anderen acht zwischen 46 und 75 Jahre alt, verbrachten vier nicht aufeinanderfolgende Nächte in einem Labor im Krankenhaus. Die erste Nacht diente der Eingewöhnung, die zweite Nacht war eine Ruhenacht, danach folgten zwei Lärmnächte. Die Lärmexposition bestand aus 50 elektroakustisch eingespielten Fluglärm- oder Lkw-Lärm-Ereignissen. Die zeitlichen Abstände zwischen den Ereignissen wurden zufällig gewählt. Die Maximalpegel variierten zwischen 65 und 72 dB(A).

Der nächtliche Hintergrundlärmpegel (22.00–7.00 Uhr) wurde vor Beginn des Experiments im Schlafrum jede Minute aufgezeichnet. Der höchste gemessene Kurzzeitmittelungspegel betrug $L_{m, 1 \text{ min.}} = 32 \text{ dB(A)}$. Während des Schlafes wurden EEG-, EOG-, EMG- und EKG-Ableitungen vorgenommen.

Die renale Katecholaminausscheidung wurde folgendermaßen bestimmt: Die Probanden wurden aufgefordert, vor der Nachtruhe die Blase zu leeren. Der Nachturin wurde gesammelt (nachts und am Morgen) und die Menge an Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin bezogen auf das Harnvolumen bestimmt.

Auswertung:

Zur Überprüfung der Lärmreaktionen wurden die Veränderungen im EEG, EOG, EMG und EKG während der Lärmperioden mit denen von Ruheperioden gleicher Länge verglichen. Zur statistischen Auswertung wurden Varianzanalysen nach dem allgemeinen linearen Modell durchgeführt. Ein log-lineares Modell wurde auf die Anzahl der Schlafstadienwechsel angewendet.

Ergebnisse (vgl. Tab. 4):

Die Autoren zeigen, daß der Lärm die Wahrscheinlichkeit für Arousalreaktionen in allen Schlafstadien in gleichem Maße erhöhte ($p < 0,05$), daß es in Lärmintervallen signifikant mehr Schlafstadienwechsel gab als in Ruheintervallen und daß die VV_k (nicht signifikant) mit den Lärmereignissen korrelierte. Die Katecholaminausscheidung bezogen auf das Harnvolumen war in den Lärmnächten nicht höher als in den Ruhenächten.

(b) Maschke, C.: *Der Einfluß von Nachtfluglärm auf den Schlafverlauf und die Katecholaminausscheidung* [13]

In dieser Laborstudie wurde der Einfluß von Nachtfluglärm auf die Schlafstadienverteilung (Schlafqualität) untersucht und in einer Teilstudie zusätzlich der Katecholamingehalt im Acht-Stunden-Sammelurin bestimmt.

Vierzig normalhörende, gesunde Flughafenanwohner im Alter von 18 bis 40 Jahren verbrachten jeweils fünf aufeinanderfolgende Nächte (Montag bis Samstag) im Schlaflabor. Es wurden vier Gruppen zu jeweils zehn Versuchspersonen gebildet und jede Gruppe mit einer unterschiedlichen Anzahl von Überflügen (0, 16, 32 oder 64) mit einem annähernd konstanten Überflugpegel von $L_{\text{max innen}} = 75 \text{ dB(A)}$ ausgesetzt. Hierbei wurden fünf Flugvarianten realisiert: Abendflug (Flüge in den ersten beiden Nachtstunden), Morgenflug (Flüge in den letzten beiden Nachtstunden), Nachtflug (Flüge in der gesamten Nacht), Mitternachtsflug (Flüge in der 3. bis 6. Nachtstunde), Abend-/Morgenflug (Flüge in den ersten beiden und letzten beiden Nachtstunden).

Von den zehn Probanden der Kontrollgruppe verbrachten anschließend noch acht Personen eine zweite Woche im Schlaflabor (Katecholamingruppe). Sie wurden in fünf Nächten in der dritten bis sechsten Schlafstunde (Mitternachtsflug) durch verschiedene Fluglärmsituationen belastet. Diese bestanden aus 16, 32 oder 64 Überflügen mit $L_{\text{max innen}} = 75 \text{ dB(A)}$ und 64 Überflügen mit $L_{\text{max innen}} = 55$ oder 65 dB(A) . Für jede Nacht wurde ebenso wie in der ersten unbeschallten Woche der Acht-Stunden-Sammelurin erhoben und die gesamte Ausscheidungsmenge an Adrenalin und Noradrenalin und der Magnesiumgehalt bestimmt. Von allen Versuchspersonen wurden Persönlichkeitsmerkmale, Tagesbelastung und das Schlaferleben erfragt.

Auswertung:

Die Schlafstadien wurden nach Rechtschaffen und Kales bestimmt. Die statistische Auswertung erfolgte durch (Ko-) Varianzanalysen. Ferner wurden Einzelvergleiche (Scheffé-Tests) und Trendtests durchgeführt.

Ergebnisse (vgl. Tab. 5):

Die Studie zeigt, daß es durch den applizierten Fluglärm zu einer Umverteilung der Schlafstadienzeiten kommt. Die Stadien 3 + 4 und der REM-Schlaf werden zugunsten des Stadiums 1, der Wachzei-

ten und der Movementtime verkürzt. Die Schlafstadienumverteilung ist von der zeitlichen Abfolge der Flugereignisse (Flugvarianten) abhängig. Besonders schlafstörend ist der Morgen-/Abendflug.

Hervorzuheben ist das Ergebnis der Teilstudie »Katecholaminausscheidung«. Die mittlere Adrenalinausscheidung wurde durch den Fluglärm signifikant um 60 % erhöht. Das Schlaferleben und die morgendliche Befindlichkeit der Versuchspersonen war signifikant verschlechtert. Mit höherem Überflugpegel war sowohl ein schlechteres Schlaferleben als auch bis $L_{\text{max}} = 65 \text{ dB(A)}$ eine vermehrte Adrenalinausscheidung zu verzeichnen (Auswertung zum Schlaferleben in [46, 47]).

(c) Maschke, C., et al.: *Nachtfluglärmwirkungen auf Anwohner* [14]

In dieser experimentellen Feldstudie wurden der Einfluß von Nachtfluglärm auf das Schlaferleben, die Streßhormonausscheidung und die Blutwerte untersucht und ein Zusammenhang zwischen Persönlichkeitsmerkmalen und dem Schlaferleben bzw. der Streßhormonausscheidung geprüft.

Zu diesem Zweck wurde eine Schlafuntersuchung an 28 normalhörenden, gesunden Versuchspersonen im Alter von 38 bis 65 Jahren, die in einer fluglärmbelasteten Gegend lebten, durchgeführt. Die Untersuchung dauerte jeweils zwölf aufeinanderfolgende Tage. Während dieser Zeit wurden in zwei mal vier Nächten (Montag bis Freitag) Daten erhoben. In den ersten vier Nächten herrschten die normalen akustischen Bedingungen, die nicht kontrolliert wurden. Danach wurde in jeder folgenden Nacht zwischen 0 und 4 Uhr mit einer Beschallungsanlage Fluglärm in den häuslichen Schlafrum eingespielt. Dieser bestand aus 16 oder 64 Überflügen pro Nacht mit Überflugpegeln von $L_{\text{max}} = 55$ oder 65 dB(A) .

Mit einem Fragebogen am Abend wurde die Tagesbelastung und mit einem Fragebogen am Morgen das Schlaferleben der Probanden erfaßt. In jeder der acht Nächte wurde der Harn gesammelt. Er wurde im Labor unter anderem auf den Gehalt an Adrenalin, Noradrenalin, Dopamin und Cortisol hin analysiert.

