



# **Forschungsverbund *'Leiser Verkehr'* Bereich 2000 *'Lärmwirkungen'***

## **Einzelaufgabe 2311: Lärmbedingte Schlafstörungen: Verkehrslärmarten, Frequenzspektren, temporäre Verkehrsruhe**

(Förderkennzeichen 19U2062A)

### **Schlussbericht**

Univ.-Prof. Dr. Barbara Griefahn  
Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund  
Ardeystr. 67  
D-44139 Dortmund  
Fon 0231 1084 221  
Fax 0231 1084 400  
griefahn@ifado.de

### **Beteiligte Institutionen**

DLR DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln  
(Dr. Alexander Samel)

IfADo Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund  
(Univ.-Prof. Dr. Barbara Griefahn, Priv.-Doz. Dr. Martin Schütte)

SASS SASS acoustic research & design GmbH, Essen  
(Prof. Dr. Rudolf Bisping)

Januar 2007

---

## Vorwort

Der Forschungsverbund '*Leiser Verkehr*' wurde am 1. März 1999 mit dem Ziel einer alle Verkehrsträger umfassenden Reduktion des Verkehrslärms unter Berücksichtigung technischer, operationeller und administrativer Maßnahmen gegründet. Diesem weitgesteckten Ziel entsprechend haben sich Behörden, Betreiber, Forschungseinrichtungen und Universitäten sowie die Industrie zu dieser Initiative zusammengeschlossen.

Veranlasst wurde die Gründung durch die besorgniserregende Zunahme des Lärms bzw. der daraus resultierenden Konsequenzen für Befinden, Leistung und Gesundheit. Trotz der durchaus erfolgreichen Senkung der Schallemission einzelner Verkehrsmittel hat der Lärm – im Gegensatz zu anderen Umweltbelastungen – mit der Verkehrsdichte zugenommen. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen. Der Güterfernverkehr auf Schiene und Straße wird – ebenso wie der Luftverkehr – im Jahre 2010 um 80 %, der innerstädtische Verkehr um 50 % höher sein als 1995, wobei die Zunahme in den Nachtstunden stärker ausfällt als am Tage [European Commission 1997].

Die von Seiten der Betroffenen und der Lärmwirkungsforschung seit vielen Jahren erhobene Forderung, die Emissionspegel und die Impulshaltigkeit der Geräusche zu reduzieren, greift jedoch zu kurz, weil weitere akustische Merkmale und nichtakustische Variablen, insbesondere die Frequenzspektren und die Zeitpunkte der Einwirkung im Verlauf des Tages und der Nacht das Ausmaß der Lärmwirkung beeinflussen.

Im Spannungsfeld der gesundheitlichen Folgen des Lärms auf der einen und der wirtschaftlichen Konsequenzen einer gebremsten Mobilität auf der anderen Seite sind daher – abgesehen von der Reduktion der Pegel – alle Möglichkeiten der Belastungsminderung auszuschöpfen. Im Rahmen des Gesamtkonzepts '*Leiser Verkehr*' hat die Lärmwirkungsforschung die Aufgabe, durch wissenschaftlich fundierte, von Technik und Administration unmittelbar umsetzbare Erkenntnisse zur zielgerichteten und effizienten Reduktion des Verkehrslärms beizutragen. Ihre prioritäre Aufgabe ist in der ersten Phase des Forschungsverbunds in einem überwiegend laborexperimentellen Ansatz

- technisch realisierbare Vorgaben für die Bereiche 3000 '*Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche*' und 4000 '*Leise Züge und Trassen*' zu erarbeiten,
- die Grundlagen für wirkungsäquivalente Gewichtungen unterschiedlicher Verkehrsgereusche sowie Tages- und Nachtzeiten bereitzustellen (z. B. als Basis für Bonus-Malus-Regelungen),
- die Lästigkeit der simultanen Einwirkung unterschiedlicher Verkehrslärmarten zu bewerten und mit einem Vorhersagemodell zu beschreiben.

Diese Fragestellungen wurden unter Berücksichtigung verschiedener Wirkungsebenen (Befinden, Leistung, Schlaf) in eng miteinander verzahnten Einzelaufgaben wahrgenommen. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Einzelaufgabe 2311 Lärmbedingte Schlafstörungen, Verkehrslärmarten, Frequenzspektren, temporäre Verkehrsruhe

---

## Inhaltsverzeichnis

|   | Seite     |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis   | IV        |
| Tabellenverzeichnis   | VI        |
| Vorwort   |           |
| <b>Zusammenfassung</b>  | <b>1</b>  |
| Projektbeschreibung   | 1         |
| Zentrale Ergebnisse   | 2         |
| Schlussfolgerung und Ausblick   | 7         |
| <b>1 Lärmbedingte Schlafstörungen</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1 Allgemeines zum Schlaf  | 8         |
| 1.2 Aufzeichnung und Bewertung von Schlaf und Schlafstörungen   | 9         |
| 1.3 Unterteilung lärmbedingter Schlafstörungen  | 10        |
| 1.4 Primäre Schlafstörungen   | 10        |
| Intermittierte vs kontinuierliche Geräusche, Bewertung von Lärmwirkungen  | 11        |
| Maximalpegel und Emergenz   | 12        |
| Wirkungsäquivalente Bewertung   | 13        |
| Frequenzspektren  | 14        |
| Zeitlich begrenzte (temporäre) Verkehrsruhe   | 15        |
| Individuelle und situative Einflussfaktoren   | 16        |
| 1.5 Sekundäre lärmbedingte Schlafstörungen  | 17        |
| 1.6 Autonome Funktionsänderungen  | 18        |
| Akute kardiovaskuläre Reaktionen auf Lärm   | 19        |
| Stresshormone (Katecholamine und Cortisol)  | 19        |
| <b>2 Einzelaufgabe 2311 Lärmbedingte Schlafstörungen – Einfluss von Verkehrslärmarten, Frequenzspektren und temporärer Verkehrsruhe</b> | <b>20</b> |
| 2.0 Arbeitsprogramm, Material und Methoden  | 21        |
| 2.0.1 Probandenselektion  | 21        |
| 2.0.2 Experimentelles Design  | 22        |
| 2.0.3 Versuchsablauf  | 23        |
| 2.0.4 Applikation der unabhängigen Variablen  | 24        |
| 2.0.5 Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen  | 24        |
| 2.0.5.1 Physiologische Variablen  | 24        |
| 2.0.5.2 Subjektive Bewertung  | 29        |
| 2.0.5.3 Leistungsverhalten  | 30        |
| 2.0.6 Auswertung / Statistik  | 31        |
| 2.1 Vergleichende Bewertung von Schienen-, Straßen- und Flugverkehrslärm und deren Wirkung auf das Schlafverhalten                      | 34        |
| 2.1.1 Einleitung  | 34        |
| 2.1.2 Material und Methoden   | 35        |
| 2.1.3 Ergebnisse  | 38        |
| 2.1.3.1 Lärmbedingtes Aufwachen, Ereigniskorrelierte Auswertung   | 38        |
| 2.1.3.2 Änderung der Schlafstruktur, subjektive Schlafbewertung, Leistung   | 40        |
| 2.1.4 Diskussion  | 46        |
| 2.1.4.1 Methodische Aspekte   | 46        |
| 2.1.4.2 Lärmwirkungen allgemein   | 47        |

---

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.1.4.3    | Einfluss der Geräuschart  | 47        |
| 2.1.4.4    | Einfluss der akustischen Belastung, des Maximalpegels und der äquivalenten Pegel  | 49        |
| 2.1.5      | Schlussfolgerung  | 49        |
| <b>2.2</b> | <b>Dämmung tiefer Frequenzen (&lt; 200 Hz) von Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen und deren Wirkung auf den Schlaf</b> | <b>51</b> |
| 2.2.1      | Einleitung  | 51        |
| 2.2.2      | Material und Methoden   | 52        |
| 2.2.3      | Ergebnisse  | 56        |
| 2.2.3.1    | Lärmbedingtes Aufwachen, ereigniskorrelierte Auswertung   | 56        |
| 2.2.3.2    | Änderung der Schlafstruktur, subjektive Schlafbewertung   | 57        |
| 2.2.4      | Diskussion  | 60        |
| 2.2.5      | Schlussfolgerungen  | 62        |
| <b>2.3</b> | <b>Wirkungen temporärer Verkehrsruhe</b>  | <b>63</b> |
| 2.3.1      | Einleitung  | 63        |
| 2.3.2      | Material und Methoden   | 64        |
| 2.3.3      | Ergebnisse  | 67        |
| 2.3.3.1    | Intraindividuellem Vergleich zwischen Ruhe- und Lärmnächten   | 67        |
| 2.3.3.2    | Schlafverhalten der Früh-, Normal- und Spätschläfer   | 71        |
| 2.3.3.3    | Akute Reaktionen auf das Einsetzen von Ruhe bzw. Lärm   | 73        |
| 2.3.4      | Diskussion  | 76        |
| 2.3.5      | Schlussfolgerung  | 78        |
| <b>2.4</b> | <b>Ereigniskorrelierte kardiale Reaktionen</b>  | <b>80</b> |
| 2.4.1      | Einleitung  | 80        |
| 2.4.2      | Material und Methoden   | 80        |
| 2.4.3      | Ergebnisse  | 82        |
| 2.4.4      | Diskussion  | 88        |
| <b>2.5</b> | <b>Leistung und ereigniskorrelierte Hirnpotentiale</b>  | <b>93</b> |
| 2.5.1      | Einleitung  | 93        |
| 2.5.2      | Material und Methoden   | 94        |
| 2.5.3      | Ergebnisse  | 96        |
| 2.5.4      | Diskussion  | 97        |
| <b>2.6</b> | <b>Persönlichkeitsmerkmale</b>  | <b>98</b> |
| 2.6.1      | Lärmempfindlichkeit   | 98        |
| 2.6.1.1    | Einleitung  | 98        |
| 2.6.1.2    | Methoden  | 100       |
| 2.6.1.3    | Ergebnisse  | 100       |
| 2.6.1.4    | Diskussion  | 101       |
| 2.6.2      | Extraversion  | 103       |
| 2.6.2.1    | Einleitung  | 103       |
| 2.6.2.2    | Methoden  | 104       |
| 2.6.2.3    | Ergebnisse  | 105       |
| 2.6.2.4    | Diskussion  | 105       |

---

|         |               |     |
|---------|---------------|-----|
| 2.6.3   | Neurotizismus | 106 |
| 2.6.3.1 | Einleitung    | 106 |
| 2.6.3.2 | Methoden      | 107 |
| 2.6.3.3 | Ergebnisse    | 107 |
| 2.6.3.4 | Diskussion    | 108 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abb. 0-1: Generelles experimentelles Design für alle 3 Arbeitspakete.   | 2  |
| Abb. 0-2: Aufwachhäufigkeit durch einzelne Verkehrsgeräusche bezogen auf den Maximalpegel.  | 3  |
| Abb. 0-3: Änderung ausgewählter physiologischer Parameter der Schlafstruktur in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten.   | 3  |
| Abb. 0-4: Änderung der Herzschlagfrequenz durch Lärm ohne und mit begleitender Aufwachreaktion.   | 4  |
| Abb. 0-5: Änderungen der subjektiven Schlafbewertung und der Reaktionszeit im Switch-Test bezogen auf die Ruhenächte, Wilcoxon-Test, Signifikanzniveau.   | 4  |
| Abb. 0-6: Vergleich einzelner Schlafparameter bei unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe.  | 6  |
| Abb. 0-7: Vergleich des Schlafstörungsindex bei Früh-, Normal- und Spätschläfern und unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe.   | 7  |
| Abb. 1-1: Darstellung des Schlafablaufs (nach Dement & Kleitman 1957)   | 8  |
| Abb. 1-2: Schlafdauer und Lebensalter [nach Roffwarg et al. 1966]   | 9  |
| Abb. 1-3: Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Fluglärm-Maximalpegel bei 128 im Labor und 64 in der Realsituation untersuchten Anrainern des Flughafens Köln-Bonn (Basner et al. 2004)                 | 13 |
| Abb. 1-4: Arousals bei Föten und Kindern bis zum 15. Lebensjahr [Kahn 2002]   | 16 |
| Abb. 2.0-1: Generelles experimentelles Design für alle 3 Arbeitspakete  | 22 |
| Abb. 2.0-2: Registrierung des Polysomnogramms   | 25 |
| Abb. 2.0-3: Vergleich der für alle Nächte (N=722) berechneten Indexwerte basierend auf den Hauptkomponenten-Scores aus allen Nächten (IndexAlle), den Gewöhnungs- (IndexNacht1) und den Ruhenächten (IndexRuhe) | 28 |
| Abb. 2.1-1: Anteil stark belastigter Personen bezogen auf den DNL für Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärm nach einer Meta-Analyse von Miedema & Oudshoorn [2001]   | 34 |
| Abb. 2.1-2: Experimentelles Design zur Untersuchung unterschiedlicher Verkehrslärmarten   | 36 |
| Abb. 2.1-3: Pegelzeitverlauf für den Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärm   | 37 |
| Abb. 2.1-4: Aufwachwahrscheinlichkeit durch einzelne Verkehrsgeräusche bezogen auf den Maximalpegel   | 40 |
| Abb. 2.1-5: Änderung ausgewählter physiologischer Parameter des Schlafbeginns in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten   | 42 |
| Abb. 2.1-6: Änderung ausgewählter physiologischer Parameter des Gesamtschlafs in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten   | 42 |
| Abb. 2.1-7: Änderungen ausgewählter physiologischer Parameter in Abhängigkeit vom äquivalenten Pegel (24 Probanden; 19-28 Jahre); Wilcoxon-Test;  | 44 |
| Abb. 2.1-8: Änderungen der subjektiven Schlafbewertung und der Reaktionszeit im Switch-Test bezogen auf die Ruhenächte, Wilcoxon-Test,  | 45 |
| Abb. 2.2-1: Experimentelles Design zur Untersuchung der Wirkung frequenzgedämpfter Geräusche  | 53 |
| Abb. 2.2-2: Frequenzspektrum eines 30-minütigen Schienenverkehrsgeräusches. Oberes Bild: Originalgeräusch. Unteres Bild: nach der Dämmung der Frequenzen < 200 Hz um 12 dB                                      | 54 |
| Abb. 2.2-3: Frequenzspektrum eines 30-minütigen Straßenverkehrsgeräusches. Oberes Bild: Originalgeräusch. Unteres Bild: nach der Dämmung der Frequenzen < 200 Hz um 12 dB                                       | 55 |
| Abb. 2.3-1: Temporäre Verkehrsruhe, experimentelles Design  | 64 |
| Abb. 2.3-2: Pegel-Zeitverlauf bei temporärer Verkehrsruhe bei Personen mit unterschiedlichen Schlafzeiten   | 66 |
| Abb. 2.3-3: Vergleich einzelner Schlafparameter bei Früh-, Normal- und Spätschläfern und unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe  | 70 |
| Abb. 2.3-4: Verlauf der stündlichen SSI in den Ruhenächten (gelb) und in Nächten mit 4-stündiger initialer (grün) bzw. terminaler (rot) Verkehrsruhe  | 75 |

---

|   |    |
|---|----|
| Abb. 2.3-5: Verlauf der stündlichen SSI in den Ruhenächten (gelb) und in Nächten mit 6-stündiger Verkehrsruhe. Oben: Einsetzen der Lärmbelastung um 5 Uhr, unten: Einsetzen der Verkehrsruhe um 23 Uhr  | 75 |
| Abb. 2.4-1: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle  | 82 |
| Abb. 2.4-2: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle. Die unteren Bilder zeigen die Wahrscheinlichkeitsdichten von Geräuschdauer bzw. Zeitpunkt des maximalen Geräuschpegels (Tmax) | 83 |
| Abb. 2.4-3: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für Geräusche mit ähnlicher Dauer sowie Zeitpunkt und Höhe des maximalen Geräuschpegels  | 84 |
| Abb. 2.4-4: Herzschlagfrequenzänderung bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem maximalen Geräuschpegel   | 85 |
| Abb. 2.4-5: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem maximalen Geräuschpegel  | 86 |
| Abb. 2.4-6: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem Schlafstadium vor Geräuschbeginn   | 86 |
| Abb. 2.4-7: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem Schlafstadium vor Geräuschbeginn   | 87 |
| Abb. 2.4-8: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für den ersten und zweiten Teil der Nacht  | 88 |
| Abb. 2.4-9: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für den ersten und zweiten Teil der Nacht  | 88 |
| Abb. 2.5-1: Ursprung exekutiver Funktionen im Frontalhirn   | 93 |
| Abb. 2.5-2: Ereigniskorrelierte Potenziale  | 94 |
| Abb. 2.5-3: Lidschlussfrequenz bei Durchführung der Go-/Nogo-Aufgabe nach einer Ruhenacht und 3 Nächten, in denen Schienenverkehrslärm mit LAeq = 40, 44 bzw. 50 dB(A) dargeboten wurde   | 96 |