Jeder Versuchsperson wurde in der ersten und zweiten Woche jeweils

Tabelle 5: Tabellarische Zusammenfassung der Studie

Autor	Maschke
Art der Studie	Labor
Art des Lärms	Fluglärm
Anzahl der Probanden	40 (8)
Alter der Probanden (Jahre)	18–40
Eigenschaften	gesund, normalhörend, keine Schlafstörungen, Flughafenanwohner
Kontrollierte Einflüsse	Persönlichkeitsmerkmale, Tagesbelastung, Tagesbeschallung, Temperatur im Schlafraum
Versuchsdauer (Tage)	5–14
Anzahl der Lärmnächte	5
Schallbelastung	0, 16, 32, 64 Überflüge, $L_{\max} = 75 \text{ dB(A)}$ [55, 65 dB(A)]
Anzahl der Ruhenächte	0, 5
Schallbelastung	$L_{\text{Lüfter}} < 25 \text{ dB(A)}$
Anzahl der Gewöhnungsnächte	0
Dauer der Exposition	mehrere Stunden (verschiedene Flugvarianten)
Erhobene Schallpegelgrößen	$L_{A\max}$, L_{Aeq}
Ort der Messung	innen
Erhobene Parameter	EEG, EOG, EMG, Katecholamine im Urin (8 Vpn), Fragebögen
Statistische Auswerteverfahren	Schlafstadienbestimmung nach Rechtschaffen und Kales, Faktorenanalyse, multiple Regression, (Ko-)Varianzanalyse, Scheffé-Test, Trendtest
Besonderheiten	Kontrollgruppe
Schlafstadienverteilung	Bei Fluglärm Umverteilung der Stadienzeiten vom tiefen zum flachen Schlaf (Ausmaß steigt mit steigender Überfluganzahl und ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
Schlafstadienwechsel	Bei 8 Vpn. (Katecholaminuntersuchung) Anzahl der S. zwischen beschallten und unbeschallten Nächten unterschiedlich ($p < 0,01$)
Schlafstadienlatenz	Bei 8 Vpn. (Katecholamingruppe) Ein-, Tief- und REM-Schlaf latenz zwischen beschallten und unbeschallten Nächten nicht signifikant unterschiedlich
Leichtschlaf	Stadium 1 verlängert (Ausmaß steigt mit steigender Überfluganzahl und ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
Tiefschlaf	Verkürzt (Ausmaß steigt mit steigender Überfluganzahl und ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
REM-Schlaf	Gegenüber ungestörtem Schlaf um 18 % verkürzt (Ausmaß ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
Aufwachreaktionen (obj.)	Bei 8 Vpn. (Katecholamingruppe) Anzahl der A. zwischen beschallten und unbeschallten Nächten signifikant unterschiedlich
Wachphasen	Verlängert (Ausmaß steigt mit steigender Überfluganzahl und ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
Körperbewegungen	Def.: Movementtime aus EEG, erhöht (Ausmaß steigt mit steigender Überfluganzahl und ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Überflüge)
Streßhormone	Bei Fluglärm im Vergleich zur Ruhebedingung mittlere Adrenalinausscheidung um 60 % und Noradrenalinausscheidung um 17 % erhöht ($p < 0,05$),
Morgenfragebogen	Schlaferleben (Katecholamingruppe) deutlich verschlechtert und abhängig vom Überflugpegel*
Abendfragebogen	k. A.

* Erweiterte Auswertung in [43, 44].

eine Blutprobe entnommen und eine Langzeit-Blutdruckmessung durchgeführt.

Auswertung:

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten wurde mittels Varianz- oder Kovarianzanalysen durchgeführt. Zusammenhangshypothesen wurden mit bivariaten und multiplen Korrelationsanalysen überprüft.

Ergebnisse (vgl. Tab. 6):

Die wichtigsten Ergebnisse waren eine signifikante ($p < 0,01$) relative Erhöhung der Adrenalinausscheidung um 17 % und der Cortisolausscheidung um 19 % in den Nächten mit Fluglärm. Für die individuelle Cortisolausscheidung war eine hohe Determination (50 %) mit dem Persönlichkeitsmerkmal »Aggressivität« zu verzeichnen ($p < 0,01$). Die Thrombozytenzahl nahm signifikant um 11 % ab, und die subjektive Schlafqualität verschlechterte sich um ca. 30 % ($p < 0,01$).

(d) Maschke, C., et al.: Berliner Nachtlärmstudie [48] (teilweise in [47])

An 25 normalhörenden Versuchspersonen im Alter zwischen 31 und 47 Jahren, die in Gegenden mit hohem Straßenverkehrslärm lebten (Berlin-Steglitz, Berlin-Prenzlauer Berg), wurden unter anderem das Schlaferleben und die Streßhormonausscheidung erhoben. Die Probanden schliefen bei nächtlichen Außenpegeln von $L_{Aeq} = 52,8$ bis $68,5 \text{ dB(A)}$ zwei Nächte mit geschlossenem Fenster und zwei Nächte mit geöffnetem Fenster, was einer Pegeldifferenz von 9 bis 18 dB(A) am Ohr der Schläfer entsprach. Nach jeder Versuchsnacht wurde die Katecholamin- und Cortisolausscheidung bezogen auf Kreatinin bestimmt.

Auswertung:

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit (Ko-)Varianzanalysen und multiplen Regressionsanalysen.

Ergebnisse (vgl. Tab. 7):

Für die Cortisolausscheidung konnte in den Nächten mit geöffnetem Fenster eine signifikante Erhöhung um 35 % ermittelt werden. Bei geschlossenen Fenstern war mit steigendem Außenpegel ein Trend zu einer höheren Cortisolausscheidung zu verzeichnen. Bei geöffnetem Fenster ergab sich ein anderes Bild. Die Differenz der Cortisolwerte zwi-

Tabelle 6: Tabellarische Zusammenfassung der Studie

Autoren	Maschke, C.; Arndt, D.; Ising, H.; Laude, G.; Thierfelder, W.; Contzen, S.
Art der Studie	Experimentelle Feldstudie
Art des Lärms	Fluglärm
Anzahl der Probanden	28
Alter der Probanden (Jahre)	38–65
Eigenschaften	normalhörend, gesund, lebten in fluglärmbelasteten Gegenden
Kontrollierte Einflüsse	Tagesbelastung
Versuchsdauer (Tage)	12
Anzahl der Lärmnächte	4
Schallbelastung	16, 64 Überflüge mit $L_{max} = 55, 65 \text{ dB(A)}$
Anzahl der Ruhenächte	4
Schallbelastung	k. A.
Anzahl der Gewöhnungsnächte	0
Dauer der Exposition	0.00–4.00 Uhr
erhobene Schallpegelgrößen	L_{Amax} , L_{Aeq}
Ort der Messung	innen
erhobene Parameter	Stresshormonausscheidung, Blutwerte, Fragebögen
Statistische Auswerteverfahren	(Ko-)Varianzanalysen, Korrelationsanalysen
Besonderheiten	Lärm wurde in den Schlafzimmern der Probanden simuliert
Blutwerte	Bei Fluglärm Thrombozytenzahl um 11 % vermindert ($p < 0,05$)
Stresshormone	Bei Fluglärm relative Erhöhung der mittleren Adrenalin-ausscheidung um 17 % ($p < 0,01$), der Cortisolausscheidung um 19 % ($p < 0,01$), keine Änderung der Dopaminausscheidung, keine Änderung der Noradrenalin-ausscheidung
Morgenfragebogen	Bei Fluglärm subjektive Schlafqualität um 30 % verschlechtert ($p < 0,01$), subjektive Einschlafzeit um 7 Min. verlängert ($p < 0,01$), erinnerbares Erwachen nahm um 80 % zu ($p < 0,01$)

schen »geöffnetem Fenster« und »geschlossenem Fenster« nahm bei gleicher Fensterschalldämmung mit steigendem Außenpegel ab. So war z. B. bei einer Zunahme des Schlafraumpegels von 40 auf 50 dB(A) eine höhere Cortisoldifferenz zu beobachten als bei einer Zunahme des Schlafraumpegels von 50 auf 60 dB(A).

Sowohl das Schlaferleben als auch die morgendliche Befindlichkeit war bei geöffnetem Fenster deutlich verschlechtert ($p < 0,01$).