---



## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tab. 0-1: Überblick über das Design der einzelnen Arbeitspakete  | 2  |
| Tab. 2.0-1: Überblick über das Design der einzelnen Arbeitspakete  | 23 |
| Tab. 2.0-2: Ergebnisse der Hauptkomponenten-Analyse mit Mittelwerten (AM) und Standardabweichungen (SD) der ggf. transformierten 7 Eingangsvariablen   | 27 |
| Tab. 2.0-3: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der für alle Nächte berechneten Index-Werte basierend auf unterschiedlichen Hauptkomponenten-Analysen   | 28 |
| Tab. 2.0-4: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens  | 33 |
| Tab. 2.1-1a: Äquivalente Pegel und Maximalpegel des Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärms während der Experimentalnächte   | 36 |
| Tab. 2.1-1b: Pegelzeitverlauf der äquivalenten Pegel und Maximalpegel während der Experimentalnächte. Tab. 2.1-2: Prozentuale Aufwachhäufigkeit bei Schienen-, Straßen- und Luftverkehr. Mittelwert (AM), Standardabweichung (AM), Median, Minimum (Min) und Maximum (Max)   | 37 |
| Tab. 2.1-2: Prozentuale Aufwachhäufigkeit bei Schienen-, Straßen- und Luftverkehr. Mittelwert (AM), Standardabweichung (AM), Median, Minimum (Min) und Maximum (Max)   | 39 |
| Tab. 2.1-3: Logistische Regressionsanalysen der Aufwachwahrscheinlichkeit. $\beta$ = $\beta$ -Koeffizient; SE = Standard Fehler  | 39 |
| Tab. 2.1-4: Änderung der Schlafstruktur, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung, Vergleich zwischen 3 Ruhe- und 9 Lärmnächten. Mittelwerte (AM), Standardabweichung (SD) und p-Werte   | 40 |
| Tab. 2.1-5: Änderungen der physiologischen Schlafstruktur, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung, Vergleich mit den Ruhenächten (Q) und Angabe der kategorisierten p-Werte  | 41 |
| Tab. 2.1-6: Schlafstruktur, subjektive Bewertung des Schlafs und Leistung in Abhängigkeit vom äquivalenten Pegel. P-Werte, gegenüber der Ruhenacht   | 44 |
| Tab. 2.1-7: Signifikante Korrelationskoeffizienten ( $p \leq 0.01$ ) für die Beziehung zwischen physiologischen Schlafparametern, subjektiver Schlafbewertung und Reaktionszeit im Switch-Test   | 45 |
| Tab. 2.2-1: Logistische Regressionsanalysen der Aufwachwahrscheinlichkeit. $\beta$ = $\beta$ -Koeffizient; SE = Standard Fehler  | 56 |
| Tab. 2.2-2: Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Schlafparameter, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung in Ruhenächten sowie in Nächten, in denen reale bzw. frequenzgedämmte Schienen- und Straßenverkehrsgeräusche einwirkten   | 57 |
| Tab. 2.2-3: Mittelwerte und Standardabweichungen physiologischer Schlafparameter, subjektiver Schlafbewertung und Leistung in Ruhenächten und in Nächten, in denen reale bzw. frequenzgedämmte Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche einwirkten  | 59 |
| Tab. 2.2-4: Allgemeines Lineares Modell zur Bestimmung der inter-individuellen Unterschiede bezüglich der Geräuschart und der intra-individuellen Unterschiede bezüglich der Wirkung der Frequenzdämmung und der Wechselwirkung von Dämmung und Geräuschart  | 60 |
| Tab. 2.3-1: Verlauf der Verkehrsdichte und der äquivalenten Pegel. N: Anzahl stündlicher Vorbeifahrten   | 66 |
| Tab. 2.3-2: Äquivalente Pegel, denen die Probanden während der 8-stündigen Bettzeit ausgesetzt waren   | 67 |
| Tab. 2.3-3: Stündliche Verteilung der Lärmbelastung in den 3 Untergruppen bei den verschiedenen Modellen temporärer Verkehrsruhe   | 67 |
| Tab. 2.3-4: Temporäre Verkehrsruhe. Intra-individuelle Unterschiede zwischen Ruhenacht und Lärmnächten mit 3 Modellen temporärer Verkehrsruhe bei Personen mit unterschiedlichen Schlafzeiten. Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Schlafparameter und der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung | 68 |
| Tab. 2.3-5: Schlafparameter in Nächten mit (1) initialer, (2) terminaler (3) und in 2 Lärmphasen eingeschlossener Verkehrsruhe. Vergleich zu Ruhenächten   | 69 |
| Tab. 2.3-6: Vergleich abendlicher und morgendlicher Verkehrsruhe. Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) physiologischer Schlafparameter und subjektiver Schlafbewertung. Wilcoxon-Test  | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| Tab. 2.3-7: Temporäre Verkehrsruhe. Schlafverhalten von Früh- und Spätschläfern im Vergleich zu Normalschläfern. Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) physiologischer Schlafparameter und subjektiver Schlafbewertung.   | 72  |
| Tab. 2.3-8: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der Differenzen der Schlafstörungsindizes (SSI) der Lärm- (N) und der Ruheperioden (Q) der Lärmnächte (L) und der zeitlich entsprechenden Perioden der Ruhenächte (R)   | 73  |
| Tab. 2.3-9: Temporäre Verkehrsruhe. Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der Schlafstörungsindizes für jede fortlaufende Stunde, getrennt für Ruhenächte und Nächte mit temporärer Verkehrsruhe. P-Werte für den Vergleich der Lärm- mit den Ruhenächten. n Ro/Ra – Anzahl Vorbeifahrten von Straßen- bzw. Schienenfahrzeuge | 74  |
| Tab. 2.4-1: Äquivalente Pegel und Maximalpegel des Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärms während der Experimentalnächte  | 81  |
| Tab. 2.4-2: Verkehrsdichte (Anzahl Vorbeifahrten) für jede fortlaufende Stunde   | 81  |
| Tab. 2.4-3: ANOVA-Resultate zum Einfluss der Geräuschart auf den Verlauf der Herzschlagfrequenz mit und ohne Aufwachreaktion (WAR) sowie ohne WAR für Geräusche mit ähnlicher Dauer sowie ähnlichem Zeitpunkt und ähnlicher Höhe des Maximalpegels (matched)   | 84  |
| Tab. 2.4-4: ANOVA-Resultate zum Einfluss des Maximalpegels auf die Verläufe der Herzschlagfrequenz bei Geräuschen mit/ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen   | 85  |
| Tab. 2.4-5: Einfluss des Schlafstadiums vor Geräuschbeginn auf den Verlauf der Herzschlagfrequenz mit und ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen   | 87  |
| Tab. 2.4-6: ANOVA-Resultate zum Einfluss der Versuchsdauer auf die HSF-Verläufe bei Geräuschen mit und ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen  | 87  |
| Tab. 2.4-7: Anzahl von Einzelschallereignissen für die einzelnen Berechnungen  | 92  |
| Tab. 2.5-1: Signal-/Antwortkombination der Go-/Nogo-Aufgabe  | 95  |
| Tab. 2.6-1: Korrelationen zwischen der Lärmempfindlichkeit und den subjektiven Schlafdaten nach Lärmnächten  | 101 |
| Tab. 2.6-2: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) für physiologische Schlafparameter, subjektive Schlafqualität und Leistung bei Extravertierten und Introvertierten  | 105 |
| Tab. 2.6-3: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) für physiologische Schlafparameter, subjektive Schlafqualität und Leistung getrennt für emotional Stabile und Instabile   | 108 |

---

## Zusammenfassung

### Projektbeschreibung

Die interdisziplinär angelegte und laborexperimentell durchgeführte Einzelaufgabe 2311 konzentrierte sich auf drei Hypothesen, die in drei Arbeitspaketen geprüft wurden.

**AP1:** Ziel war die wirkungsäquivalente Bewertung der vom Straßen-, Schienen- und Luftverkehr emittierten Geräusche. Da das Gehirn auch während des Schlafs akustische Informationen perzipieren, analysieren und adäquat beantworten kann, war prinzipiell zu erwarten, dass die Störbarkeit in der Nacht der am Tage empfundenen Belästigung entspricht und dass Fluglärm daher die stärksten und Schienenverkehrslärm die geringsten Reaktionen verursacht.

**AP2:** Ausgehend von der Annahme eines hohen Störpotenzials tiefer Frequenzen wurde geprüft, ob deren selektive Dämmung die Häufigkeit und das Ausmaß lärmbedingter Schlafstörungen reduziert.

**AP3:** Wegen der größeren Schlaftiefe zu Beginn der Nacht war davon auszugehen, dass eine auf die zweite Nachthälfte terminierte Verkehrsruhe eine deutlichere Reduktion lärmbedingter Schlafstörungen bewirkt als eine Ruhephase zu Beginn oder in der Mitte der Nacht. Weiterhin wurde angenommen, dass die zeitlich begrenzte Verkehrsruhe in vollem Umfang nur Personen mit entsprechenden Schlafzeiten zugute kommt, nicht aber denen, die früher bzw. später ins Bett gehen bzw. aufstehen.

Aus den Untersuchungen sollten sich konstruktive Vorschläge für den Fahrzeugbau, für die Entwicklung, Dimensionierung und Auswahl passiver Schallschutzmaßnahmen, die Gestaltung von Fahrplänen und für eine wirkungsorientierte Bewertung der verschiedenen Verkehrslärmarten sowie für eine zeitlich begrenzte Verkehrsruhe ableiten lassen.

Generelles experimentelles Design. Die Probanden schliefen nach einer Gewöhnungsnacht (zur Adaptation an die laborexperimentelle Situation) in 2 bis 3 aufeinander folgenden Wochen in jeweils 4 aufeinander folgenden Nächten im Labor, in AP1 in systematischem wöchentlichen Wechsel unter der Einwirkung von Flug-, Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen, in AP3 unter der Einwirkung von Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen. In AP2 waren je 8 Probanden entweder dem Schienen- oder dem Straßenverkehrslärm ausgesetzt, der in wöchentlichem Wechsel als Originalgeräusch bzw. nach Dämmung der tiefen Frequenzen präsentiert wurde. Die 4 aufeinander folgenden Nächte einer Woche bestanden aus einer randomisierten Sequenz aus einer Ruhenacht und drei Lärmnächten mit variierenden akustischen Belastungen. Das generelle experimentelle Design ergibt sich aus Abbildung 0-1 und Tabelle 0-1.

Während der Nächte wurde das Polysomnogramm und das Elektrokardiogramm abgeleitet, morgens bewerteten die Probanden ihre Schlafqualität und führten Tests durch, mit denen die Leistung quantitativ (Arbeitsgeschwindigkeit) und qualitativ (Fehlerrate) bestimmt wurde.

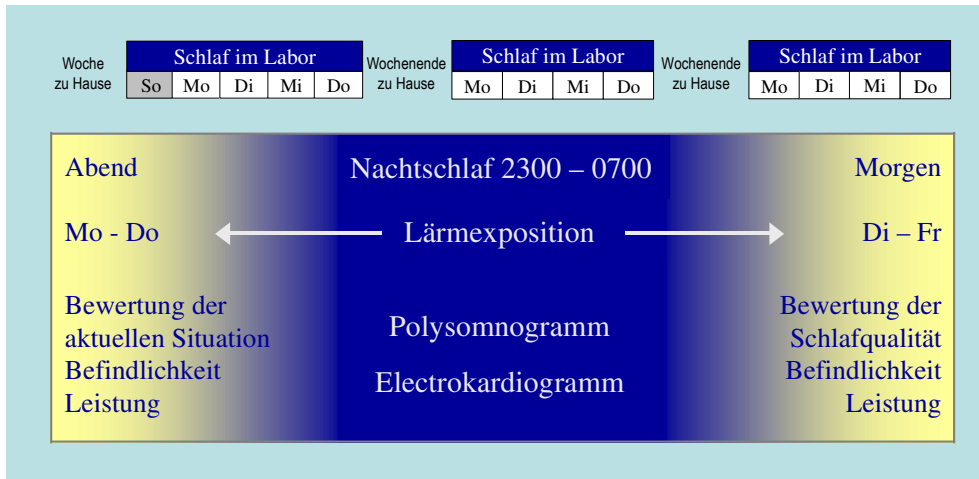


Abb. 0-1: Generelles experimentelles Design für alle 3 Arbeitspakete.

Tab. 0-1: Überblick über das Design der einzelnen Arbeitspakete

| Überblick über das Design der einzelnen Untersuchungen              |                    |   |                          |                      |   |         |          |    |
|---|--------------------|---|--------------------------|----------------------|---|---------|----------|----|
|   | Bettzeit (Uhrzeit) | wöchentlich permutierte Geräuschquellen |                          |                      | Täglich randomisierte Schallbelastung ( $L_{Aeq}$ , dB) |         |          |    |
| <b>Kontrollgruppe</b>   |                    |   |                          |                      |   |         |          |    |
| 8 Probanden   | 23 – 07            | kein Lärm                               | kein Lärm                | kein Lärm            | 32  |         |          |    |
| <b>Arbeitspaket 1 – Bewertung unterschiedlicher Geräuschquellen</b> |                    |   |                          |                      |   |         |          |    |
| 24 Probanden  | 23 – 07            | Luftverkehrslärm                        | Straßenverkehrslärm      | Schienenverkehrslärm | 32  | 39      | 44       | 50 |
| <b>Arbeitspaket 2 – Frequenzspektren</b>                            |                    |   |                          |                      |   |         |          |    |
| 8 Probanden   | 23 – 07            | Straßenverkehrslärm                     | tiefe Frequenzen gedämmt |                      | 28  | 39      | 44       | 50 |
| 8 Probanden   | 23 – 07            | Schienenverkehrslärm                    | tiefe Frequenzen gedämmt |                      |   |         |          |    |
| <b>Arbeitspaket 3 – Temporäre Verkehrsruhe</b>                      |                    |   |                          |                      |   |         |          |    |
| 8 Frühschläfer  | 22 – 06            | Straßenverkehrslärm                     | Schienenverkehrslärm     | 28                   | Verkehrsruhe  |         |          |    |
| 8 Normschläfer  | 23 – 07            |   |                          |                      | 23–3 Uhr  | 3–7 Uhr | 23–5 Uhr |    |
| 8 Spätschläfer  | 00 – 08            |   |                          |                      |   |         |          |    |

## Zentrale Ergebnisse

Generell verursachte die Einwirkung von Lärm ereigniskorrelierte mit dem Maximalpegel zunehmende Aufwachreaktionen und Beschleunigungen der Herzschlagfrequenz. Das Ausmaß dieser Reaktionen war – abgesehen vom Maximalpegel – von der Geräuschart, von der Pegelanstiegszeit, der Dauer der Geräusche und der lärmfreien Intervalle bestimmt. Diese Reaktionen kumulierten zu Störungen der Schlafstruktur mit einer Reduktion der für die Gedächtniskonsolidierung und die psychische Erholung wesentlichen Anteile des Tief- bzw. des Traumschlafs. Am folgenden Morgen wurde die Schlafqualität schlechter bewertet und eine erhöhte Müdigkeit angegeben. Im Leistungstest war die Reaktion verlangsamt.

### Wirkungsäquivalente Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten (AP1)

Einer Metaanalyse von Miedema und Vos [1998] zufolge belästigt Fluglärm am stärksten und Schienenverkehrslärm am wenigsten, während Straßenverkehrslärm eine intermediäre Stellung einnimmt. Da das Gehirn auch im Schlaf externe Stimuli analysieren und adäquat beantworten kann, war diese Rangfolge auch für lärmbedingte Schlafstörungen zu erwarten. Daher wurden diese drei Geräuscharten mit je 3 äquivalenten Pegeln von  $L_{Aeq} = 39, 44$  und  $50$  dB und Maximalpegeln von  $L_{Amax} = 45-77$  dB (aber unterschiedlicher Anzahl) appliziert.

Abbildung 0-2 zeigt die Wahrscheinlichkeit ereigniskorrelierter Aufwachreaktionen und deren Abhängigkeit von der Geräuschart. Anders als erwartet, wurden durch den Schienenverkehr deutlich mehr Aufwachreaktionen verursacht als durch Flug- und durch Straßenverkehrslärm. Dies führte, wie Abbildung 0-3 zeigt, zu entsprechenden Änderungen der Schlafstruktur, die unter Einwirkung von Schienenverkehr wiederum am ausgeprägtesten waren.

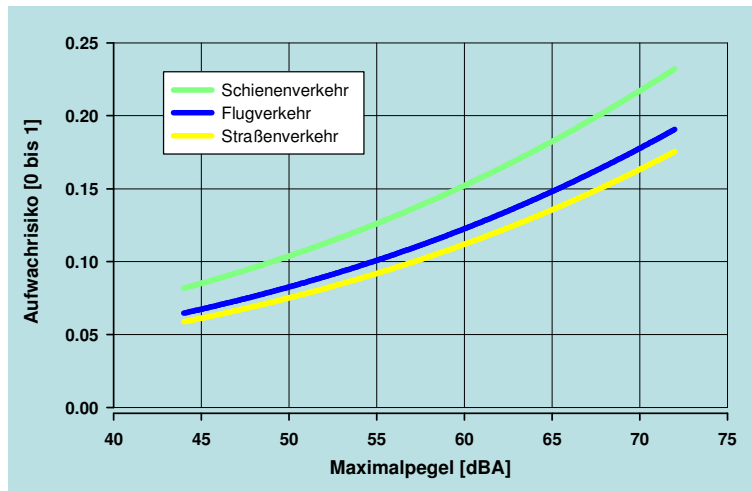


Abb. 0-2: Aufwachwahrscheinlichkeit durch einzelne Verkehrsgeräusche bezogen auf den Maximalpegel.

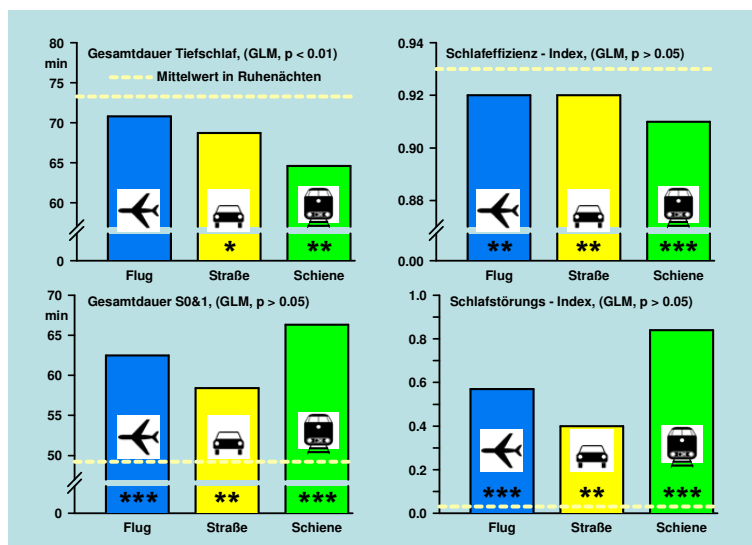


Abb. 0-3: Änderung ausgewählter physiologischer Parameter der Schlafstruktur in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

Weiterhin verursachte nächtlicher Verkehrslärm die in Abbildung 0-4 exemplarisch dargestellten Änderungen der Herzschlagfrequenz. Schallreize, die gleichzeitig eine Aufwachreaktion auslösten, verursachten ausgeprägte und länger dauernde Beschleunigungen der Herzschlagfolge. Bei ausbleibender Aufwachreaktion kam es zu biphasischen Reaktionen mit einem initialen Anstieg, dem eine Verlangsamung bis unter den Ausgangswert folgte. Auch hier verursachte Schienenverkehrslärm die stärksten, Fluglärm die geringsten Reaktionen, wobei die Pegelanstiegszeit und der Maximalpegel bedeutsam waren.

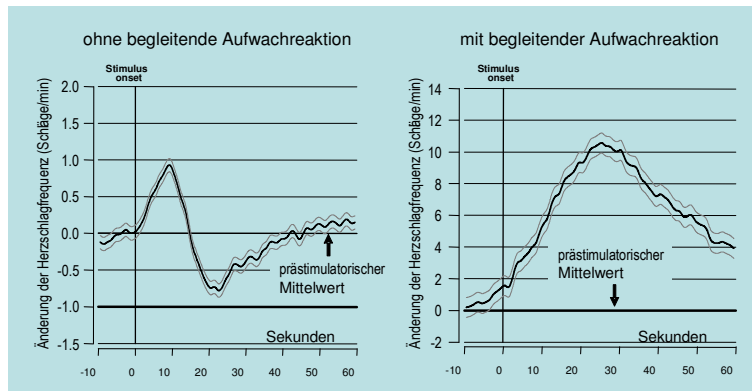


Abb. 0-4: Änderung der Herzschlagfrequenz durch Lärm ohne und mit begleitender Aufwachreaktion.

Demgegenüber waren die 'Nachwirkungen' des Lärms, d. h. die schlechter empfundene Schlafqualität, die erhöhte Müdigkeit und die Beeinträchtigung der Leistung im Sinne verlängerter Reaktionszeiten durch die Art des Verkehrslärms nicht beeinflusst, wohl aber (siehe Abb. 0-5) durch den äquivalenten Pegel.

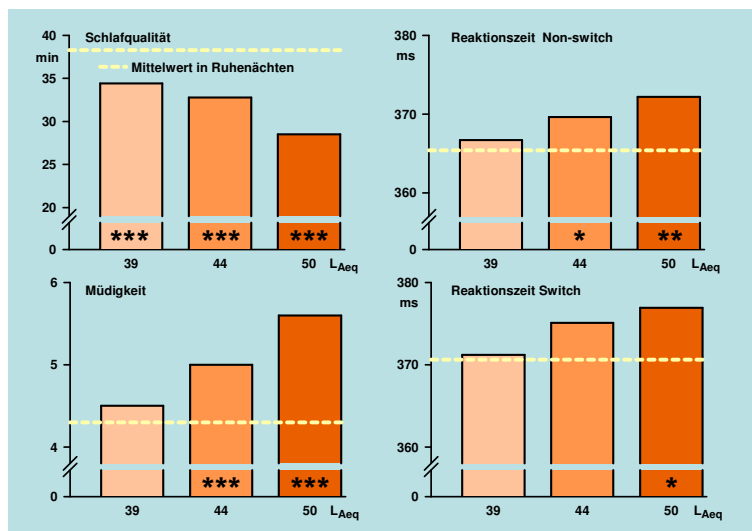


Abb. 0-5: Änderungen der subjektiven Schlafbewertung und der Reaktionszeit im Switch-Test bezogen auf die Ruhenächte, Wilcoxon-Test, Signifikanzniveau  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

Der äquivalente Pegel ist somit ein geeigneter Prädiktor der Nachwirkungen lärmbedingter Schlafstörungen. Für die Änderungen der Schlafstruktur gilt dies jedoch nicht. Das Ausmaß der Störungen war bei den beiden niedrigeren Pegelstufen ( $L_{Aeq} = 39, 44$  dB) nahezu gleich und signifikant stärker erst bei einem äquivalenten Pegel von 50 dB(A).

Der Schienenbonus, der an Bahnstrecken einen um 5 dB(A) höheren äquivalenten Pegel als an Straßen erlaubt, basiert auf groß angelegten sozialwissenschaftlichen Untersuchungen, wonach Fluglärm am meisten und Schienenverkehrslärm am wenigsten belästigt, was am deutlichsten durch die Metaanalyse von Miedema und Vos [1998] zum Ausdruck kommt. Eine Bestätigung findet der Schienenbonus auch durch die in der Einzelaufgabe 2121 durchgeführten Untersuchungen zur kombinierten Wirkung von Schienen- und Straßenverkehrslärm sowie durch die Feldstudie zur Ermittlung lärmsensibler Tageszeiten (EA2131). Er wird weiterhin durch Untersuchungen von Hygge [2003] gestützt, der die Leistung unter Einwirkung der auch hier angewandten drei Verkehrslärmarten untersuchte und die geringste Beeinträchtigung unter der Einwirkung von Schienenverkehrslärm fand. Demgegenüber war der Schlaf in der vorliegenden Untersuchung am stärksten durch Schienenverkehrslärm gestört. Diese Befunde, die durch eine Untersuchung von Basner et al. [2006] bestätigt werden, werfen die Frage auf, ob der Schienenbonus auch für den erheblich vom Wachbewusstsein abweichenden Zustand des Schlafs gilt. Die bisherigen Ergebnisse rechtfertigen derzeit weder eine Modifikation noch das Aussetzen des Schienenbonus. Derart weit reichende Entscheidungen setzen die Bestätigung dieser Ergebnisse durch weitergehende Untersuchungen mit stärker an die Realsituation orientierten Geräuschszenarien voraus.

### **Wirkung selektiver Dämmung tiefer Frequenzen (AP2)**

Anlass der zweiten Untersuchung waren Hinweise auf ein besonders hohes Störpotenzial tiefer Frequenzen. Deshalb schliefen Probanden in systematisch wechselnder Folge je eine Woche unter der Einwirkung originaler Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche und unter der Einwirkung entsprechender im tieffrequenten Bereich gedämmter Geräusche. Die hier simulierte, technisch nur schwer zu erzielende Dämmung der Frequenzen von bis zu 200 Hz um 12 dB wurde gewählt, um mit einer nur begrenzten Anzahl an Probanden grundsätzlich zu klären, ob dadurch eine Verminderung lärmbedingter Schlafstörungen möglich ist.

Die Einwirkung dieser Geräusche führte zu den bereits in der ersten Untersuchung beobachteten Veränderungen, d. h. einer mit dem Maximalpegel zunehmenden Aufwachwahrscheinlichkeit, wobei die Anstiegssteilheit, die Dauer der Geräusche und der vorausgehenden lärmfreien Intervalle eine entscheidende Rolle spielten und die Dosis-Wirkungsbeziehung für den Schienenverkehrslärm wiederum deutlich über der des Straßenverkehrslärms lag. Die Dämmung der tiefen Frequenzen bewirkte bezüglich des Straßenverkehrs eine marginale und bezüglich des Schienenverkehrs keine Reduktion der Störwirkung. Die Forderung nach einer forcierten Dämmung tiefer Frequenzen ist auf der Basis dieser Untersuchungen also kaum gerechtfertigt. Andererseits ist nicht auszuschließen, dass die Schlafstörungen durch Dämmung höherer Frequenzen vermindert werden könnten. Letzteres lässt sich aus den Untersuchungen im Einzelvorhaben EA2111 ableiten, wonach Geräusche nach Dämmung der höheren Frequenzen als angenehmer eingestuft wurden.

### Wirkung temporärer Verkehrsruhe auf den Schlaf (AP3)

Die dritte Untersuchung ging von der Annahme aus, dass eine auf das Ende der Nacht begrenzte Verkehrsruhe die Lärmwirkung stärker reduziert als eine Verkehrsruhe zu Beginn der Nacht und, da eine solche Ruhezeit sich am Schlafverhalten der meisten Erwachsenen orientiert, dass Personen, die habituell oder aus beruflichen Gründen früher bzw. später ins Bett gehen bzw. aufstehen, davon weniger profitieren.

Daher wurden drei Modelle temporärer Verkehrsruhe (2 initiale jeweils um 23 Uhr beginnende, 4- bzw. 6-stündige Ruhezeiten sowie eine terminale um 3 Uhr einsetzende 4-stündige Verkehrsruhe) realisiert. Untersucht wurden Normal-, Früh- und Spätschläfer, wodurch sich insgesamt neun Expositionsmuster ergaben, die zu drei Kategorien zusammengefasst wurden, einer Verkehrsruhe zu Beginn, am Ende und in der Mitte der Nacht.

Den Ergebnissen zufolge (Abb. 0-6) ist die morgendliche Ruhe am wirksamsten. Obwohl die Einschlafphase mäßig gestört war, kam es in der nachfolgenden Ruheperiode zur vollständigen Kompensation, so dass im Vergleich zu einer vollständigen Nachtruhe weder strukturelle noch subjektive Beeinträchtigungen nachzuweisen waren. Bei abendlicher Verkehrsruhe war der Einschlafprozess zwar nicht gestört, die nachfolgende Lärmbelastung beeinträchtigte jedoch die Schlafstruktur und bewirkte eine schlechtere Schlafbewertung. Dementsprechend waren die Szenarien, bei denen die Verkehrsruhe zwischen eine initiale und eine terminale Lärmphase eingebettet war, am wenigsten geeignet Schlafstörungen zu reduzieren.

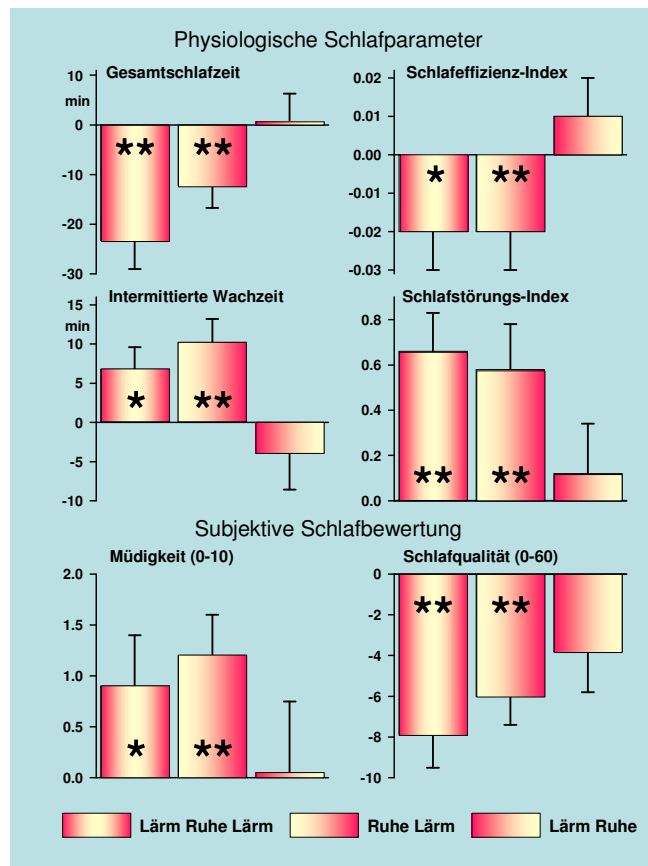


Abb. 0-6: Vergleich einzelner Schlafparameter bei unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe.



Normalschläfer, an deren Schlafverhalten sich die Ruhezeiten orientierten, profitierten von dieser Regelung am meisten. Spätschläfer, bei denen die Nacht immer mit einer Lärmperiode endete, waren im Vergleich zu den Normalschläfern daher immer beeinträchtigt, wohingegen Frühschläfer sich nur wenig von den Normalschläfern unterschieden (Abb. 0-7).

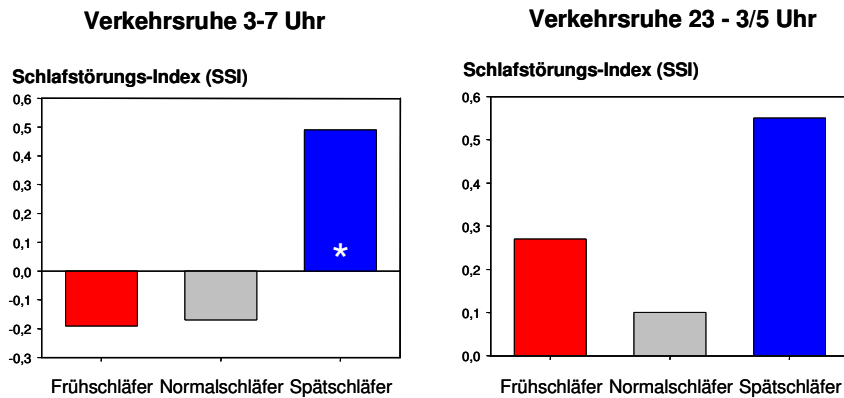


Abb. 0-7: Vergleich des Schlafstörungsindex bei Früh-, Normal- und Spätschläfern und unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe.

## Schlussfolgerung und Ausblick

Aus den Ergebnissen der Einzelaufgabe 2311 lassen sich folgende Ansätze zur Entlastung der Betroffenen ableiten.