8.2 Zusammenfassung der experimentellen Studien

Nächtlicher Lärm führte in drei von vier Untersuchungen – auch in häuslicher Umgebung – zu einer erhöhten renalen Adrenalin- bzw. Cortisolausscheidung. Die Untersuchung von Carter, in der keine erhöhte Stresshormonausscheidung verzeichnet wurde, weist schwerwiegende methodische Mängel auf. So wurde weder die Sammelzeit für die re-

nale Ausscheidung konstant gehalten, noch wurde die Ausscheidung auf einen zeitlich gering schwankenden Parameter, z. B. Kreatinin, bezogen. Kreatinin stellt bei unbekanntem Gesamtausscheidungsvolumen eine von der Sammelungszeit und dem Volumen weitgehend unabhängige Bezugsgröße dar. Darüber hinaus wurde die Kortisolausscheidung nicht ermittelt und überprüft.

Die verbleibenden drei Berliner Untersuchungen lassen folgende Interpretationen zu:

Der nächtliche Lärm muß als Stressor bezeichnet werden, da er imstande war, sowohl den »Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Regelkreis« als auch den »Hypothalamus-Nebennierenmark-Regelkreis« zu aktivieren.

Ist die nächtliche Lärmbelastung ungewohnt, so ist sowohl eine erhöhte Adrenalin-ausscheidung als auch verzögert eine erhöhte Cortisolausscheidung zu beobachten. Wird die Intensität eines

gewohnten nächtlichen Verkehrslärms erhöht, ist eine vermehrte Cortisolausscheidung zu beobachten.

Die relative Erhöhung der Adrenalin-ausscheidung in der Fluglärm-Feldstudie (ungewohnter nächtlicher Lärm) ist mit 17 % deutlich geringer als in der Laborstudie, in der eine relative Zunahme von 60 % beobachtet wurde. Eine mögliche Erklärung könnte, neben den bekannten Unterschieden von Feld- und Laborstudien, das unterschiedliche Alter der Versuchspersonen bzw. die zusätzliche nächtliche Belastung durch Straßenverkehrslärm darstellen. Die nächtliche Belastung durch Straßenverkehrslärm konnte in der Fluglärm-Feldstudie leider nicht kontrolliert werden.

Die relative Erhöhung der Cortisolausscheidung lag im Feldversuch mit 19 % in der gleichen Größenordnung wie die Adrenalin-ausscheidung. Ein Vergleich der Zeitverläufe von nächtlicher Cortisolausscheidung und nächtlicher Adrenalin-ausscheidung zeigt, daß eine hohe Cortisolausscheidung mit einer deutlich verminderten Adrenalin-ausscheidung verbunden ist. In diesen Versuchsnächten kommt offensichtlich ein verändertes Stress-Reaktionsmuster zum Tragen. Dieses Reaktionsmuster ist ebenfalls in Situationen mit erhöhtem nächtlichem Straßenverkehrslärm zu beobachten und tritt vermutlich auch bei extremen Überflugpegeln (über 75 dB(A)_{innen}) auf.

Eine nächtliche, lärmbedingt erhöhte Adrenalin-ausscheidung scheint an eine intermittierende (nicht extreme) Geräuschbelastung gebunden zu sein. In ihrem Zeitverlauf ist ein Adaptationsprozeß zu beobachten, der zeitverzögert von einer zunehmenden Cortisolausscheidung begleitet wird. Beide, eine erhöhte Adrenalin-ausscheidung ebenso wie eine erhöhte Cortisolausscheidung, sind demzufolge Hinweise auf eine belastende Verkehrslärmsituation.

Überflugpegel und Anzahl der Flüge

In der Fluglärm-Laborstudie konnte ein Zusammenhang zwischen dem Überflugpegel und dem Schlaferleben bzw. der Adrenalin-ausscheidung abgesichert werden. Die Adrenalin-ausscheidung nahm (bis 65 dB(A)) mit dem Überflugpegel zu. Das Schlaferleben verschlechterte sich bei höheren Überflugpegeln deutlich.

Auch in der Fluglärm-Feldstudie ist bei höherem Überflugpegel ein verschlech-

Tabelle 7: Tabellarische Zusammenfassung der Studie

Autoren	Maschke, C.; Ising, H.; Arndt, D.; Braun, C.
Art der Studie	Feld
Art des Lärms	Straßenverkehrslärm
Anzahl der Probanden	25
Alter der Probanden (Jahre)	31–47
Eigenschaften	normalhörend, lebten in Gegenden mit hohem nächtlichem Straßenverkehrslärm [$L_{eq, \text{außen}} = 52,8\text{--}68,5 \text{ dB(A)}$]
Kontrollierte Einflüsse	Schlafraumtemperatur, Helligkeit
Versuchsdauer (Tage)	4
Anzahl der Lärmnächte	2
Schallbelastung	Pegelerhöhung gegenüber Normalnächten um 9–18 dB(A)
Anzahl der Normalnächte	2
Schallbelastung	abhängig von Fensterschalldämmung und Außenpegel
Anzahl der Gewöhnungsnächte	0
Dauer der Exposition	ganze Nacht
erhobene Schallpegelgrößen	$L_{Aeq, 2 \text{ Min}}$
Ort der Messung	außen (15 cm vor dem zur Straße gewandten Fenster)
erhobene Parameter	Katecholamin- und Cortisolausscheidung, Schlaferleben
Statistische Auswerteverfahren	(Ko)Varianzanalysen, multiple Regressionen
Stresshormone	Adrenalinausscheidung nicht von der Fensterstellung abhängig. In Lärmnächten Noradrenalinausscheidung um 6 %, Cortisolausscheidung signifikant um 35 % erhöht
Morgenfragebogen	Schlaferleben und Befindlichkeit bei geöffnetem Fenster deutlich verschlechtert ($p < 0,01$)
Abendfragebogen	k. A.

tertes Schlaferleben zu verzeichnen. Allerdings fiel die Änderung des Schlaferlebens bei einer Erhöhung des Überflugpegels von 55 auf 65 dB(A) deutlich geringer aus, als nach den Ergebnissen der Laborstudie zu erwarten war.

Ein Zusammenhang zwischen dem Überflugpegel und der Adrenalin- bzw. Cortisolausscheidung kann in der Fluglärm-Feldstudie nicht abgesichert werden. Für Cortisol ist lediglich ein Trend zur leichten Zunahme bei höheren Überflugpegeln zu beobachten.

Die Unterschiede in den Ergebnissen der Labor- und Feldstudie lassen sich teilweise durch die unterschiedlichen Versuchspersonenkollektive erklären. Im Gegensatz zu den jungen Teilnehmern der Laborstudie (18 bis 35 Jahre) waren die Teilnehmer der Feldstudie mit 35 bis 65 Jahren wesentlich älter.

Für die älteren langjährigen Flughafen-anwohner war die zusätzliche Belastung durch den nächtlichen Fluglärm, unabhängig vom Überflugpegel, annähernd gleich hoch und damit der Unterschied in der Stresshormonausscheidung zwischen den Nächten mit unterschiedlichen Überflugpegeln gering oder nicht vorhanden.

Diese Interpretation wird durch die Ergebnisse zum »erinnerbaren Erwachen« und zur »morgendlichen Befindlichkeit« unterstützt. Bereits bei einem Überflugpegel von 55 dB(A)_{innen} war eine relative Zunahme des rememberbaren Erwachens von nahezu 80 % zu beobachten. Eine weitere Erhöhung des Überflugpegels auf 65 dB(A)_{innen} führte nur noch zu einer geringfügigen (statistisch unbedeutenden) Zunahme des rememberbaren Erwachens. Die morgendliche Befindlichkeit war für beide Überflugpegel deutlich verschlechtert und annähernd gleich schlecht.

Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl nächtlicher Flüge (16 und 64 Flüge) und der Katecholaminausscheidung konnte weder in der Fluglärm-Laborstudie noch in der Fluglärm-Feldstudie abgesichert werden. Auch für die Cortisolausscheidung war keine Abhängigkeit von der applizierten Anzahl der Flüge zu erkennen.

9 Adaptations- und Habitationsproblematik der Stresshormonausschüttung

Eine Bewertung der Untersuchungsergebnisse der experimentellen Studien

setzt Annahmen über die Stresshormonausschüttung bei einer langfristigen nächtlichen Lärmbelastung voraus. So bemerken Jansen et. al. [27], daß die in den experimentellen Studien untersuchte Beobachtungszeit von max. fünf Tagen zu kurz ist, um generelle Aussagen über den Zusammenhang zwischen Stresshormonausscheidung und nächtlichem Lärm zu machen. Außerdem werden in den Studien Mittelwertvergleiche (Varianzanalysen) durchgeführt, die die zeitliche Entwicklung der Hormonausscheidung und damit die Adaptationsproblematik nicht berücksichtigen.

Daß die Beobachtungszeit der vorliegenden experimentellen Untersuchungen zur Beantwortung der Adaptationsproblematik der Primärreaktion Stresshormonausscheidung nicht ausreicht, wird auch von uns vertreten. Aus diesem Grund wird zur Zeit im Auftrag des Umweltbundesamtes eine interdisziplinäre Langzeitstudie durchgeführt, die Klarheit über den zeitlichen Verlauf der Stressreaktion und von Stressregulationsmechanismen bei nächtlichem (Flug-)Lärm liefern soll. Zum heutigen Zeitpunkt ist es aufgrund von chronobiologischen [49] und epidemiologischen Untersuchungsergebnissen [50, 51] präventivmedizinisch sinnvoll, davon auszugehen, daß die Stressreaktion wie auch andere vegetative Reaktionen [52] nicht oder nicht vollständig habituiert.

Die Chronobiologie ist die Wissenschaft von der zeitlichen Organisation biologischer Systeme. Zu ihren Aufgaben gehört die Untersuchung der adaptiven Dynamik biologischer Rhythmen auch unter Einfluß verschiedener Umweltbelastungen. In der Untersuchung von Diedrich [49] wurde die komplexe Beziehung Schlaf und Leistungsfähigkeit analysiert und aufschlußreiche Aussagen zur Adaptationsproblematik gewonnen.

9.1 Pilotstudie zur Beziehung zwischen Schlaf und Leistung unter chronobiologischen Aspekten [53]

In der Studie wurden sechs gesunde männliche Versuchspersonen im Alter von 23 bis 36 Jahren in einem zusammenhängenden Zeitraum von 16 Nächten im Schlaflabor des Instituts für Pathologische Physiologie (Charité) untersucht, wobei ein Proband nach sechs Monaten nochmals untersucht wurde.

Durchgeführt wurde eine Schlafpolygrafie, bei der vor dem Einschlafen und

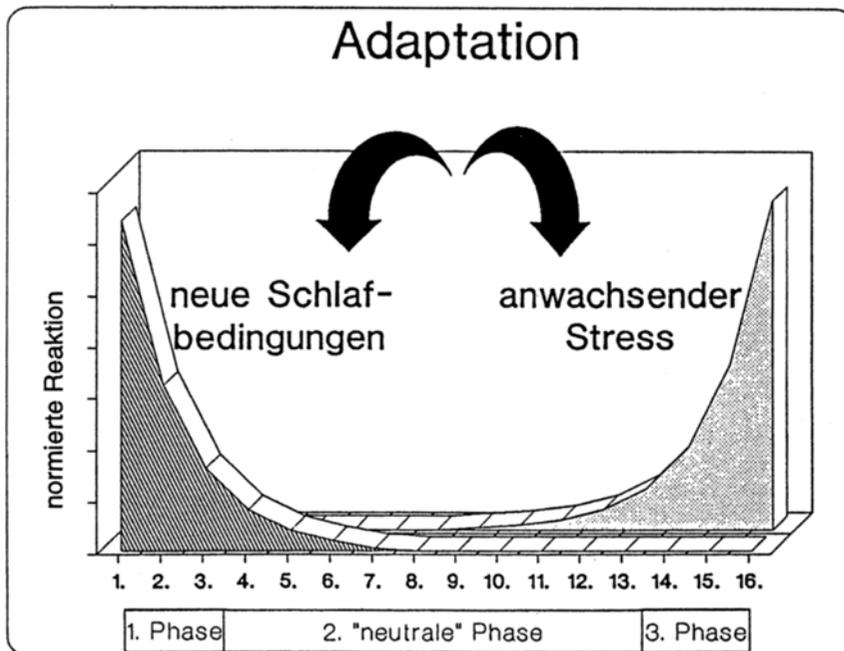


Abbildung 4: Adaptationsmodell nach Diedrich [53].

nach dem Erwachen psychophysiologische Kontrolltechniken (Abendfragebogen, Schlafprotokoll, Befindlichkeitskala, Leistungstest) eingesetzt wurden. Tagsüber wurde stündlich der Hautleitwert als ein Parameter des »Stresszustandes« registriert.

Zur Untersuchung der Adaptationsphänomene wurden Mittelwertvergleiche zwischen den einzelnen Untersuchungstagen durchgeführt. Es wurden die Unterschiede von Tag zu Tag und von Woche zu Woche überprüft. Die Untersuchung hatte folgende aufschlussreiche Ergebnisse:

- In der 1. und 2. Nacht war eine signifikante Abnahme der Stressreaktion zu beobachten.
- Der Zeitraum 4.–6. Tag (erste Woche) zeigte keine (signifikanten) Unterschiede vom Zeitraum 11.–13. Tag (zweite Woche).
- Ab dem 14. Tag war ein signifikantes Anwachsen der Stressreaktionen zu verzeichnen.

Der beschriebene zeitliche Verlauf der Stressreaktionen setzt sich additiv aus einem Wochenrhythmus und einem Adaptationsprozeß zusammen. Der Adaptationsprozeß kann in drei Phasen unterteilt werden:

1. Phase: 1.–3. Tag Gewöhnung an die neuen Bedingungen,

2. Phase: 4.–13. Tag relativ »neutrale« Phase,
3. Phase: ab 14. Tag Anwachsen der Beanspruchung, verursacht durch die lange Belastung.

Nach den Ergebnissen von Diedrich ist davon auszugehen, daß sich Adaptationsprozesse allgemein aus zwei gegenläufigen Komponenten zusammensetzen, die bei einer Bewertung von experimentellen Untersuchungsergebnissen beachtet werden müssen. Das Adaptationsmodell ist in der Abbildung 4 grafisch aufbereitet.

Eine experimentell ermittelte kurzfristige Stressreaktion zeigt nach Diedrich auch eine langfristig belastende Situation an.

Des weiteren erscheint in diesem Zusammenhang das Verständnis des Begriffs »Adaptation« diskussionsbedürftig. Für uns ist der Begriff »Adaptation«

eng mit der folgenden Frage verbunden: Welcher Regulationsaufwand ist vom Organismus erforderlich, um eine Adaptation vegetativer Reaktionen unter Lärm zu erreichen?

Die Interpretation einer Adaptation in der Weise, daß angenommen wird, eine Person sei nach einer Gewöhnungszeit »schallhart«, steht im Widerspruch zum Konzept der Homöostase, dem zentralen Begriff der biologischen Regulationstheorie (z. B. [54]), und wird von uns entschieden abgelehnt.

Unter der Gültigkeit des Adaptationsmodells von Diedrich ist nach einer langjährigen Exposition mit einer Lärmsituation, die experimentell eine Stressreaktion auslöst, von einem Anstieg der mittleren Stresshormonausscheidung auszugehen. Dies bestätigen neuere epidemiologische Untersuchungen.