- Die erhöhte Empfindlichkeit in den frühen Morgenstunden erfordert eine entsprechende Reduktion der akustischen Belastung. Als effektiv hat sich eine Verkehrsruhe in den letzten drei Stunden des Schlafs erwiesen. Ob eine entsprechende Wirkung durch zeitlich begrenzte Geschwindigkeitsbeschränkungen oder durch selektive Fahrverbote erzielt werden kann, ist in weiterführenden Untersuchungen zu prüfen.
- Häufigkeit und Ausmaß von Aufwachreaktionen und kardialen Reaktionen nahmen mit ansteigendem Maximalpegel und kürzer werdender Pegelanstiegszeit zu. Eine Reduktion dieser Belastungen erfordert technische Maßnahmen am Fahrzeug selbst, lässt sich aber auch durch verkehrslenkende Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen erreichen.
- Auch die mit der Dauer der lärmfreien Intervalle zunehmende Reaktion erfordert verkehrslenkende Maßnahmen im Sinne eines gleichmäßigen Verkehrsflusses. Hier sind entsprechende Untersuchungen zur temporalen Makrostruktur des Verkehrs notwendig.
- Die mit der Dauer der einzelnen Geräusche ansteigende Aufwachhäufigkeit betrifft insbesondere den Güterverkehr auf der Schiene. Ursache hierfür ist die Mikrostruktur der einzelnen Vorbeifahrten, wozu die Variation der Pegel infolge der Abstände zwischen Rädern und einzelnen Waggonen, der unterschiedlichen Höhe sowie der variablen Aufeinanderfolge von Waggonen mit unterschiedlichen Bremssystemen beitragen.

Die Wirkungen dieser Zeitstrukturen sind in weiteren Ansätzen gezielt zu untersuchen.

# 1 Lärmbedingte Schlafstörungen

## 1.1 Allgemeines zum Schlaf

Unter Vermeidung jeglicher Zeitinformation zeigen die physiologischen Funktionen eine zirkadiane Rhythmik, deren Periode individuell zwischen 23 und 26 Stunden variiert und durch den Hell-Dunkelwechsel auf die 24 Stunden des geophysikalischen Tages synchronisiert wird. Diese Rhythmik, deren markantester Ausdruck der Schlaf-Wachwechsel ist, wird durch ultradiane Schwingungen mit einer Periode von 90 bis 100 Minuten überlagert, die den Schlaf in 4 bis 6 Schlafzyklen strukturieren (Abb. 1-1). Jeder Zyklus besteht aus einem NREM (Non-REM) und einem nachfolgenden, durch schnelle Augenbewegungen (Rapid Eye Movements) charakterisierten REM-Anteil (Traumschlaf). In den NREM-Phasen nimmt die Schlaftiefe zunächst zu, danach wieder ab (Schlafstadien 1-4). Der REM-Schlaf kann bezüglich der Schlaftiefe sowohl dem Tief- als auch dem Flachschlaf entsprechen. Der NREM-Anteil wird mit jedem Zyklus kürzer und die maximal erreichbare Schlaftiefe geringer, während der REM-Anteil länger wird. Der Schlaf-Wachwechsel wird von zahlreichen Funktionsänderungen begleitet, wie etwa dem Abfall von Herzschlagfrequenz und Körperkerntemperatur, die gegen 4 Uhr ein Minimum erreichen und dann allmählich wieder ansteigen.

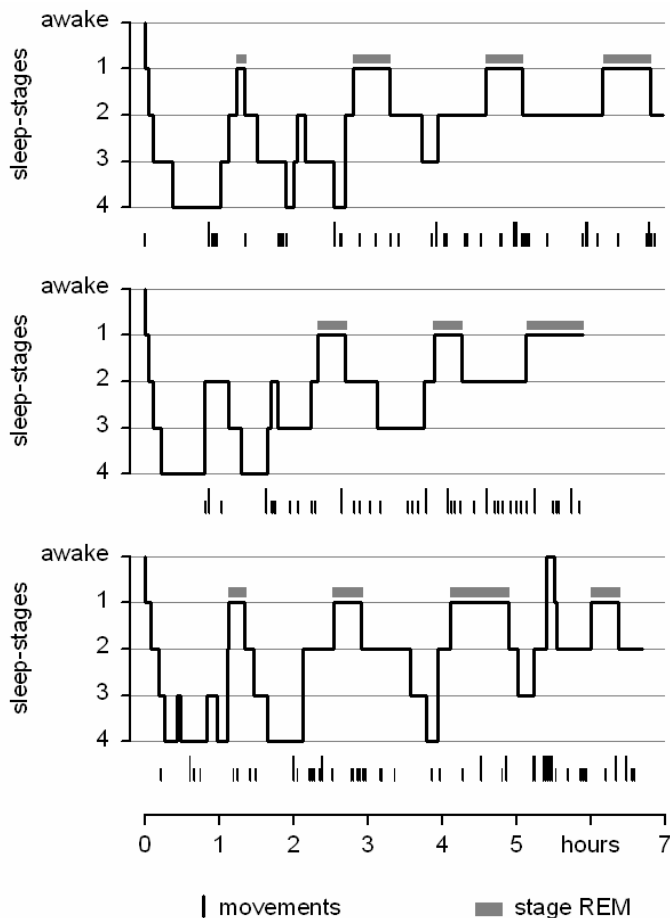


Abb. 1-1: Darstellung des Schlafablaufs (nach Dement & Kleitman 1957).

Der Anteil und die Verteilung der einzelnen Stadien ändert sich mit dem Lebensalter. Während das Neugeborene noch bis zu 16 Stunden schläft, beträgt die Schlafdauer beim Kleinkind ca. 14 und beim Schulkind 9-10 Stunden. Im Erwachsenenalter fällt die Schlafdauer von ca. 8 Stunden bei jungen Menschen bis auf ca. 6 Stunden im Greisenalter ab. Diese Reduktion der Schlafdauer ist im Wesentlichen auf den Abfall der Zeiten im REM und im Tiefschlaf zurückzuführen (Abb. 1-2).

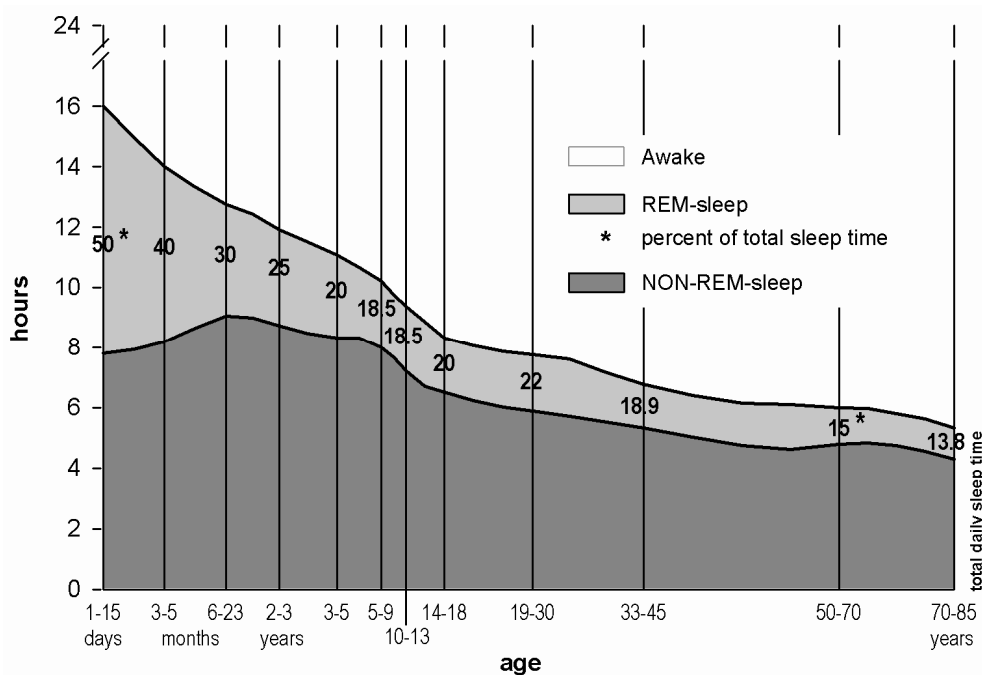


Abb. 1-2: Schlafdauer und Lebensalter [nach Roffwarg et al. 1966].

Der Schlaf, dessen Ursachen, Mechanismen und Funktionen noch weitgehend ungeklärt sind, ist – wie Entzugsversuche zeigen – für Wohlbefinden und Leistung entscheidend. Seine Störungen sind einerseits Ausdruck zu Grunde liegender Erkrankungen, werden andererseits zunehmend aber auch durch Umweltbelastungen verursacht. Während erstere einer kausalen Therapie bedürfen, lassen sich letztere durch Gestaltung der Umwelt vermeiden.

## 1.2 Aufzeichnung und Bewertung von Schlaf und Schlafstörungen

Eine valide und reliable Quantifizierung des Schlaf- und des Wachzustands sowie der Schlaftiefe ist nur mittels des **Polysomnogramms**, der gleichzeitigen Aufzeichnung von Hirnstrombild, Augenbewegungen und Muskelspannung möglich. Die Ableitung mittels am Schädel fixierter Elektroden ist allerdings aufwändig und die anschließende Auswertung zeitraubend. In Felduntersuchungen werden daher oft **Körperbewegungen** mit einem am Handgelenk getragenen Aktimeter registriert. Diese erlauben zwar eine reliable Schätzung der Schlafdauer jedoch nur eine ungenaue Erkennung intermittierender Wachphasen. Noch unsicherer ist das vom Probanden signalisierte Aufwachen, da die Betätigung des

vereinbarten **Aufwachsignals** oft vergessen wird. Teilweise werden auch die im Gegensatz zu den anderen Reaktionen nicht gewöhnungsfähigen Änderungen '**autonomer**' **Funktionen** wie Herzschlagfrequenz, Blutdruck und Ausscheidung von Stresshormonen registriert.

Für den Betroffenen von größter Bedeutung ist dessen **subjektive Bewertung der Schlafqualität**, die im Wesentlichen aus der Dauer der initialen (Einschlafzeit), der intermittierten und der terminalen Wachzeiten sowie der erinnerten Schwierigkeiten beim (Wieder-)Einschlafen resultiert [Griefahn et al. 2005, Öhrström 1995].

Das **Leistungsverhalten** wird meist mit Wahlreaktionstests erfasst. Neuere Ansätze zielen auf die Registrierung exekutiver, im Frontalhirn ablaufender Funktionen unter Einschluss ereigniskorrelierter Hirnpotentiale ab.

### 1.3 Unterteilung lärmbedingter Schlafstörungen

Die systematische Untersuchung lärmbedingter Schlafstörungen begann Ende der 60er Jahre und wurde zunächst vorwiegend im Labor, später auch in der Realsituation durchgeführt.

In der Abfolge umweltbedingter Schlafstörungen sind zu unterscheiden:

- *Primäre Störungen.* Sie bezeichnen akute Störungen wie verzögertes Einschlafen, intermittiertes und vorzeitiges Aufwachen, motorische und vegetative Funktionsänderungen sowie über die gesamte Nacht kumulierte Änderungen des Schlafverhaltens.
- *Sekundäre Störungen.* Sie sind Folgen schlafgestörter Nächte und betreffen die subjektiv empfundene Schlafqualität sowie die mentale und die psychomotorische Leistung.
- *Tertiäre Störungen.* Sie sind manifeste Gesundheitsschäden, zu denen langfristig wiederholte Schlafstörungen beitragen können.

Während die Akutreaktionen zweifelsfrei durch Lärm verursacht sind, tragen zu den globalen Reaktionen (z. B. Ausscheidung von Stresshormonen), ebenso wie zu den Sekundär- und den Tertiärreaktionen weitere Stressoren bei, so dass sich der Beitrag des Lärms zur Gesamtreaktion nicht quantifizieren lässt.

### 1.4 Primäre Schlafstörungen

Primärreaktionen wurden am häufigsten untersucht. Deren Häufigkeit und Ausmaß ist von zahlreichen akustischen und nicht-akustischen Faktoren beeinflusst, von denen die nachfolgend erwähnten die größte Bedeutung haben.

**Informationsgehalt.** Das Gehör ist als jederzeit voll funktionsfähiges Alarmsystem angelegt und das Gehirn kann auch während des Schlafs Informationen perzipieren, analysieren und adäquat beantworten. Deshalb werden unterschiedliche Geräusche bei gleicher akustischer Belastung unterschiedlich beantwortet. Der Informationsgehalt, der überwiegend aus der Erfahrung einer Person mit einem bestimmten Geräusch resultiert, erklärt die in zahlreichen Untersuchungen beobachteten inter-individuellen Unterschiede und – da er sich im Laufe der Zeit ändern kann – die Möglichkeit der Gewöhnung und der Sensibilisierung.

Gewöhnungsprozesse wurden in den meisten über mehrere Nächte durchgeführten Untersuchungen beobachtet [Basner et al. 2004, Griefahn 1985], verlaufen bei den einzelnen Funktionssystemen jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Schnelle, oft sogar vollständige Gewöhnungen zeigt die subjektive Bewertung der Schlafqualität, während die autonomen Funktionsänderungen und Körperbewegungen weder innerhalb einer, noch mehrerer Nächte Gewöhnungstendenzen zeigen. Bei Aufwachreaktionen und anderen elektrophysiologisch indizierten Änderungen der Schlaftiefe bleibt der Gewöhnungsprozess in der Regel unvollständig. Darauf weisen Feldexperimente hin, in denen nach der Einführung von Schallschutzmaßnahmen schnelleres (Wieder-)Einschlafen, weniger intermittierendes Aufwachen, höhere REM-Anteile, weniger Körperbewegungen und eine bessere Beurteilung der Schlafqualität registriert wurden. Dabei ist allerdings nicht auszuschließen, dass es sich hierbei um nur passagere Änderungen handelt, zumal sich das Schlafverhalten der Anrainer von Flughäfen, an denen der Flugbetrieb vorübergehend eingestellt oder erheblich ausgeweitet worden war, kaum änderte [Eberhardt 1987, Fidell et al. 1994, Griefahn 1985, Griefahn et al. 2000].

Neben der Gewöhnung greifen Kompensationsmechanismen, durch die der Wiedereinschlafprozess nach lärmbedingtem Aufwachen kürzer wird und die tieferen Schlafstadien schneller erreicht werden, so dass die Änderung des Gesamtschlafs oft überraschend gering ausfällt.

### **Intermittierte vs kontinuierliche Geräusche, Bewertung von Lärmwirkungen**

Die Häufigkeit lärminduzierter Aufwachreaktionen und evozierter Körperbewegungen nimmt mit der Anzahl der Schallereignisse in der Nacht zunächst zu, jedoch nicht linear, weil die Wahrscheinlichkeit, auf den einzelnen Schallreiz zu reagieren, allmählich geringer wird. Deshalb ist oberhalb einer Häufigkeit von 35 – 40 Ereignissen sogar mit einer Wiederabnahme der Aufwachhäufigkeit zu rechnen [Griefahn 1985, 2002; Öhrström 1995, Öhrström & Rylander 1990]. Mögliche Ursachen hierfür sind

- die mit zunehmender Reizdichte abnehmende Emergenz,
- die Maskierung der Einzelereignisse, die bei hoher Reizdichte nicht mehr erkennbar sind und so ihren spezifischen Informationsgehalt verlieren,
- die mit der Reizdichte zunehmende Wahrscheinlichkeit, dass die Reaktion auf einen vorangegangenen Reiz noch nicht abgeschlossen ist, so dass ein nachfolgender Reiz eine nur eingeschränkte Reaktion zulässt [Griefahn 1977, Griefahn & Jansen 1975].

Bei der Beurteilung lärmbedingter Schlafstörungen sind daher zwei durch die Geräuschdichte definierte akustische Situationen zu unterscheiden:

- intermittierte Geräusche, bei denen die einzelnen Schallereignisse – wie beim Flug- und beim Schienenverkehr – deutlich voneinander getrennt sind,
- kontinuierliche Geräusche, bei denen die Maximalpegel – wie bei lebhaftem Straßenverkehr – nur wenig vom äquivalenten Dauerschallpegel abweichen.

Abgeleitet aus experimentellen Untersuchungen wird eine Geräuschsituation dann als intermittiert bezeichnet, wenn die Maximalpegel der einzelnen Ereignisse den äquivalenten Dauerschallpegel um mindestens 10 dB(A) überschreiten [Griefahn 1992]. Intermittierte Geräusche beeinträchtigen – wie die obigen Ausführungen nahelegen – bei gleichem äquivalentem Dauerschallpegel und gleicher Geräuschart sowohl den Schlafablauf (Aufwachen, Körperbewegungen) als auch die subjektiv bewertete Schlafqualität weit mehr als eher kontinuierliche Geräusche [Eberhardt et al. 1987, Öhrström 1995, Öhrström & Rylander 1982, 1990]. Dies bestätigte sich in den letzten Jahren in den von Passchier-Vermeer et al. [2002] und von Basner et al. [2004] durchgeführten groß angelegten bei Flughafenanrainern durchgeführten Untersuchungen, in denen die durch Fluglärm evozierten Reaktionen (Aufwachen, Reduktion des Tiefschlafs) keinerlei Beziehungen zum äquivalenten Dauerschallpegel wohl aber zum Maximalpegel der nachts applizierten Geräusche hatten.