9.2 Die Münchener Fluglärmstudie [50, 55]

Die Untersuchung wurde im Herbst/Winter 1991/92 vor dem Umzug des Münchener Flughafens durchgeführt. Die Untersuchungsgebiete waren ein vom Flugverkehr betroffenes Stadtgebiet (Trudering), in dem ein L_{eq} (24 h) von 68 dB(A) und ein L_{max} von 80 dB(A) gemessen wurde und ein vom Flugverkehr nicht betroffenes Vergleichsgebiet (Laim), in dem ein L_{eq} (24 h) von 59 dB (A) und ein L_{max} von 69 dB(A) ermittelt wurde.

Die Untersuchungsteilnehmer wohnten seit mindestens zwei Jahren in dem Untersuchungsgebiet. Als Versuchspersonen wurden 135 normalhörende Kinder im Alter von ca. zehn Jahren ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, daß die Stichproben »vergleichbar« waren, d. h. gleiche Familiengröße, gleicher Beruf und Bildungsstand der Eltern usw. In einer Nacht (20–8 Uhr) wurde der Urin der Kinder gesammelt und auf den Gehalt an Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol analysiert. Ausgewählte Ergebnisse sind in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Tabellarische Zusammenfassung der Studie

Hormon	$L_{eq} = 59 \text{ dB(A)}$	$L_{eq} = 68 \text{ dB(A)}$	Unterschied	p
Adrenalin	368,62 ng/hr	526,36 ng/hr	+ 43 %	< 0,01
Noradrenalin	766,22 ng/hr	1108,82 ng/hr	+ 45 %	< 0,001
Cortisol*	3,75 µg/hr	3,62 µg/hr	- 4 %	n. s.

* In der Untersuchung wurde Gesamtcortisol bestimmt. Das Ergebnis ist nicht mit den experimentellen Studien vergleichbar.

Die Kinder, die seit mindestens zwei Jahren in der Nähe des Flughafens wohnten, wiesen gegenüber den Kindern des Kontrollgebietes eine im Mittel um 43 % erhöhte Adrenalinausscheidung und eine um 45 % erhöhte Noradrenalinausscheidung auf.

In Fortführung der Untersuchung wurde im Herbst/Winter 1992/93 und im Herbst/Winter 1993/94 noch einmal die Stresshormonausscheidung der nun nicht mehr fluglärmexponierten Kinder ermittelt. Leider liegen uns die Ergebnisse noch nicht vor.

Eine weitere epidemiologische Studie, in der die nächtliche Ausscheidung der Katecholamine (Adrenalin und Noradrenalin) ermittelt wurde, ist das Forschungsvorhaben »Verkehr und Gesundheit im Ballungsraum Berlin«.

9.3 Verkehr und Gesundheit im Ballungsraum Berlin [51]

Die Untersuchung wurde 1993/1994 in den Berliner Stadtbezirken Steglitz und Prenzlauer Berg durchgeführt. Untersuchungsteilnehmer waren 195 Frauen im Alter von 30 bis 45 Jahren, deren Wohn- oder Schlafzimmerfenster zur Straße gerichtet waren. Die Stichproben wurden hinsichtlich der Lärmbelastung ausgewählt und sozio-ökonomische Faktoren soweit wie möglich homogenisiert. Die Lärmbelastung wurde mit Hilfe einer Verkehrszählung quantifiziert. Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV) lag zwischen 170 und 38 000 Kfz. Bei der Auswertung wurden Straßen mit einem $DTV \leq 14\,000$ Kfz als leise und Straßen mit einem $DTV \geq 20\,000$ Kfz als laut klassifiziert. Unter der Voraussetzung, daß einer Verdopplung der Quellen (Kfz) eine Pegelerhöhung von 3 dB(A) zuzuordnen ist, lag der Immissionspegelunterschied zwischen den leisesten und lautesten Straßen bei etwa 20 dB(A).

In einer Nacht wurde der Urin der Frauen gesammelt und die kreatininbezogenen Katecholaminwerte bestimmt. Zusätzlich wurden die subjektive Lärmbelastung, der Bildungsstand, der Gesundheitszustand (Krankheiten) und vieles mehr erfragt.

Auswertung:

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit multiplen Regressionsmodellen (Prädiktoren waren die Expositionsvariablen und

Kontrollvariablen) und lieferte folgende Ergebnisse:

- Noradrenalin:

Bezüglich Noradrenalin war für Frauen aus lauten Straßen (mehr als 20 000 Kfz pro Tag vor dem Schlafzimmerfenster) ein im Mittel um 2,04 µg/g Kreatinin höherer Wert als für Frauen aus leisen Straßen (weniger als 14 000 Kfz pro Tag vor dem Schlafzimmerfenster) zu beobachten. Das Ergebnis ist statistisch signifikant ($p = 0,043$). Ein Anstieg des Verkehrsaufkommens vor dem Schlafzimmerfenster um 10 000 Kfz pro Tag ist mit einem Anstieg der mittleren NoradrenalinKonzentration im Nachturin um 0,809 µg/g Kreatinin verbunden.

- Adrenalin:

Für Adrenalin konnte keine Abhängigkeit von den Verkehrslärmvariablen ermittelt werden.

- Cortisol:

Cortisol wurde in dieser Untersuchung leider nicht erhoben.

Die Ergebnisse der chronobiologischen und epidemiologischen Untersuchungen legen nahe, daß die Annahme einer vollständigen Habituation der Stressreaktion nicht sinnvoll ist.

10 Stresshormonausscheidung und Gesundheit

Die Ergebnisse der experimentellen Studien lassen einen Anstieg der individuellen Stresshormonausscheidung unter nächtlichem Lärm erkennen. Die politisch entscheidende Frage, welche Auswirkung eine langfristig erhöhte Hormonausschüttung auf die Gesundheit hat, ist umstritten. So bemerken Jansen et. al. [27], daß die Größenordnung der Stresshormonausscheidung in den experimentellen Studien nicht diskutiert wurde. Dieses Versäumnis soll nachgeholt werden.

Zur Bewertung der Größenordnung wurden die Hormonausscheidungen auf absolute Ausscheidungsmengen im 24-Stunden-Zeitraum umgerechnet und den medizinischen Normbereichen gegenübergestellt. Das Verfahren ist auf Prof. Spreng zurückzuführen, der es im Rahmen eines Gutachtens [56] angewandte.

Die Berechnungen zeigen, daß die durch Nachtfluglärm erhöhten Adrenalinaus-

scheidungen an der unteren Grenze des Normbereiches liegen. Völlig anders verhalten sich die Cortisolwerte. Die Cortisolwerte im Harn der untersuchten Flughafenanwohner lagen bereits ohne Nachtfluglärm leicht über der Norm und wiesen in den Nächten mit Fluglärmbelastung eine deutliche und hochsignifikante Steigerung auf, die im Vergleich zur Adrenalinausscheidung als gesundheitlich äußerst bedenklich angesehen werden muß.

Diese massive Cortisolfreisetzung läßt den Rückschluß auf eine permanent erhöhte Konzentration des adrenocorticotropen Hormons (ACTH) im Blut zu, was eine Vielzahl von längerfristigen negativen Wirkungen nach sich zieht. Insbesondere ist ein Überspielen bzw. Bevormunden der fein abgestimmten peripheren Regulationsmechanismen und damit ein Fehlverhalten zu befürchten. Die Problematik erhöhter Cortisolkonzentrationen kann nach Spreng [56] wie folgt zusammengefaßt werden:

- Hemmung des Glukose-Transportes und der Glukoseverwertung mit einer Erhöhung des Blutzuckerspiegels; *Diabetogene Wirkung*,
- Verstärkter Abbau von Eiweißen, Förderung des Knochenabbaus und des Abbaus der Muskulatur; *Katabole Wirkung*,
- Verringerung des Thymusgewebes und desjenigen der Lymphknoten; *Hemmung von Immunprozessen*,
- Absenkung der zirkulierenden eosinophilen und basophilen Leukozyten und der Lymphozyten; *Immunsuppression*,
- Steigerung der Empfindlichkeit von Adrenozeptoren und anderer vaso-konstriktiver Substanzen; *Hypertoniegefahr*,
- Steigerung der Magensaftsekretion; *Magengeschwüre*.

Die Ausführungen belegen die Ergebnisse der schlafmedizinischen Diagnostik über die Auswirkungen eines fragmentierten Schlafs (vgl. Teil I: Grundlagen). Nachtfluglärm ist als ausgesprochenes Distreß zu bewerten, der das interne Milieu nachweislich verändert.

Zusätzlich muß erwähnt werden, daß die vorherrschende und auch von Jansen gezogene Schlußfolgerung, daß einer Lärmbelastung nur dann eine Gesundheitsgefährdung zuzuordnen sei, sofern »abnorme« Reaktionen vorliegen, präventivmedizinisch problematisch ist.

Bei den Ergebnissen zur Stresshormonausscheidung handelt es sich um Mittelwertsunterschiede, die ingenieurwissenschaftlich als eine Verschiebung des Arbeitspunktes interpretiert werden können. Die Auswirkung einer längerfristig erhöhten nächtlichen Stresshormonausschüttung (Arbeitspunktverschiebung) auf die Gesundheit ist nicht unproblematisch. Die erhöhte Hormonausschüttung ist für den schlafenden Organismus unerwünscht. So sind z. B. Wechselwirkungen der Fettsäuren und anderer Substrate mit den Gefäßwänden nicht auszuschließen (Arteriosklerose). Cortisol und Androgene haben einen Teil des Syntheseweges gemeinsam. Eine verminderte Androgensynthese aufgrund einer erhöhten Cortisol synthese ist ebenfalls nicht auszuschließen. Lärmstress führt zu einer intrazellulären Elektrolytverschiebung (Erhöhung des Risikos einer Herz-Kreislauf-Erkrankung) [57].

Diese Liste ließe sich fortsetzen [58]. Sie zeigt, daß es nicht sinnvoll ist, die beobachtete mittlere Stresshormonerhöhung nur mit dem Instrument der physiologischen Bandbreite zu beurteilen.

Ein anschauliches Beispiel entstammt der Klimaproblematik: Sollte unsere mittlere Jahrestemperatur nur um einige Grad steigen, so hätte das für die Natur verheerende Folgen, obwohl sich die Erhöhung im Rahmen der üblichen jahreszeitlichen Schwankungen bewegt.

Die Kausalität der Aussagen über die gesundheitlichen Beeinträchtigungen aufgrund von nächtlichem Lärm muß sich – und das gilt auch für die Stresshormonausscheidung – in epidemiologischen Untersuchungsergebnissen zeigen.

10.1 Umwelteinwirkungen und Beschwerdehäufigkeit [59]

In dieser Studie wurden 1002 Probanden im Abstand von elf Jahren (1974 und 1985) zu Lebensstil, Stressfaktoren, Belastungen am Arbeitsplatz und in der Familie sowie zu gesundheitlichen Beschwerden und Krankheiten befragt. Die Studie berücksichtigte folgende Krankheitsgruppen:

- Erkrankungen des
- Herz-Kreislauf-Systems,
 - Halte- und Bewegungsapparats,
 - Atmungssystems,
 - Verdauungssystems,
 - Urogenitalsystems,
 - endokrinen Systems und
 - allergische Beschwerden.

Aus dem Spektrum von über 100 verschiedenen Krankheiten und Beschwerden erschien der Wohn- und Arbeitslärm gerade dort als risikoe erhöhender Faktor, wo er nach Ergebnissen der Stressforschung auch zu erwarten war: bei Erkrankungen des Magen-Darm-Trakts und des Herz-Kreislauf-Systems. Für eine detailliertere Darstellung sei auf Müller et al. [60] verwiesen.

Zusätzlich wurde die Wechselwirkung von Wohn- und Arbeitslärm in den folgenden vier Ausprägungen untersucht (Tab. 9):

- Lärm (0) = kein Arbeitslärm, kein Wohnlärm
- Lärm (1) = belastender Arbeitslärm, kein Wohnlärm
- Lärm (2) = kein Arbeitslärm, Wohnlärm
- Lärm (3) = belastender Arbeitslärm, Wohnlärm

Die Ergebnisse zeigen durchgängig erhöhte Erkrankungsrisiken bei gleichzeitigem Vorhandensein von Wohn- und Arbeitslärm und stützen die These, daß extraaurale Auswirkungen auf die Gesundheit durch langfristige Umweltlärmexposition als die Folgen langanhaltender Stressreaktionen anzusehen sind.

Eine weitere epidemiologische Studie, die sich mit den Auswirkungen von Straßenverkehrslärm auf die Gesundheit beschäftigt, ist die Caerphilly-Speedwell-Studie.

10.2 Caerphilly-Speedwell-Kohortenstudie [61]

An zwei repräsentativen Kohorten von 2512 (Caerphilly) und 2348 Männern (Speedwell) wurde der Zusammenhang zwischen dem Straßenverkehrslärmpegel vor der Wohnung und dem kardiovaskulären Risiko, der Prävalenz und der Inzidenz ischämischer Herzkrankheiten bei Männern mittleren Alters untersucht. Ausgewertet wurde eine Personengruppe mit einer Verkehrslärmbelastung von 51 bis 55 dB(A) im Vergleich zu einer Personengruppe, die einer Verkehrslärmbelastung von 66 bis 70 dB(A) (Mittelungspegel 6–22 Uhr) ausgesetzt war. Erhoben wurde unter anderem die Herzinfarktinzidenz. Eine Infarktinzidenz wurde dann angenommen, wenn eins der folgenden Kriterien erfüllt war:

Tod aufgrund einer ischämischen Herzkrankung, klinischer Myokard- oder EKG-Infarkt. Als Kontrollvariablen gingen Alter, Sozialstatus, Familienstand, Beschäftigungsstand, Familienanamnese (hinsichtlich Herzinfarkt) und der Gesundheitsstatus in die Auswertung ein.

Tabelle 9: Wohn- und Arbeitslärm als Risikofaktoren* für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Angegeben sind das relative Risiko (RR) und das 95%-Konfidenzintervall (c1–c2)

Variable	Herz-Kreislauf-Erkrankungen			Angina pectoris			Herzinfarkt			Herzasthma			Hypertonie			Durchblutungsstörungen Extremitäten			Durchblutungsstörungen Gehirn		
	c1	RR	c2	c1	RR	c2	c1	RR	c2	c1	RR	c2	c1	RR	c2	c1	RR	c2	c1	RR	c2
Geschlecht	0,79	1,22	1,87	0,77	1,19	1,82	1,02	2,48	6,05	0,38	0,77	1,56	0,66	1,04	1,64	0,42	0,71	1,19	0,77	1,42	2,62
Alter	1,01	1,04	1,06	1,03	1,05	1,07	0,97	1,01	1,05	1,06	1,10	1,14	1,00	1,03	1,05	1,01	1,03	1,06	1,02	1,05	1,08
psych.Stör.	0,54	1,67	5,16	1,17	2,41	4,97	0,44	1,64	6,12	0,29	0,91	2,88	0,80	0,30	1,11	0,56	1,34	3,22	0,48	1,26	3,34
Lärm (0)		1,00			1,00			1,00			1,00			1,00			1,00			1,00	
Lärm (1)	0,34	0,66	1,32	0,21	0,47	1,09	0,79	2,59	8,45	0,34	0,99	2,93	0,20	0,48	1,15	0,17	0,46	1,26	0,17	0,51	1,56
Lärm (2)	0,68	1,03	1,57	0,73	1,09	1,64	0,42	1,04	2,53	0,38	0,78	1,58	0,60	0,92	1,42	0,81	1,29	2,06	0,54	0,96	1,71
Lärm (3)	0,89	2,81	8,87	0,47	1,22	3,14	0,79	3,54	15,54	0,60	2,38	9,34	0,42	1,32	4,11	0,70	1,80	4,63	0,30	1,14	4,42

* Außer für die angegebenen Faktoren wurde adjustiert für Übergewicht, Rauchen, Alkoholkonsum, Schichtzugehörigkeit, belastende Arbeitsbedingungen, sportliche Aktivität und persönliche Probleme.