Zur Bewertung und Vorhersage lärmbedingter Schlafstörungen ist der äquivalente Dauerschallpegel daher nur begrenzt geeignet. Er eignet sich zur Bewertung (experimentell applizierter) eher kontinuierlicher Geräusche, zur Vorhersage von Globalreaktionen und der unmittelbar nach dem morgendlichen Aufwachen eingeschätzten qualitativen und quantitativen Parameter des Schlafs (Anzahl und Dauer der Wachphasen, Einschlafdauer, Schlafqualität) sowie der aktuellen Müdigkeit und der Belästigung [Eberhardt 1987, Griefahn 1986, Hofman et al. 1995, Ludlow & Morgan 1972, Öhrström 1995, Öhrström & Björkman 1988, Öhrström & Rylander 1982, Quehl 2005].

Untersuchungen zum Leistungsverhalten wurden mit sehr unterschiedlichen Tests und mit widersprüchlichen Ergebnissen durchgeführt. Nach der bisher vorliegenden Literatur werden Leistungsbeeinträchtigungen am ehesten durch intermittierte Geräusche verursacht, die sich vor allem in länger dauernden monotonen Reaktionstests mit einer Tendenz zu langsameren Reaktionszeiten und höheren Fehlerraten zeigen [Basner et al. 2004, Griefahn et al. 2000, Öhrström 1995, Öhrström & Björkman 1988, Öhrström & Rylander 1990]. Dosis-Wirkungsbeziehungen bestehen jedoch weder mit dem äquivalenten Dauerschallpegel noch mit dem Maximalpegel [Griefahn 1985, Jurriëns et al. 1983].

### **Maximalpegel und Emergenz**

Während die Häufigkeit der Überflüge an den meisten Flughäfen deutlich abfällt (und der Verkehr in vielen Fällen für eine bestimmte Zeitperiode sogar ganz eingestellt wird) , bleibt die Häufigkeit der Vorbeifahrten von Schienenfahrzeugen oft gleich, wobei sich jedoch eine qualitative Änderung ergibt, da sich der Anteil der Güterzüge meist deutlich erhöht. Der vom Luft- und vom Schienenverkehr emittierte Lärm ist also immer intermittiert und wird als Folge einzelner Ereignisse wahrgenommen. Das Geräuschbild des Straßenverkehrs unterliegt oft erheblichen tagesperiodischen Schwankungen. An Straßen mit hoher Verkehrsdichte besteht tagsüber und häufig bis in die späten Abendstunden ein eher kontinuierlicher Lärm. Mit abnehmender Verkehrsdichte wird dieser zwischen 1 und 4 Uhr meist intermittiert, um daran anschließend wieder lebhafter zu werden und gegen Morgen

einen wieder eher kontinuierlichen Charakter anzunehmen (ein Zeitverlauf, der in bisherigen Untersuchungen oft nicht berücksichtigt wurde).

Die Wirkung intermittierender Geräusche wird am besten durch den Maximalpegel beschrieben, der durch signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen mit dem Ausmaß akuter Schlafstörungen verknüpft ist und ab ca. 55 dB(A) deutlich vermehrte Aufwachreaktionen und ab 45-60 dB(A) vermehrt Körperbewegungen verursacht (z. B. Abb 1-3, [u. a. Basner et al. 2004, FICAN 1997, Griefahn 1992, Pearsons et al. 1989]). Einen erheblichen Anteil daran hat die bisher kaum untersuchte Emergenz (die Differenz zum äquivalenten Dauerschallpegel), die möglicherweise sogar bedeutsamer als der absolute Pegel ist [Eberhardt 1988, Metz & Muzet 1976, Vernet 1983]. Die Gesamtzahl der Wachphasen und Körperbewegungen muss dabei – insbesondere bei älteren Menschen – nicht notwendigerweise zunehmen, es ist hier vielmehr eine Umverteilung möglich, wobei an die Stelle spontaner nun vermehrt evozierte Änderungen treten [Basner et al. 2004, Eberhardt & Akselsson 1987, Eberhardt et al. 1987, Fidell et al. 1995, Muzet et al. 1980, Öhrström 1995, Öhrström & Björkman 1988, Öhrström & Rylander 1982, Passchier-Vermeer et al. 2002].

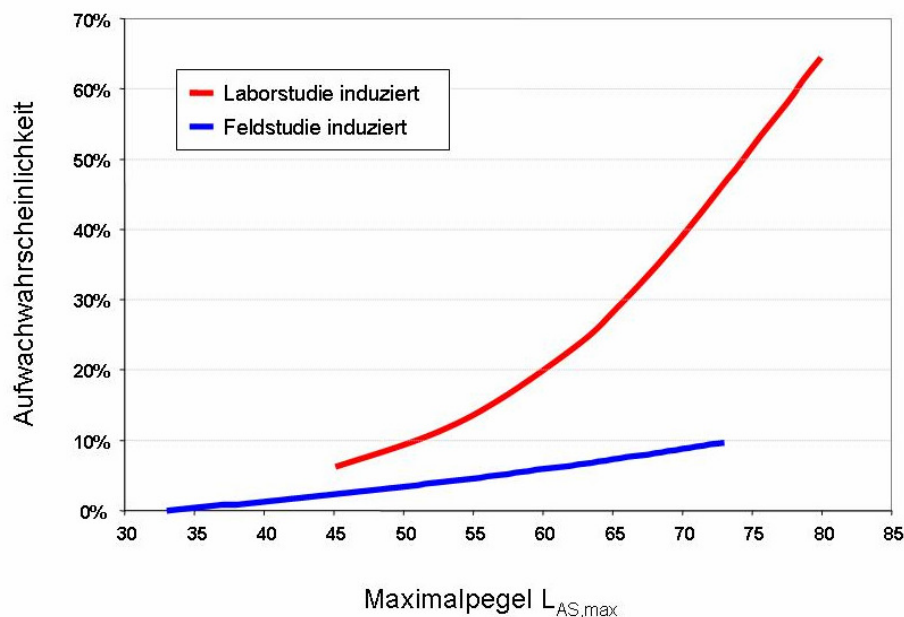


Abb. 1-3: Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Fluglärm-Maximalpegel bei 128 im Labor und 64 in der Realsituation untersuchten Anrainern des Flughafens Köln-Bonn (Basner et al. 2004)

### Wirkungsäquivalente Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten

Die wichtigste Determinante der Lärmwirkung ist der Informationsgehalt eines Geräusches, der nur zum Teil aus den akustischen Parametern, in erster Linie aber aus der Erfahrung einer Person mit diesem Geräusch resultiert, was die großen, in nahezu allen Untersuchungen beobachteten interindividuellen Unterschiede erklärt. Die Reaktion auf im Wachbewusstsein bedeutsame Geräusche ist – bei gleichem Pegel – oft deutlich stärker als auf weniger bedeutsame Geräusche [z. B. Oswald et al. 1960, Strauch et al. 1976].

Solche Unterschiede sind daher auch für die von den 3 wichtigsten Verkehrsträgern emittierten Geräusche zu erwarten, weil – wie eine von Miedema und Vos [1998] durchgeführte Meta-Analyse zeigt – Fluglärm bei gleichem äquivalentem Dauerschallpegel deutlich stärker belästigt als Straßenverkehrslärm und dieser wiederum mehr als Schienenverkehrslärm, wobei die Unterschiede mit zunehmender Belastung größer werden [Miedema & Vos 1998]. Diese Rangfolge gilt auch für die Nighttime Annoyance, die sich auf die gesetzlich definierte Nacht bezieht und daher meist nicht mit der Schlafperiode identisch ist [Griefahn et al. 1999, Health Council of the Netherlands 1999, Hoeger et al. 2002]. Ob allerdings der auf sozialwissenschaftlichen Untersuchungen basierende 'Schienenbonus', der an Bahnlinien einen um 5 dB(A) höheren äquivalenten Dauerschallpegel als an verkehrsreichen Straßen erlaubt [16. BImSchV – Verkehrslärmschutzverordnung] auch für den Schlaf und andere physiologische Funktionen gilt, ist fraglich.

Erste orientierende Untersuchungen hierzu stützen diesen 'Bonus' nicht, erlauben aufgrund der wenigen Beobachtungen und der angewandten Methoden aber auch keine definitiven Schlussfolgerungen im Sinne umsetzbarer Empfehlungen. Muzet et al. [1985] präsentierten ihren 7 Probanden in einer einzigen Nacht einen Mix aus einzelnen Straßen-, Schienen- und Flugverkehrsgeräuschen und registrierten die stärkste Akutreaktion auf Schienenverkehrslärm, dessen Maximalpegel sogar niedriger als der des Fluglärms war. Hofman et al. [1993] bestätigten die starke Reaktion auf Schienenverkehrslärm mit einem allerdings wenig realistischen Untersuchungsansatz.

Vernet [1983] sowie Griefahn et al. [2000] verglichen das Schlafverhalten von Anwohnern frequentierter Verkehrsstraßen und Bahntrassen. Während die Straßenverkehrsgeräusche bei Vernet [1983] wegen der größeren Ereignishäufigkeit bei gleichem äquivalentem Dauerschallpegel eine größere Anzahl von Reaktionen hervorrief, konnten Griefahn et al. [2000] keinerlei Unterschiede des aktimetrisch indizierten Schlafverhaltens, der subjektiv bewerteten Schlafqualität und der Leistung feststellen, obwohl die globale Bewertung in Interviews einen deutlichen 'Bonus' für die Schiene ergab.

Die wirkungsäquivalente Bewertung der von Straßen-, Schienen- und Luftverkehr emittierten Geräusche im Hinblick auf physiologisch nachweisbare Schlafstörungen, lässt sich aus der vorliegenden Literatur nicht ableiten und ist Gegenstand des Arbeitspakets 1 der hier vorliegenden Untersuchung. Aus den Ergebnissen lassen sich u. a. wirkungsorientierte Bonus-Malus-Regelungen aber auch die Dimensionierung von Schallschutzmaßnahmen gegen die verschiedenen Verkehrslärmarten ableiten.

## **Frequenzspektren**

Mehrere Publikationen weisen auf ein höheres Belästigungspotential tiefer Frequenzen hin [Berglund et al. 1999]. Deshalb sind bei der Einwirkung tiefer Frequenzen auch während des Schlafs stärkere Störungen zu erwarten. Darauf deuten schon in den 70er Jahren durchgeführte Experimente hin, in denen Terzbandgeräusche mit jeweils gleichem Maximalpegel aber unterschiedlichen Mittenfrequenzen (50, 125, 250, 1 000 Hz) appliziert wurden und in denen sich das Ausmaß der Schlafstörungen invers zur Mittenfrequenz ver-



hielt [LeVere et al. 1973, 1974]. Entsprechend ist der Befund einer neueren Feldstudie zu interpretieren, in der die nächtliche Cortisolausscheidung besser mit den C- als mit den A-bewerteten Pegeln korrelierte [Ising & Ising 2001]. Auch Nicolas et al. [1993] erklärten die im Vergleich zu anderen Verkehrsgeräuschen stärkere Reaktion auf Motorradgeräusche mit dem hohen Anteil tiefer Frequenzen.

Die Annahme einer frequenzabhängigen Verarbeitung von Geräuschen stützt sich auch auf die oft überraschend geringe Wirkung schalldämmender Fenster. Es ist zu vermuten, dass dies mit der nur mäßigen Dämmung der tiefen Frequenzen zusammenhängt, die daher im Innenraum ein stärkeres Gewicht haben [Eberhardt 1990, Griefahn 1985, Hofman et al. 1995].

Ein indirekter Hinweis auf die Bedeutung tiefer Frequenzen resultiert auch aus der zunehmenden Störbarkeit älterer Menschen, deren Hörverlust vor allem die mittleren und höheren Frequenzen betrifft, während die Perzeption tiefer Frequenzen weitgehend erhalten bleibt [Ludlow & Morgan 1972, Lukas et al. 1971]. Das Arbeitspaket 2 (s. u.) soll zur Klärung dieser Frage beitragen, um konstruktive Vorschläge für den Fahrzeugbau sowie für die Entwicklung und Optimierung des passiven Schallschutzes zu ermöglichen.

### **Zeitlich begrenzte (temporäre) Verkehrsruhe**

Die Kenntnis der Reagibilität im Laufe der Nacht ermöglicht die gezielte Einschaltung von Ruhepausen z. B. durch zeitlich begrenzte Fahr- und Flugverbote, um das Ausmaß der Schlafstörungen zu begrenzen. Einige Arbeiten deuten darauf hin, dass die Störbarkeit im Laufe der Nacht zunimmt [z. B. Basner et al. 2001, Fidell et al. 1994, Griefahn 1978, Thiessen & Lapointe 1983]. Dies ist plausibel angesichts der allmählich geringer werdenden Schlaftiefe, der zunehmenden Erholung des Gehörs, der fortschreitenden Entmüdung sowie des gegen Morgen ansteigenden sympathischen Tonus. Aus diesen Untersuchungen, in denen der Verkehrslärm mehr oder weniger gleichmäßig über die ganze Nacht verteilt einwirkte, lassen sich jedoch keine Empfehlungen für die Gestaltung von Fahr- und Flugplänen oder zeitlich begrenzte Fahrverbote (temporäre Verkehrsruhe, Geschwindigkeitsbegrenzung) ableiten. Dies erfordert spezielle Untersuchungen mit unterschiedlichen zeitlichen Expositionsmustern. Allerdings lassen sich auch aus zwei entsprechend konzipierten Untersuchungen keine Empfehlungen ableiten, da die Anzahl der Beobachtungen zu gering [Maschke 1992] bzw. eine eher seltene akustische Situation simuliert worden war (nächtliche Übungen der Bundeswehr [Griefahn & Jansen 1988]). Beide Untersuchungen zeigten aber eine Kompensation der in der ersten Hälfte der Nacht erlebten Schlafstörungen durch Nachholen der Tiefschlafzeit im lärmarmen zweiten Teil der Nacht. Arbeitspaket 3 konzentriert sich auf diese Problematik.

**Weitere akustische Merkmale.** Häufigkeit und Ausmaß der Reaktion werden – in begrenztem Umfang – durch weitere akustische Merkmale, wie etwa die Dauer und bestimmte Strukturen der einwirkenden Geräusche bestimmt.

## Individuelle und situative Einflussfaktoren

**Lebensalter.** Da Gesamtschlafzeit, Tief- und Traumschlaf mit dem Lebensalter kürzer werden und der Flachschlaf dann überwiegt (siehe Abb. 1-2), nimmt die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einwirkungen zu. Wie Abb. 1-4 zeigt fällt die Reaktionsschwelle in den ersten 15 Lebensjahren kontinuierlich ab und Kinder sind generell um 10-20 dB(A) weniger empfindlich als Erwachsene [Eberhardt 1987, Kahn 2002]. Bei Letzteren ist die Beziehung zwischen der Reagibilität und dem Alter hingegen unklar. So fanden Basner et al. [2004] die geringste, Passchier-Vermeer et al. [2002] die höchste Empfindlichkeit in der Gruppe der 40 bis 50-Jährigen. Im hohen Alter ist die Empfindlichkeit aber wohl gesteigert, wobei die Gesamtzahl intermittierender Wachphasen im Vergleich zu ungestörten Nächten oft unverändert bleibt, weil ältere Menschen habituell häufiger aufwachen und der Lärm lediglich eine Umverteilung der Wachphasen bewirkt: an die Stelle spontaner Wachphasen treten nun vermehrt evozierte Wachperioden [Eberhardt 1987, Griefahn 1985, Muzet et al. 1980].

**Geschlecht.** Nur wenige Untersuchungen bestätigen die Annahme, dass Frauen gegenüber nächtlichen Lärmeinwirkungen empfindlicher sind. Unter Berücksichtigung der Arbeiten der letzten Dekaden scheinen beide Geschlechter etwa gleich stark auf Lärm zu reagieren (Aufwachreaktionen, Körperbewegungen, kardiovaskuläre Reaktionen) [z. B. Basner et al. 2004, Griefahn et al. 1985, Passchier-Vermeer et al. 2002].