Tabelle 10: Ausgewählte Ergebnisse der Caerphilly-Speedwell-Studie

Bezug	Effektgröße	Rel. Risiko (RR) der MI-Inzidenz*	Signifikanz
Belastung durch Straßenverkehrslärm (Zeitraum 5 bzw. 6 Jahre, Lärmexposition konstant)			
L _{Am} : 51–60 dB	66–70 dB		
	– Adresse	1,1	n. s.
	– Fenster/Straße	1,2	n. s.
	– off. Fenster/Straße	1,3	n. s.
Belästigung durch Straßenverkehrslärm			
– während der Rekreation nie	oft/immer	1,4	n. s.
– während des Schlafs nie	oft/immer	1,4	p < 0,1

* Modelladjustiert für Kovariable.

Ergebnisse zur Herzinfarktinzidenz:

In einem Zeitraum von fünf bis sechs Jahren war ein Anstieg der Inzidenzen um 10 % bei Bezug auf die Außenpegel an der Wohnadresse zu beobachten. Werden nur die Personen in der Auswertung berücksichtigt, deren Wohnungen auch Fenster zu lauten Straßen aufweisen, ist ein Anstieg der Inzidenzen auf 20 % zu beobachten. Bei Berücksichtigung des Fensteröffnungsverhaltens stiegen die Inzidenzen um 30 %. Straßenverkehrslärmbedingte Störungen der häuslichen Erholung und der Nachtruhe hatten einen Inzidenzanstieg von 40 % zur Folge, der bei Störung der Nachtruhe grenzwertig signifikant war (Tab. 10).

Die Untersuchung legt nahe, daß Menschen, die an lauten Straßen mit Verkehrslärmpegel von 65 bis 70 dB(A)_{außen} wohnen, ein annähernd um 20 % höheres Herzinfarkttrisiko haben als Menschen, die in leiseren Gebieten (51–55 dB(A)_{außen}) wohnen. Wird der Schlaf oft oder immer durch den Straßenverkehrslärm beeinträchtigt, so belegt die Untersuchung eine Erhöhung des Herzinfarkttrisikos um 40 %. Bei Straßenverkehrslärm ist demzufolge schon bei sehr geringem nächtlichen Innenpegel (L_{Am innen}) von einer Gesundheitsgefährdung auszugehen.

Die beiden epidemiologischen Arbeiten belegen, wie auch schon frühere Untersuchungen aus dem Bereich hoher Lärmintensitäten zeigen [62], daß eine nächtliche Lärmbelastung (Verkehrslärm) insbesondere in Verbindung mit Arbeitslärm (Lärm am Tage) das Gesundheitsrisiko deutlich erhöht. Jede

Störung des Nachtschlafes ruft zusätzlichen Streß hervor.

Der Einfluß der nächtlichen (Verkehrs-)Lärmbelastung liefert auch einen Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Ergebnisse großangelegter Querschnittstudien. Konnte Knippschild in der Umgebung des Amsterdamer Flughafens ein erhöhtes Risiko für Herzkrankheiten und Bluthochdruck verzeichnen [63], so war in der deutschen Tieffluglärmstudie [64] keinerlei Tendenz einer erhöhten Herz-Kreislauf-Erkrankungshäufigkeit zu erkennen. Im Gegensatz zur holländischen Studie wurden in Deutschland allerdings nur Tieffluggebiete ohne Nachtflugbetrieb untersucht.

11 Präventivmedizinische Bewertung von nächtlichem Verkehrslärm

Kausalität zu verifizieren ist bei allen chronischen Krankheiten ein schwieriges Unterfangen, da immer multifaktorielle Summeneffekte in der Pathogenese eine Rolle spielen. Die folgenden Aussagen über die gesundheitlichen Gefahren durch nächtlichen (Verkehrs-)Lärm stützen sich auf die Konsistenz experimenteller und epidemiologischer Ergebnisse, d. h. auf die Übereinstimmung von »Theorie« und »Praxis«. Der direkte empirische Kausalbeweis – und das gilt auch für die Primärreaktion »Aufwachhäufigkeit« – ist bei der langen Latenzzeit lärmbedingter Gesundheitsbeeinträchtigung kaum zu erbringen. Die Kausalkette zwischen nächtlichem Lärm und Gesundheitsbeeinträchtigung kann nur durch verschie-

dene experimentelle und empirische »Bausteine« abgesichert werden.

Es ist nach den vorliegenden Erkenntnissen davon auszugehen, daß extraurale Auswirkungen auf die Gesundheit durch langfristige nächtliche Umweltlärmexposition infolge anhaltender Streßreaktionen hervorgerufen bzw. verstärkt werden. Die bekannten Änderungen von vegetativen Reaktionen, z. B. der peripheren Durchblutung und des Stoffwechsels, stellen Folgeerscheinungen der Streßreaktion dar. Unter diesem Gesichtspunkt kommt der nächtlichen, lärmbedingten Streßreaktion eine besondere Bedeutung bei der präventivmedizinischen Grenzwertdiskussion zu.

Die vorgestellten epidemiologischen Studien erhärten die These, daß nächtlicher Verkehrslärm schon bei geringen Innenraumpegeln (L_{Aeq}) zu Distreß führt, der insbesondere in Verbindung mit Tageslärm das interne Milieu nachweislich verändert.

Die vorliegenden experimentellen Studien zum Fluglärm belegen, daß bereits bei 16 nächtlichen Überflügen mit einem Überflugpegel von 55 dB(A) – das entspricht einem fluglärmbedingten Dauerschallpegel von L_{eq} = 29 dB(A) – für »ältere« Flughafenanwohner von einer abnormen Cortisolausschüttung auszugehen ist. Für diese Personengruppe ist bei langfristiger Fluglärmbelastung eine Gesundheitsbeeinträchtigung zu befürchten.

Um insbesondere auch die ältere Bevölkerung vor Gesundheitsbeeinträchtigungen zu schützen, sollten Flugbewegungen in der zweiten Nachthälfte vermieden werden. Sollte dies nicht möglich sein, sind maximale Immissionspegel deutlich unterhalb von L_{max innen} = 55 dB(A) zu fordern. Gleichzeitig muß mit dem äquivalenten Dauerschallpegel die Anzahl von solchen Flügen begrenzt werden, deren Maximalpegel als zumutbar anzusehen sind.

Nach den Vorschlägen von Berglund und Lindvall für die World Health Organization [65] soll ein nächtlicher äquivalenter Dauerschallpegel von L_{eq innen} = 30 dB(A) nicht überschritten werden, um Schlafstörungen zu vermeiden. Vergleichbare Empfehlungen sind auch dem interdisziplinären Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt [66] zu entnehmen. Ein nächtlicher äquivalenter Dauerschallpegel von 30 dB(A) am Ohr des Schlä-

fers und Pegelspitzen von 40 dB(A) sind nach Ansicht des Arbeitskreises geeignet, Schlafstörungen weitgehend zu vermeiden. In den Materialien zum 4. Immissionsschutzbericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag (UBA 1989) wird festgehalten, daß Mittelungspegel von 25 bis 35 dB am Ohr des Schlafers noch im schlafgünstigen Bereich liegen.

Aufgrund von umfangreichen Schlafuntersuchungen mit Straßenverkehrslärm vertreten Eberhardt et al. [18, 19] die Ansicht, daß Maximalpegel oberhalb von $L_{\max \text{ innen}} = 40 \text{ dB(A)}$ bei einem äquivalenten Dauerschallpegel von $L_{\text{eq innen}} = 35 \text{ dB(A)}$ nicht überschritten werden sollten.

Die vorliegenden Empfehlungen in Verbindung mit den Ergebnissen zur Streßhormonausscheidung lassen unter Beachtung der quellspezifischen Wirkung den präventivmedizinisch sinnvollen Bereich einer nächtlichen Fluglärmbegrenzung erkennen.

Nach heutigem Kenntnisstand ist für den nächtlichen Fluglärm eine Teilung der Nacht vorzunehmen.

In der Zeit von 1.00 Uhr bis 6.00 Uhr sind Flugbewegungen grundsätzlich zu vermeiden. Sprechen schwerwiegende Gründe dagegen, dann muß auf einen nächtlichen Maximalpegel deutlich unter 55 dB(A) Bezug genommen werden.

Bei den nächtlichen Zumutbarkeitswerten für den Zeitraum von 22.00 Uhr bis 1.00 Uhr muß die Tatsache berücksichtigt werden, daß zwischen 1.00 Uhr und 6.00 Uhr Flugbewegungen zu vermeiden sind. Unter diesen Bedingungen kann die Zumutbarkeit für den Zeitraum von 22.00 Uhr bis 1.00 Uhr an den (erinnerbaren) Aufwachreaktionen orientiert werden. Es ist demzufolge eine Begrenzung des Maximalpegels auf 55 dB(A) zu fordern. Gleichzeitig ist der äquivalente Dauerschallpegel auf Werte unter $L_{\text{eq innen}} = 36 \text{ dB(A)}$ zu begrenzen. Das entspricht einem Zumutbarkeitswert von ca. 32 dB(A) über eine Nachtzeit von acht Stunden.

Abschließend ist festzuhalten, daß die noch immer verbreitete Auffassung, einer Lärmbelastung sei nur dann eine Gesundheitsgefährdung zuzuordnen, sofern deren schädliche Wirkung ohne

jeden Zweifel nachgewiesen werden kann, ein präventivmedizinisch unbrauchbarer Ansatz ist. Nach den vorliegenden Ergebnissen muß es als allgemeine Erkenntnis gelten, daß nächtlicher Verkehrslärm zu Gesundheitsbeeinträchtigungen führen kann. Es ist daher zu fordern, daß die angegebenen Richtwerte eingehalten werden, solange der vorgelegte Anscheinbeweis nicht widerlegt ist.

Literatur:

- [42] Schedlowski, M., Jakobs, R., Stratmann, G., Richter, St., Hädicke, A., Tews, U., Wagner, T. O. F., and Schmidt, R. E.: Changes of natural killer cells during acute psychobiological stress. *J. Clin. Immunology* 13, 2 (1993).
- [43] Benschop, R. J., Jakobs, R., Sommer, B., Schürmeyer, T. H., Raab, H. R., Schmidt, R. E., and Schedlowski, M.: Modulation of the immunologic response to acute stress in humans by betablockade or benzodiazepines. *The FASEB Journal* 10 (1996).
- [44] Jansen, G., Linnemeier, A., und Nitzsche, M.: Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm. *Zschr. f. Lärmbekämpfung* 42 (1995).
- [45] Carter, N.L., Hunyor, S.N., Crawford, G., Kelly, D., and Smith, A.J.M.: Environmental noise and sleep - A study of arousals, cardiac arrhythmia and urinary catecholamines. *Sleep* 17, 4 (1994).
- [46] Maschke, C., Arndt, D., und Ising, H.: Nächtlicher Fluglärm und Gesundheit: Ergebnisse von Labor- und Feldstudien. *Bundesgesundhbl.* 38, 4 (1995) 130-137.
- [47] Maschke, C., Arndt, D., Ising, H., and Druba, M.: Nocturnal Traffic Noise and Stress: Results of Field- and Laboratory Studies. *ISEE/ISEA Konferenz, Noordwijkerhout* 1995.
- [48] Maschke, C., Arndt, D., und Ising, H.: Berliner Nachtlärmstudie des Umweltbundesamts. *Abschlußbericht (voraussichtlich 1996)*.
- [49] Diedrich, A., Siems, R., und Hecht, K.: Wochenschlaf und Adaptation des Schlafverhaltens während einer Langzeitstudie. In: Hecht, K., Engfer, A., Peter, H. J., Poppei, M. (Hrsg): *Schlaf, Gesundheit, Leistungsfähigkeit*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag 1993.
- [50] Bullinger, M.: Die Münchener Fluglärmstudie: Ein Kurzbericht über die Studienergebnisse. *Institut für Medizinische Psychologie, Maximilians-Universität München* 1995.
- [51] Babisch, W.: Teilauswertung 1 zum Forschungsvorhaben »Verkehr und Gesundheit im Ballungsraum Berlin«. *Entwurf August 1995*.
- [52] Vallet, M., Gagneux, J.M., Clairet, J.M., Laurens, J.F., and Letisierand, D.: Heart Rate Reactivity to aircraft noise after a long term exposure. *Noise as a public health problem*. Stockholm 1983.

- [53] Diedrich, A.: Pilotstudie zur Beziehung zwischen Schlaf und Leistung unter chronobiologischen Aspekten, *Dissertation Humboldt-Universität Berlin* 1992.
- [54] Nitsch, J. R. (Hrsg): *Streß: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen*. Hans Huber Verlag 1981.
- [55] Hygge, S., Evans, G. W., and Bullinger, M.: *The Munich Airport Noise Study: Psychological, Cognitive, Motivational, and Quality of Life Effects on Children*. 6th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Nizza 1993.
- [56] Spreng, M.: *Verwaltungsrechtsstreit Flughafen HAHN. Gutachterliche Stellungnahme zur Frage 3a des Fragenkatalogs vom 31. 5. 1996*. Erlangen 1996.
- [57] Ising, H., Babisch, W., Günther, T., und Kruppa, B.: *Akute und chronische Lärmwirkungen*. AICB 1995.
- [58] Rebentisch, E., Lange-Asschenfeldt, H., und Ising, H.: *Gesundheitsgefahren durch Lärm, Kenntnisstand der Wirkungen von Arbeitslärm, Umweltlärm und lauter Musik*. BGA Schriften. München: MMV Medizin Verlag 1994.
- [59] Bellach, B., Dortschy, R., Müller, D., und Ziese, T.: *Gesundheitliche Auswirkungen von Lärmbelastung - Methodische Betrachtungen zu den Ergebnissen dreier epidemiologischer Studien*. *Bundesgesundhbl.* 38, 3 (1995) 84-89.
- [60] Müller, D., Kahl, H., Dortschy, R., und Bellach, B.: *Umwelteinwirkungen und Beschwerdebauigkeit: Ergebnisse einer Kohortenstudie*. *SozEp-Heft 2/1994*.
- [61] Babisch, W., Elwood, P. C., und Ising, H.: *Road traffic noise and heart disease risk: results of the epidemiological studies in Caerphilly Speedwell and Berlin*. 6th International Congress on Noise as a Public Health Problem. Nizza 1993.
- [62] Jansen, G.: *Fluglärmmedizinisches Gutachten*. Hannover 1984.
- [63] Knippschild, P.: *Medical effects of aircraft noise*. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 40 (1977).
- [64] Ising, H., Curio, I., Otten, H., Rebentisch, E., und Schulte, W.: *Gesundheitliche Wirkungen des Tieffluglärms*. *Forschungsbericht* 91-105 01 116. *Umweltbundesamt* 1991.
- [65] Berglund, B., and Lindvall, T.: *Community Noise*. *Arch. of the Center for Sensory Research, Volume 2*. Stockholm University 1995.
- [67] *Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt: Gutachterliche Stellungnahmen zu Lärmwirkungsbereichen (1982-1990)*. *Umweltbundesamt* 1990.

Anschrift der Verfasser:

Dr. C. Maschke, TU Berlin, Institut für Technische Akustik, Einsteinufer 25, 10587 Berlin, Dr. H. Ising, Institut für Wasser-, Boden- und Luft-Hygiene des Umweltbundesamtes, Corrensplatz 1, 14195 Berlin, und Prof. Dr. K. Hecht, Institut für Streßforschung, Chausseestr. 111, 10115 Berlin