Schwellenwerte für Arousals bei Kindern (nach Kahn 2002)

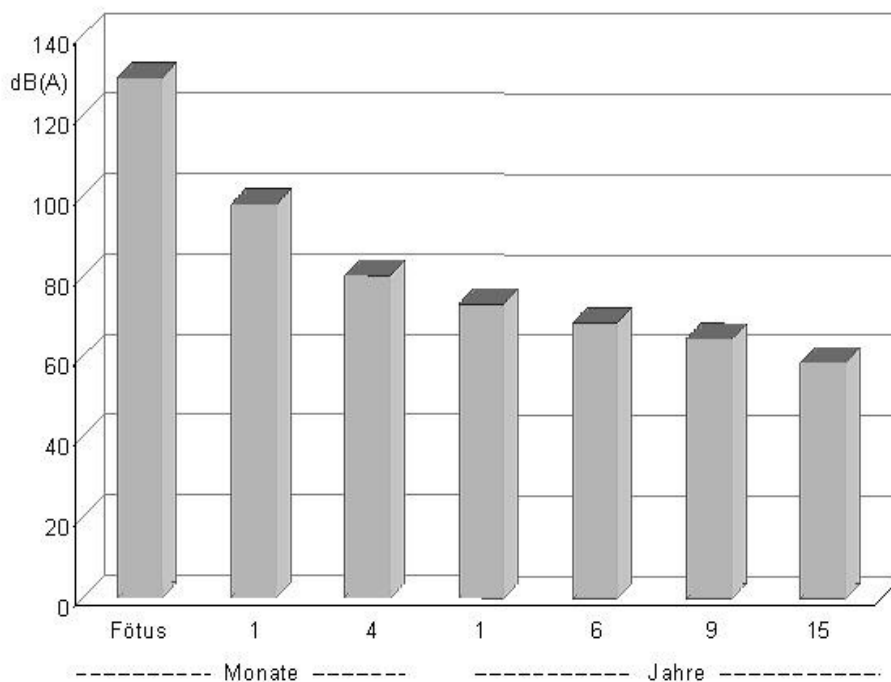


Abb. 1-4: Arousals bei Föten und Kindern bis zum 15. Lebensjahr [Kahn 2002].

**Persönlichkeitsmerkmale.** Personen mit neurotischen Tendenzen, höherer Ängstlichkeit und Lärmempfindlichkeit reagieren im Vergleich zu eher unauffälligen Personen in der Tat stärker auf nächtliche Schallreize [z. B. Basner et al. 2004, Öhrström & Björkman 1988, Passchier-Vermeer et al. 2002].

**Zirkadiane Phasenlage.** Die Wahrscheinlichkeit lärmbedingter Aufwachreaktionen und Körperbewegungen steigt im Laufe der Nacht allmählich an, wozu die abfallende Schlaf-tiefe, die fortschreitende Entmüdung, die Erholung des Gehörs und der gegen Morgen ansteigende sympathische Tonus beitragen [Basner et al. 2004, Fidell et al. 1994, Griefahn et al. 2005, Passchier-Vermeer et al. 2002].

Unter ungünstigen Bedingungen schlafen Nachtarbeiter. Deren Schlafdauer ist am Tage – unter sonst vergleichbaren akustischen Bedingungen – um 1 bis 2 Stunden kürzer. Hier bestehen erhebliche Erkenntnisdefizite bezüglich der Wirkung des am Tage um 7 bis 15 dB(A) höheren äquivalenten Pegels auf den Schlaf. Erste mit wenigen Probanden und schon in den 70er Jahren durchgeführte Untersuchungen deuten an, dass die Reaktion während des Tagschlafs deutlich stärker ausfällt, zumal das Geräuschbild am Tage einen erheblichen Anteil besonders störender informationshaltiger Geräusche hat.

**Schlaf-tiefe.** Entsprechend der Definition der Schlaf-tiefe nimmt die Wahrscheinlichkeit für das Auslösen von Aufwachreaktionen, Körperbewegungen und kardiovaskulären Reaktionen im NREM-Schlaf vom Stadium 1 bis zum Stadium 4 hin ab. Die Reaktion im Stadium REM fällt extrem unterschiedlich aus, so dass der REM-Schlaf sowohl dem Leicht- als auch dem Tiefschlaf zugerechnet wird [Muzet et al. 1980, 1985, Whitehead & Hume 2001].

**Situative Einflüsse (Labor versus Feld).** Die erste Nacht in einer neuen Umgebung ist üblicherweise durch längere Einschlafzeiten und vermehrte intermittierte Wachphasen gekennzeichnet (First-Night-Effect) und wird daher in den statistischen Auswertungen wissenschaftlicher Untersuchungen meist nicht berücksichtigt. Obwohl sich danach ein 'steady state' einstellt, bleibt die Empfindlichkeit gegenüber der Einwirkung von Lärm möglicherweise erhöht. Dies lässt sich zumindest aus den Untersuchungen von Basner et al. [2004] ableiten, in denen 20 Anwohner des Flughafens Köln-Bonn auf die im Labor präsentierten Geräusche stärker als auf den in ihrer gewohnten häuslichen Umgebung einwirkenden Fluglärm reagierten [Griefahn 1985, Whitehead & Hume 2001].

## 1.5 Sekundäre lärmbedingte Schlafstörungen

Schlafstörungen werden von den Betroffenen wegen ihrer Nachwirkungen, der als schlechter empfundenen Schlafqualität und der Beeinträchtigung von Stimmung und Leistung als besonders gravierend eingestuft. Die subjektive Schlafqualität ist insbesondere durch Dauer und Verlauf erinnelter Wachphasen bestimmt (Einschlafphase, intermittierte Wachphasen, vorzeitiges Aufwachen). Das subjektive Urteil hängt dabei vor allem vom Verteilungsmuster der einwirkenden Geräusche, von der Persönlichkeit, von personalen Eigenschaften und von der aktuellen Situation ab. So wirken sich intermittierte Geräusche stärker aus als eher kontinuierliche Geräusche, lärmempfindliche Personen sind stärker beein-

trächtig, Kinder sind um ca. 10 dB(A) weniger empfindlich und zu Beginn der Nacht erfahrene Schlafstörungen werden als weniger belastend empfunden.

Während die subjektiven Reaktionen im Labor oft schnelle, teilweise sogar vollständige Gewöhnungen zeigen, deuten Langzeitbeobachtungen darauf hin, dass die Abnahme objektivierbarer Aufwachreaktionen in der Regel selbst bei langjährigen Anwohnern stark befahrener Straßen unvollständig bleibt, dass diese also selbst nach Jahren noch mit – allerdings weniger häufigem – Aufwachen auf die ihnen gewohnten Geräusche reagieren.

Berichte über die Arbeitsgeschwindigkeit und die Fehlerrate in Leistungstests sind im Allgemeinen kontrovers; die Effekte sind gering und eindeutige Kausalattributionen nicht möglich. Nicht auszuschließen ist, dass die Leistung möglicherweise allein durch die aktuelle Testsituation bestimmt ist, insbesondere in Feldstudien, in denen der Verkehrslärm unverändert bzw. sogar stärker als in der Nacht auf den Probanden einwirkt [z. B. Basner et al. 2004].

Es scheint aber gesichert zu sein, dass Anwohner stark frequentierter Verkehrswege und Anrainer von Flughäfen, insbesondere lärmempfindliche Personen vermehrt über Einschlafschwierigkeiten und intermittiertes Aufwachen klagen [z. B. Öhrström et al. 1998]. Inwieweit die Beobachtung einiger Autoren [z. B. Ollerhead & Diamond 1993] zutrifft, wonach die Anzahl erinnerter Wachphasen mit der Lärmbelastung nur minimal, die der auf Lärm zurückgeführten aber deutlich ansteigt, bleibt offen, ebenso wie die Frage, ob es sich hierbei um eine durch Lärm bedingte Zunahme evozierter Störungen zu Lasten spontan auftretender Wachphasen handelt oder um eine Neigung, ohnehin auftretende Schlafstörungen vermehrt auf Lärm zurückzuführen [Griefahn et al. 1985, Langdon & Buller 1977].

Obwohl die Annahme plausibel ist, dass chronische Schlafstörungen jedweder Genese zur Manifestation multifaktorieller Erkrankungen beitragen, lassen sich Kausalzusammenhänge bisher nicht beweisen.

Auch die Annahme eines vermehrten mit der nächtlichen Lärmbelastung einhergehenden Konsums an schlaffördernden Medikamenten, wurde kontrovers beantwortet. Ein möglicher Indikator der subjektiven und langfristigen Lärmbelastung kann hingegen das mit zunehmender Belastung nachts häufiger geschlossene Fenster sein [Griefahn et al. 1985, 2000; Ising & Braun 2000].

## **1.6 Autonome Funktionsänderungen**

Lärm verursacht – wie viele andere Umweltreize auch – sympathikotone Erregungen des autonomen (vegetativen) Nervensystems und bewirkt zahlreiche physiologische Reaktionen, wie mäßige Steigerung der Herzschlagfrequenz, des Gefäßwiderstands und des Blutdrucks, vermehrte Ausschüttung von Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol, erhöhte Freisetzung von Fettsäuren, Triglyzeriden und Serumcholesterol. Dieser zunächst sinnvolle und lebensnotwendige Anpassungsprozess wird direkt durch Lärm verursacht und nicht emotional vermittelt. Emotionen werden jedoch entsprechend beantwortet, so dass die Reaktion auf neuartige und/oder unangenehm empfundene Geräusche stärker ausfällt.

Die physiologisch orientierte Lärmwirkungsforschung konzentrierte sich im Wesentlichen auf die vegetativ-hormonellen Reaktionen, zumal angenommen wird, dass sich auf deren Basis letztendlich kardiovaskuläre Erkrankungen entwickeln.

### **Akute kardiovaskuläre Reaktionen auf Lärm**

Die Auslöseschwelle kardiovaskulärer Reaktionen liegt am Tage zwischen 65 und 70 dB(A), in der Nacht 10 dB(A) niedriger [Jansen 1967, Muzet et al. 1985]. Unmittelbar nach Reizbeginn zeigt die Herzschlagfrequenz einen passageren Anstieg, während die periphere Durchblutung nach kurzer Verzögerung abfällt, das Minimum nach ca. 8 Sekunden erreicht, um danach langsam zum Ausgangswert zurückzukehren.

Das Ausmaß dieser Reaktionen ist am Tage sowohl mit dem Schallpegel als auch mit der Bandbreite der einwirkenden Schalle durch Dosis-Wirkungsbeziehungen verknüpft [z. B. Jansen 1967], wird aber durch zahlreiche individuelle und situative Faktoren modifiziert.

Ob das Ausmaß kardiovaskulärer Reaktionen (beschleunigte Herzschlagfolge, Verengung peripherer Blutgefäße) in der Nacht mit dem Pegel der einwirkenden Geräusche korreliert, ist umstritten. Möglicherweise folgen diese Reaktionen dem Alles-oder-Nichts-Gesetz, wobei sich erste Änderungen bei Maximalpegeln zwischen 50 und 60 dB(A) und bei Pegeldifferenzen (Emergenzen) von mehr als 7 dB(A) zeigen [Ehrenstein et al. 1982, Griefahn & Jansen 1975, Jansen 1970, Muzet et al. 1985, Öhrström & Rylander 1990, Tulen et al. 1986, Vallet et al. 1990, Whitehead & Hume 2001].

### **Stresshormone (Katecholamine und Cortisol)**

Anders als die kardiovaskulären Reaktionen ergeben die in labor- und feldexperimentellen Untersuchungen registrierten endokrinen Reizantworten ein sehr heterogenes Bild. Unter der Einwirkung von Lärm wurden sowohl vermehrte als auch gleichbleibende und sogar abfallende Hormonausschüttungen beobachtet, wobei die Änderung der einzelnen Hormone keineswegs gleichsinnig verläuft und Dosis-Wirkungsbeziehungen weder für Maximalpegel noch für Häufigkeit und Dauer der Geräusche bestehen. Ebenso wenig ließ sich eine nach Lärmart differenzierte Reaktion demonstrieren.

In der weltweit größten und methodisch aufwändigsten Untersuchung beobachteten Basner et al. [2004] 112 Probanden, die jeweils 13 aufeinander folgende Nächte im Labor schliefen und in 9 Nächten einer Anzahl von 4 bis 128 Überflügen mit Maximalpegeln zwischen 45 und 80 dB(A) ausgesetzt waren, sowie 64 Flughafenrainer, die sie ebenfalls 9 Nächte lang in ihrer gewohnten Umgebung untersuchten. Die über Nacht ausgeschiedenen Katecholamine waren weder im Feld noch im Labor durch Lärm beeinflusst, weder durch den äquivalenten Pegel noch durch die Anzahl oder die Maximalpegel der Überflüge. Die Ausscheidung des Cortisols zeigte im Labor aber eine gewisse Zunahme bei den akustischen Belastungen, die über den im Feld beobachteten lagen.

## 2 Einzelaufgabe 2311 Lärmbedingte Schlafstörungen – Einfluss von Verkehrslärmarten, Frequenzspektren und temporärer Verkehrsruhe

Das hier durchgeführte interdisziplinär angelegte und laborexperimentell durchgeführte Vorhaben konzentrierte sich, unter Berücksichtigung der technischen und administrativen Umsetzbarkeit, im Wesentlichen auf drei Hypothesen, die aus umfangreichen Literaturanalysen abgeleitet worden waren [Griefahn et al. 2001]. Dementsprechend waren die Untersuchungen durch die nachfolgend kurz umrissenen drei Arbeitspakete strukturiert.

**AP1: Wirkungsäquivalente Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten.** Ziel war die wirkungsäquivalente Gewichtung der vom Straßen-, Schienen- und Luftverkehr emittierten Geräusche. Da das Gehirn auch während des Schlafs akustische Informationen perzipieren, analysieren und adäquat darauf reagieren kann, war prinzipiell zu erwarten, dass die Störbarkeit in der Nacht mit der am Tage empfundenen Belästigung assoziiert ist und dass Fluglärm die stärksten, Schienenverkehrslärm hingegen die geringsten Reaktionen verursacht.

**AP2: Frequenzspektren.** Gegenstand des Arbeitspakets war die Prüfung der begründeten Hypothese, dass Geräusche mit hohen Anteilen tiefer Frequenzen eine stärkere Wirkung haben und dass die selektive Dämmung der tiefen Frequenzen die Häufigkeit und das Ausmaß lärmbedingter Schlafstörungen signifikant reduziert.

**AP3: Temporäre Verkehrsruhe.** Mit drei Expositionsmustern, einer 4- und einer 6-stündigen Verkehrsruhe am Anfang der Nacht sowie einer 4-stündigen Verkehrsruhe am Ende der Nacht war die Hypothese zu prüfen, dass die zeitlich begrenzte Verkehrsruhe in der zweiten Nachthälfte vorteilhafter ist, weil Lärm im ersten Teil der Nacht wegen der größeren Schlaftiefe geringere Störungen verursacht, die zudem in der nachfolgenden lärmarmen Periode durch schnelleres Wiedereinschlafen und schnelleres Erreichen der Tiefschlafphasen kompensiert werden. Da die zeitlich begrenzte Verkehrsruhe in vollem Umfang allerdings nur Personen mit entsprechenden Schlafzeiten zugute kommt, nicht aber denen, die habituell, aufgrund ihrer individuellen zirkadianen Phasenlage oder aus beruflichen Gründen früher bzw. später ins Bett gehen, wurden Personen mit unterschiedlichen Schlafzeiten untersucht.

Aus den Ergebnissen dieser anwendungsorientierten Untersuchungen sollten sich konstruktive Vorschläge für den Fahrzeugbau und für die Entwicklung und Optimierung sowie für die Dimensionierung und Auswahl passiver Schallschutzmaßnahmen, für die Gestaltung von Fahr- und Flugplänen sowie für tageszeitlich begrenzte Verkehrsruhe und schließlich für Bonus-Malus-Regelungen zur Bewertung der verschiedenen Verkehrslärmarten ableiten lassen.

## 2.0 Arbeitsprogramm, Material und Methoden

### 2.0.1 Probandenselektion

In diesem Projekt war das Schlafverhalten jedes Probanden in unterschiedlichen akustischen Situationen zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Hierzu wurde ein möglichst homogenes Probandenkollektiv gewählt. Das Alter wurde auf 18 bis 30 Jahre begrenzt, da ältere Menschen ein anderes Reaktionsverhalten haben. Zum einen wachen sie habituell häufiger auf, so dass Lärm oft nur eine Umverteilung der Wachphasen bewirkt. Zum anderen lässt sich bei ihnen wegen der altersbegleitenden Reduktion des Tiefschlafs nicht die gesamte Breite möglicher Reaktionen erfassen [Eberhardt 1987, Griefahn 1985, Muzet et al. 1980]. In der hier gewählten Altersgruppe reagieren Männer und Frauen im Allgemeinen gleich [Basner et al. 2001, Griefahn 1985, 1986, Griefahn & Jansen 1988], weshalb die in allen Untersuchungsabschnitten angestrebte und auch erreichte, jeweils gleiche Anzahl von Männern und Frauen keine unverzichtbare Bedingung darstellte.

Neben einer medizinischen, primär anamnestischen Untersuchung zum Ausschluss von Personen mit chronischen Erkrankungen, Medikamenten-, Drogen- und Alkoholabusus wurden mit der Verarbeitung des Lärms interferierende **Moderatorvariablen** erhoben, um Personen mit bestimmten Merkmalsausprägungen in die Untersuchungen einzubeziehen bzw. von den Untersuchungen auszuschließen.

- Das **habituelle Schlafverhalten** wurde mit einem entsprechenden Fragebogen erfasst. Zur Quantifizierung des Laboreffekts wurde das **aktuelle Schlafverhalten** in der Woche vor und nach der Laborphase mit dem gleichen wie im Labor eingesetzten Kurzfragebogen ermittelt (sleep logs, s. u.).
- **Persönlichkeitsmerkmale** wurden mit dem Freiburger Persönlichkeitsinventar (FPI-R [Fahrenberg et al. 1989]) bestimmt, wobei insbesondere die Merkmale Neurotizismus und Extraversion interessierten. Die Lärmempfindlichkeit wurde mit einem neuen, im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Fragebogen (Noise Sensitivity Questionnaire, NoiSeQ [Schütte & Marks 2004]) erfasst. Ausschlusskriterien waren hohe Werte für neurotische Tendenzen und Ängstlichkeit, die mit einer erhöhten Reaktionsbereitschaft assoziiert sind [Basner et al. 2001, Ludlow & Morgan 1972, Öhrström & Björkman 1988, Rylander et al. 1972].
- Die **Bestimmung des Chronotyps** (der individuellen zirkadianen Phasenlage) erfolgte
  - a) mittels der validierten deutschen Fassung des Morningness-Eveningness Questionnaire (D-MEQ [Griefahn et al. 2001]),
  - b) im AP3 zusätzlich mit dem Verfahren der Constant Routines (24 Stunden Bettruhe, 12 – 12 Uhr, < 30 lux, < 50 dB(A), 20 °C, stündliche Bestimmung der Melatonin- und Cortisolkonzentrationen im Speichel [Griefahn 2002]). Die Objektivierung der individuellen Phasenlage war für die spezielle Fragestellung in AP3 notwendig, da die Teilnahme von Probanden essentiell war, bei denen von einem zuverlässigen Schlafverhalten ausgegangen werden konnte.

- **Schichtarbeit.** An den Untersuchungen sollten keine Personen teilnehmen, die innerhalb der letzten 14 Tage vor der Laborphase Schichtarbeit geleistet hatten.
- **Audiometrie.** Die Probanden wurden bei ihrem ersten Besuch im Institut audiometriert, wobei die Hörschwelle im Frequenzbereich von 125 Hz bis 12 kHz bestimmt wurde. Personen mit einem beidseitigen Hörverlust von mehr als 30 dB, wurden nicht zur Untersuchung zugelassen.

*Anzahl der Probanden.* Untersuchungen zum Schlafverhalten wurden wegen des damit verbundenen technischen, zeitlichen und personellen Aufwands in aller Regel mit nur wenigen Probanden und über nur wenige Nächte (oft sogar über nur eine Nacht) durchgeführt, weshalb keine dieser Arbeiten allein gültige Schlussfolgerungen erlaubt. Die hier durchgeführten Untersuchungen wurden in jeder Belastungsstufe mit jeweils acht Probanden vorgenommen. Da die einzelnen Arbeitspakete mit einem einheitlichen Design und gleichem Versuchsablauf realisiert worden waren, ermöglichte dies den Vergleich zwischen den einzelnen Arbeitspaketen und eine weitere Absicherung der Ergebnisse.

## 2.0.2 Experimentelles Design

Abgesehen von einer Kontrollgruppe von 8 Probanden, die keiner Lärmeinwirkung ausgesetzt war, schliefen alle Probanden im AP1 in systematischem wöchentlichen Wechsel unter der Einwirkung von Flug- Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen, in AP3 unter der Einwirkung von Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen. In AP2 waren die Probanden entweder dem Schienen- oder dem Straßenverkehrslärm ausgesetzt, wobei diese in wöchentlichem Wechsel als Originalgeräusche bzw. nach Dämmung der tiefen Frequenzen präsentiert wurden. Die jeweils 4 aufeinander folgenden Nächte einer Woche (Montag Abend bis Freitag früh) bestanden aus einer randomisierten Sequenz, aus einer Ruhenacht und drei Lärmnächten mit variierenden akustischen Belastungen. In der ersten Woche war jeweils eine Gewöhnungsnacht vorgeschaltet. Das generelle experimentelle Design ergibt sich aus Abbildung 2.0-1. Einen groben Überblick über das Design der einzelnen Arbeitspakete präsentiert Tabelle 2.0-1. Die detaillierte Beschreibung erfolgt in den jeweiligen Arbeitspaketen.

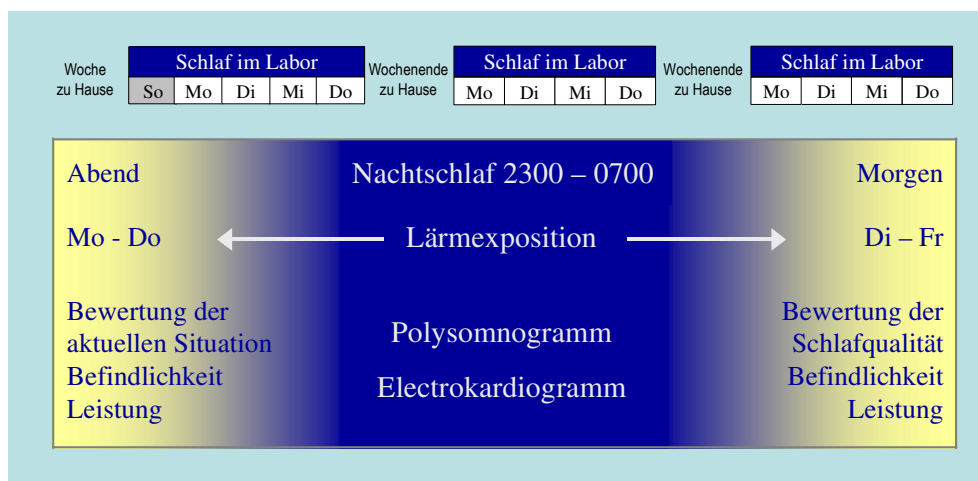


Abb. 2.0-1: Generelles experimentelles Design für alle 3 Arbeitspakete.



Tab. 2.0-1: Überblick über das Design der einzelnen Arbeitspakete

| <b>Überblick über das Design der einzelnen Untersuchungen</b>       |                       |   |                             |                           |  |            |             |    |
|---|-----------------------|---|-----------------------------|---------------------------|--|------------|-------------|----|
|   | Bettzeit<br>(Uhrzeit) | wöchentlich permutierte Geräuschquellen |                             |                           | Täglich randomisierte<br>Schallbelastung ( $L_{Aeq}$ , dB) |            |             |    |
| <b>Kontrollgruppe</b>   |                       |   |                             |                           |  |            |             |    |
| 8 Probanden   | 23 – 07               | kein Lärm                               | kein Lärm                   | kein Lärm                 | 32   |            |             |    |
| <b>Arbeitspaket 1 – Bewertung unterschiedlicher Geräuschquellen</b> |                       |   |                             |                           |  |            |             |    |
| 24 Probanden  | 23 – 07               | Luft-<br>verkehrslärm                   | Straßen-<br>verkehrslärm    | Schienen-<br>verkehrslärm | 32   | 39         | 44          | 50 |
| <b>Arbeitspaket 2 – Frequenzspektren</b>                            |                       |   |                             |                           |  |            |             |    |
| 8 Probanden   | 23 – 07               | Straßen-<br>verkehrslärm                | tiefe Frequenzen<br>gedämmt | 28                        | 39   | 44         | 50          |    |
| 8 Probanden   | 23 – 07               | Schienen-<br>verkehrslärm               | tiefe Frequenzen<br>gedämmt |                           |  |            |             |    |
| <b>Arbeitspaket 3 – Temporäre Verkehrsruhe</b>                      |                       |   |                             |                           |  |            |             |    |
| 8 Frühschläfer  | 22 – 06               | Straßen-<br>verkehrslärm                | Schienen-<br>verkehrslärm   | 28                        | Verkehrsruhe   |            |             |    |
| 8 Normschläfer  | 23 – 07               |   |                             |                           | 23–3<br>Uhr  | 3–7<br>Uhr | 23–5<br>Uhr |    |
| 8 Spätschläfer  | 00 – 08               |   |                             |                           |  |            |             |    |

*Gewöhnung.* Laborexperimentelle Untersuchungen zum Schlafverhalten zeigen in aller Regel Gewöhnungseffekte, die auf den einzelnen Wirkungsebenen unterschiedlich verlaufen. Die subjektive Bewertung habituier schneller als die elektrophysiologischen Indikatoren der Schlaftiefe, während evozierte Körperbewegungen und autonome Reaktionen weder im Verlauf einer noch im Verlauf mehrerer Nächte habituieren. Diesem Umstand wurde durch systematisch alternierende Bedingungen und systematisch permutierte Pegel Rechnung getragen.

### 2.0.3 Versuchsablauf

Die Probanden kamen ca. 2 Stunden vor dem Ins-Bettgehen ins Institut. Es wurden die Messfühler zur Ableitung des Polysomnogramms und des Elektrokardiogramms angelegt, Leistungstests durchgeführt und ein Fragebogen zur Einschätzung der aktuellen Situation ausgefüllt. Die Probanden verbrachten dann die in Tabelle 2.0-1 ausgewiesene Zeit, meist von 23.00 bis 07.00 Uhr, im Bett. Nach dem Aufstehen wurden mittels kurzer Fragebögen die qualitativen und quantitativen Parameter des Schlafs und des Befindens eingeschätzt und danach wiederum Leistungstests durchgeführt.

Die hier gewählten Schlafzeiten entsprechen dem durchschnittlichen Schlafverhalten der Bundesbürger, die um ca. 23 Uhr ins Bett gehen und um 7 Uhr aufstehen. Diese Schlafzeiten werden auch in den meisten Untersuchungen auf internationaler Ebene gewählt.

## 2.0.4 Applikation der unabhängigen Variablen

- **Akustische Belastung.** Während im Arbeitspaket 1 (AP1) die Wirkungen der von den drei wichtigsten Verkehrsträgern (Schiene, Straße, Luft) emittierten Geräusche auf den Schlaf miteinander verglichen wurden, berücksichtigen die Arbeitspakete 2 und 3 (AP2, AP3) ausschließlich die Wirkungen des Straßen- und des Schienenverkehrs. Die akustische Belastung ist in den einzelnen Arbeitspaketen spezifiziert.
- **Raumtemperatur.** Die Probanden schliefen in einzelnen schallisolierten Räumen, in denen die Raumtemperatur auf 20 °C eingeregelt war.

## 2.0.5 Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen

Zur Registrierung und Quantifizierung von Schlafstörungen stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung, deren Wahl sich an der Fragestellung und an der Geräuschsituation orientiert. In den hier durchgeführten Untersuchungen wurden während jeder Nacht bzw. am Vorabend und am folgenden Morgen die unten beschriebenen Variablen registriert. Datenerfassung, Datenstruktur und Datenanalyse erfolgten unter Berücksichtigung international anerkannter Kriterien.

### 2.0.5.1 Physiologische Variablen

- **Polysomnogramm.** Die Registrierung des Polysomnogramms erlaubt die differenzierteste Betrachtung lärmbedingter Schlafstörungen. Nur die gleichzeitige Aufzeichnung von Hirnstrombild (Elektroenzephalogramm, EEG), Augenbewegungen (Elektrookulogramm, EOG) und Muskelspannung (Elektromyogramm, EMG) gewährleistet eine valide und reliable Quantifizierung des Schlaf- und des Wachzustands sowie der einzelnen Schlafstufen und deren Verteilung. Das Verfahren ist personal-, zeit- und kostenintensiv, für Laborstudien jedoch unerlässlich. Es setzt eine aufwändige technische Ausstattung sowie entsprechend qualifiziertes Personal voraus.

**Anmerkung:** Die in einigen Untersuchungen favorisierte Betätigung eines **Aufwachsignals** indiziert zwar das Wachbewusstsein, ist jedoch problematisch, weil diese aktive Beteiligung des Probanden die Bedeutung externer Einwirkungen und damit die Aufweckwahrscheinlichkeit erhöht [Williams 1973]. Andererseits ist das Verfahren relativ unzuverlässig, da die Signalbetätigung häufig unterbleibt. Die Aufzeichnung von **Körperbewegungen** mittels eines am Handgelenk getragenen Aktimeters wurde in den letzten Jahren vor allem in Felduntersuchungen zunehmend eingesetzt, da dieses Verfahren nicht gewöhnungsfähig ist, von den Probanden leichter akzeptiert wird und die aufgezeichneten Daten leicht auszuwerten sind. Mit speziell entwickelten Algorithmen ermöglicht die Aktimetrie zwar eine hinreichend genaue Bestimmung der Einschlafzeit und des terminalen Erwachens, nicht aber – wie zunächst erwartet – des zyklischen Schlafablaufs [Conradt et al. 1997]. Auch die intermittierten Wachphasen werden nicht zuverlässig erfasst; die elektrophysiologisch bestimmten Wachzeiten sind zwar immer von motorischer Unruhe begleitet, weniger als die Hälfte aller Körperbewegungen aber mit Aufwachen verknüpft [Horne et al. 1994]. Die Aktimetrie stellt somit keine Alternative zur Registrierung des Polysomnogramms dar. Sie wurde hier aber eingesetzt, um die Schlaf-Wachzyklen an den Tagen vor der Laborphase und an den freien Tagen zwischen den jeweils 4 Labornächten zu kontrollieren.

Die elektrophysiologischen Parameter des Schlafs wurden nach den international anerkannten Kriterien von Rechtschaffen und Kales [1968] kontinuierlich über die gesamte Nacht mit einem im DLR entwickelten System registriert (siehe Abb. 2-2). Abgeleitet wurden jeweils 2 Elektroenzephalogramme (C3/C4 – A1), 2 Elektrookulogramme

(rechts etwas unterhalb, links etwas oberhalb des jeweils lateralen Augenwinkels – A1/A2), und ein Elektromyogramm (submandibulär – A1)

Das Polysomnogramm wurde, wiederum nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [1968] ausgewertet. Die Auswertung wurde von zwei erfahrenen Mitarbeitern mit einer exzellenten Interrater Reliabilität (> 90 %) vorgenommen [Danker-Hopfe et al. 2004]). Jeder beurteilte die Nächte von jeweils der Hälfte der insgesamt 72 Probanden, die entsprechend ihres Geschlechts und der Experimentalbedingungen ausbalanciert waren. Die Nächte jedes einzelnen Probanden wurden in zufälliger Folge ausgewertet.

Die Analyse der Daten erfolgte mit Hilfe eines Polygraphiesystems (Sagura Medizintechnik GmbH), das zunächst eine erste automatische Schlafstadienklassifikation aller 960 Epochen (fortlaufende 30-s-Abschnitte, in die das 8-stündige Polysomnogramm unterteilt wurde) durchführte. Bei hoher Qualität der Rohsignale stimmt diese recht gut mit der Analyse durch einen geschulten Auswerter hinsichtlich der Anteile der verschiedenen Schlafstadien an der gesamten Nacht überein. Zur Bestimmung akuter Änderungen des Hirnstrombildes auf einzelne Geräusche (ereigniskorrelierte Auswertung, Aufwachreaktion, Schlaftiefenwechsel etc.) war darüber hinaus eine differenzierte und zeitkorrekte Auswertung erforderlich. Deshalb war eine epochenweise Überarbeitung der automatischen Schlafstadienklassifikation unerlässlich, die je nach Signalqualität für die Aufzeichnung einer Nacht bis zu mehrere Stunden in Anspruch nahm.



Abb. 2.0-2: Registrierung des Polysomnogramms

Die aus dem Polysomnogramm abgeleiteten Parameter waren die Einschlafdauer (sleep onset latency, SOL), die Schlafperiode (Zeit zwischen Einschlafen und terminalem Aufwachen, sleep period time, SPT), die intermittierte Wachzeit (wakefulness after sleep onset, WASO), die (reine) Gesamtschlafzeit (total sleep time, TST = SPT –

WASO), der Schlafeffizienz Index (sleep efficiency index,  $SEI = TST / SPT$ ), die Zeit in den einzelnen Schlafstadien S0 (wach), S1, S2, S3 und S4 sowie REM (**R**apid **E**ye **M**ovement, Traumschlaf) bezogen auf die gesamte Schlafperiode (SPT) sowie auf den ersten Schlafzyklus. Weiterhin wurde ein im Rahmen dieses Vorhabens entwickelter Schlafstörungs-Index (SSI, siehe unten) berechnet.

Da die Schlafstadien S0 und S1 (Wach und Übergangsphase vom Wach zum Schlaf) jeweils in die gleiche Richtung reagierten, wurden diese zusammengefasst und als S0&1 behandelt. Das Schlafstadium S2, das üblicherweise etwa 50 % des Gesamtschlafs beträgt, blieb unverändert und wurde daher in den nachfolgenden Tabellen nicht aufgelistet, zumal eventuelle Änderungen ohnehin aus der Reduktion bzw. der Zunahme des Tiefschlafs bzw. der Zeit im Wach und in Stadium 1 resultieren. Entsprechend der bei einigen Probanden vernachlässigbar kurzen Zeit im Stadium S4 wurden die Stadien S3 und S4, wie in den meisten anderen Untersuchungen auch, zusammengefasst zum SWS (slow wave sleep, Tiefschlaf).

### **Schlafstörungs-Index (SSI)**

Der Schlafstörungsindex (SSI) wurde entwickelt, um eine physiologisch basierte Einschätzung der Schlafqualität zu ermöglichen. Dazu wurde mit sieben für die Bewertung des Schlafs entscheidenden, unten aufgelisteten Variablen eine Hauptkomponentenanalyse gerechnet:

- (1) Wachzeit (min) während der Schlafperiode (WASO, intermittierte Wachzeit)
- (2) Zeit (min) im Schlafstadium 1 während der Schlafperiode (S1)
- (3) Zeit (min) in Schlafstadien 3&4 während der Schlafperiode (SWS)
- (4) Zeit (min) im Schlafstadium REM während der Schlafperiode (REM)
- (5) Dauer (min) bis zum ersten Auftreten von Schlafstadium 1 (Latenz S1)
- (6) Dauer (min) bis zur ersten Tiefschlafepoche ab Latenz S1 (Latenz SWS)
- (7) Anzahl Wachphasen mit mehr als 3 min Dauer (Wach > 3min)

Zur Vermeidung linearer Abhängigkeiten zwischen den Variablen blieb das Schlafstadium 2 unberücksichtigt, zumal dessen Veränderungen kaum interpretierbar sind (s. o). Da die Berechnung der Hauptkomponenten auf den Produkt-Moment-Korrelationen zwischen den Variablen basiert, wurde durch Anwendung von Logarithmus-(log) oder Wurzel-Transformationen (SQRT) eine bessere Anpassung an eine Normalverteilung gewährleistet.

**Stichprobe:** Die Analyse basiert auf jeweils einer im Labor aufgezeichneten Nacht von 66 Probanden, während der keine externen Geräusche eingespielt worden waren. Vor dieser Nacht hatten die Probanden schon mindestens zwei Nächte im Labor geschlafen, so dass von einem weitgehend normalen Schlafverhalten auszugehen ist. Bedingung für die Aufnahme in diesen Datenpool war eine vollständige, nach Rechtschaffen und Kales [1968] durchgeführte Schlaftiefenklassifikation über die gesamte im Bett verbrachte Zeit von 480 Minuten.

57 dieser Nächte stammen von Probanden die im Rahmen dieses Projekts an den Untersuchungen im AP1 (Ruhennächte der 3. Woche) und AP2 (Ruhennächte der 2. Woche) beteiligt waren. Hinzu kam die dritte Nacht aus einer DFG geförderten Studie zur Schichtarbeit (N = 9).

**Ergebnisse:** Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse sind in Tabelle 2.0-2 dargestellt. Die 1. Hauptkomponente (HK) erklärte etwa 35 % der Varianz zwischen den Eingangsvariablen. Auch die Eigenwerte der 2. und 3. Hauptkomponente, die zusammen wiederum etwa 35 % Varianzanteil aufwiesen, waren > 1. Die anderen Komponenten erklärten weniger als jede einzelne Eingangsvariable (Eigenwerte < 1). Tiefschlaf- und REM-Anteil luden negativ auf die 1. Hauptkomponente, alle anderen Variablen wurden positiv gewichtet. Damit ließ sich die 1. Hauptkomponente als Indikator für einen 'gestörten Schlaf' interpretieren und wurde zur Berechnung des Schlafstörungs-Index (SSI) verwendet.

Tab. 2.0-2: Ergebnisse der Hauptkomponenten-Analyse mit Mittelwerten (AM) und Standardabweichungen (SD) der ggf. transformierten 7 Eingangsvariablen.

| <i>Eingangsvariable</i>        | <i>AM</i> | <i>SD</i> | <i>Gewichte (Scores) der Hauptkomponenten</i> |            |            |            |            |            |            |
|--------------------------------|-----------|-----------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                |           |           | <i>HK1</i>                                    | <i>HK2</i> | <i>HK3</i> | <i>HK4</i> | <i>HK5</i> | <i>HK6</i> | <i>HK7</i> |
| (1) log (WASO)                 | 3.267     | 0.462     | 0.326   | -0.311     | -0.196     | 0.005      | 0.274      | -0.049     | 1.539      |
| (2) SQRT (S1)                  | 4.277     | 1.292     | 0.110   | -0.109     | 0.599      | 0.653      | 0.530      | 0.081      | -0.204     |
| (3) SWS                        | 68.689    | 26.150    | -0.279  | -0.262     | 0.289      | -0.329     | 0.017      | 1.005      | 0.611      |
| (4) REM                        | 113.992   | 22.162    | -0.167  | 0.370      | -0.453     | 0.457      | 0.569      | 0.561      | 0.296      |
| (5) log (Latenz S1 + 0.5)      | 2.590     | 0.881     | 0.177   | 0.424      | 0.207      | -0.638     | 0.736      | 0.046      | -0.088     |
| (6) log (Latenz SWS + 0.5)     | 2.740     | 0.294     | 0.224   | 0.472      | 0.205      | 0.166      | -0.795     | 0.503      | 0.538      |
| (7) SQRT (Wach > 3min)         | 0.876     | 0.716     | 0.315   | -0.251     | -0.251     | -0.040     | -0.000     | 0.827      | -1.154     |
| <b>Eigenwerte</b>              |           |           | 2.469   | 1.282      | 1.200      | 0.847      | 0.540      | 0.440      | 0.222      |
| <b>erklärter Varianzanteil</b> |           |           | 0.353   | 0.183      | 0.171      | 0.121      | 0.077      | 0.063      | 0.032      |

**Anwendung:** Der Schlafstörungs-Index berechnet sich aus den (transformierten) Werten  $x_i$  der 7 oben aufgelisteten Eingangsvariablen, den Stichproben-Mittelwerten und -Standardabweichungen mit den Gewichten (Scores) der ersten Hauptkomponente als:

$$Index = \sum_{i=1}^7 HK1_i \times \frac{x_i - AM_i}{SD_i}$$

Der Index ist so standardisiert, dass der Mittelwert für die zugrunde liegende Stichprobe mit ungestörtem und angepasstem Laborschlaf den Wert 0 mit der Standardabweichung 1 aufweist. Positive Werte indizieren 'schlechteren', negative Werte 'besseren' Schlaf.

**Reliabilität:** Zur Prüfung des SSI wurden die gleichen Berechnungen auch für andere Datensätze durchgeführt, nämlich für die Gewöhnungsnächte (erste Labornächte, N = 63) sowie für sämtliche im Rahmen dieses Projekts aufgezeichneten Nächte mit vollständiger Schlafklassifikation über 480 Minuten (N = 722), für letztere ungeachtet der fehlenden Unabhängigkeit der Beobachtungen.

Auch hierbei wies die 1. Hauptkomponente eine ähnliche Struktur wie in den Ruhennächten auf und erklärte einen ähnlichen Varianzanteil (35-40 %). Tabelle 2.0-3 und Abbildung 2.0-3 vergleichen die für alle 722 Nächte berechneten verschiedenen Index-

Werte, die sehr hoch miteinander korrelierten ( $r > 0.98$ ). Konstruktionsbedingt lagen der aus der gleichen Stichprobe ermittelte Index-Mittelwert und die Standardabweichung bei 0 bzw. 1. Der auf den Gewöhnungsnächten basierende Index war im Mittel kleiner, der aus den Ruhenächten abgeleitete größer als 0, d.h. über alle Versuchsbedingungen betrachtet schliefen die Probanden in der Gewöhnungsnacht schlechter als in den Ruhenächten, was durchaus plausibel ist.

Tab. 2.0-3: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der für alle Nächte berechneten Index-Werte basierend auf unterschiedlichen Hauptkomponenten-Analysen.

| Scores für Index-Berechnung aus | N   | AM       | SD      | Minimum  | Maximum |
|---------------------------------|-----|----------|---------|----------|---------|
| allen 722 Nächten               | 722 | 0        | 1.00000 | -2.84186 | 4.16335 |
| allen 63 Gewöhnungsnächten      | 722 | -0.36450 | 0.89584 | -2.81628 | 3.35481 |
| allen 66 Ruhenächten            | 722 | 0.30458  | 1.21179 | -3.16623 | 5.40414 |

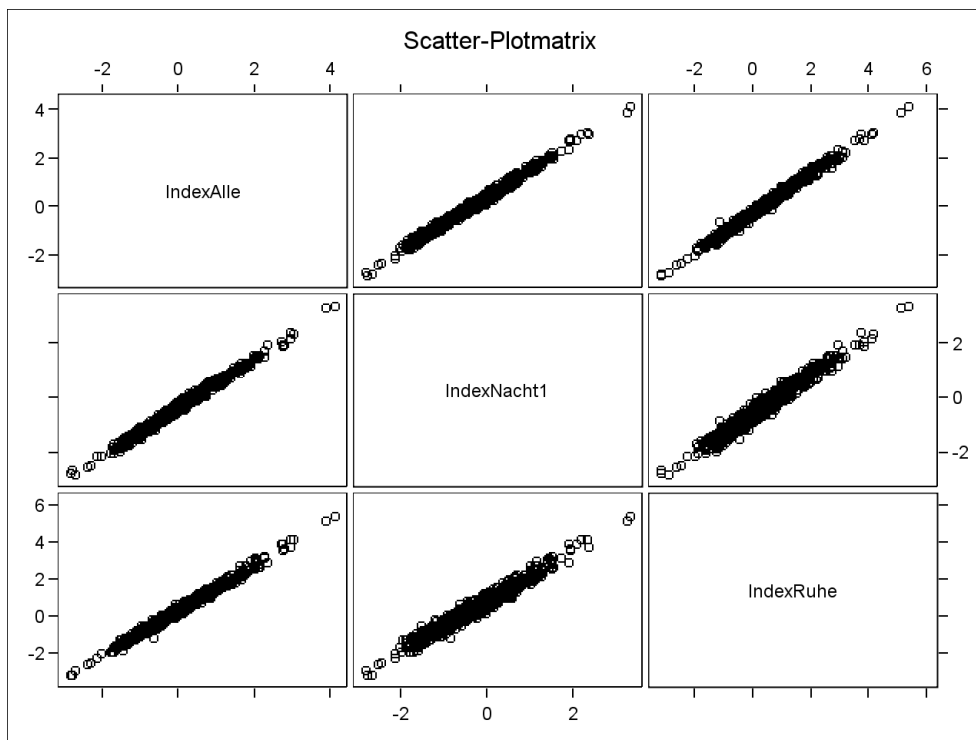


Abb. 2.0-3: Vergleich der für alle Nächte (N=722) berechneten Indexwerte basierend auf den Hauptkomponenten-Scores aus allen Nächten (IndexAlle), den Gewöhnungs- (IndexNacht1) und den Ruhenächten (IndexRuhe).

- **Ereigniskorrelierte Potenziale.** In den AP1 und AP2 wurden während der Ausübung der beiden Leistungstests am Morgen jeweils 3 EEGs mit der Position FZ (frontal), C3/C4 (zentral) und PZ (parietal) sowie die Augenbewegungen abgeleitet. Damit sollten die mit den Reaktionen ausgelösten ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) erstmals auch als eine mögliche Folge lärmbedingter Schlafstörungen untersucht werden.
- **Autonome Funktionsänderungen.** Lärm verursacht auch im Schlaf autonome Funktionsänderungen, die oberhalb einer Schwelle von 50-60 dB(A) unmittelbar nach Reizbeginn einsetzen und nur wenige Sekunden andauern. Sie sind nicht gewöhnungsfähig;

deren Häufigkeit und Ausmaß ändern sich weder im Laufe einer noch mehrerer Nächte und treten unvermindert auch bei langjährig exponierten Personen auf, weshalb sie von einigen Autoren als potenziell pathogen eingestuft werden [Carter 1998, Griefahn & Jansen 1975, Muzet et al. 1980, 1985; Nicolas et al. 1993, Whitehead & Hume 2001]. In den hier durchgeführten Untersuchungen wurde während der Nächte kontinuierlich das Elektrokardiogramm zur Berechnung der Herzschlagfrequenz registriert.

**Anmerkung:** Die in den letzten Jahren viel diskutierte durch Lärm erhöhte Produktion der mit dem Urin ausgeschiedenen Stresshormone (Cortisol, Adrenalin, Noradrenalin), hat sich als nicht zuverlässiger Indikator der Lärmbelastung erwiesen [Basner et al. 2004, Carter 1998, Maschke 2001]. Die Ursache mag darin liegen, dass keine Mehrproduktion erfolgt. Andererseits wäre der Anteil des Lärms an der Erhöhung kaum zu bestimmen, da während der Sammelperiode weitere Stressoren einwirken, die ausgeschiedenen Hormonmetaboliten also eine kumulative Reaktion des Organismus auf zahlreiche Reize darstellen. Auf die Bestimmung der Stresshormone wurde daher verzichtet, zumal die unter streng kontrollierten labor-experimentellen Bedingungen im DLR durchgeführten Untersuchungen bei 64 Probanden keine mit Lärm assoziierte vermehrte Ausscheidung von Stresshormonen ergab.

### 2.0.5.2 Subjektive Bewertung

Die subjektive Einschätzung des Schlafs, also eines bereits abgeschlossenen und in einem qualitativ anderen Bewusstsein verbrachten Zeitraums, ist nur indirekt anhand der erinnerten Anzahl, der Dauer und des Verlaufs bewusst erlebter Wachzeiten möglich und wird zudem durch das aktuelle Befinden zum Zeitpunkt der Einschätzung modifiziert [Fidell et al. 1994, Kawada et al. 1993, Öhrström & Rylander 1982]. Abgesehen von gelegentlich berichteten Diskrepanzen zwischen objektiv gemessenem Schlafablauf und subjektiver Bewertung können die meisten Menschen die Einschlafdauer, die intermittierten und terminalen Wachzeiten jedoch relativ gut einschätzen, die ihrerseits – zusammen mit eventuell erinnerten Schwierigkeiten beim (Wieder-)Einschlafen – die subjektiv empfundene Schlafqualität determinieren [Kawada et al. 1993, Öhrström 1995].

Die Probanden füllten vor dem Ins-Bettgehen und nach dem Aufwachen kurze Fragebögen aus, die alle wesentlichen, auch von anderen Untersuchern gestellten Kernfragen enthielten [z. B. Passchier-Vermeer et al. 2002]. Abgesehen von wenigen Modifikationen wurden die Fragebögen bereits in früheren Untersuchungen eingesetzt [u. a. Griefahn et al. 2000].

- Abends wurden die aktuelle Situation (Anspannung, Müdigkeit, gesundheitliches Befinden) erfragt und die mentale und physische Belastung während des Tages mittels Analogskalen eingeschätzt.
- Morgens schätzen die Probanden ihren Schlaf unter Verwendung von sechs 10-stufigen Skalen (von 0 – 10) ein. Sie wurden gebeten ('Bitte schätzen Sie ihren Schlaf ein'), die Schwierigkeiten beim Einschlafen (sehr leicht – sehr schwer), die Schlafruhe (sehr ruhig – sehr unruhig), die Schlaftiefe (sehr tief – sehr flach), die subjektive Schlafdauer (sehr lang – sehr kurz), die Erholung (sehr hoch – sehr gering) und die subjektiv empfundenen Körperbewegungen (sehr wenig – sehr viel) mittels dieser Skalen zu bewerten. Entsprechend einer Faktorenanalyse luden alle diese Skalen auf einem einzigen Faktor und wurden daher aufsummiert und von der maximal erreichbaren Anzahl subtrahiert (60) und das Ergebnis als 'Schlafqualität' bezeichnet. Eine weitere 10-stufige

Skala wurde zur Einschätzung der Müdigkeit (sehr wach – sehr müde) benutzt. Die Probanden gaben weiterhin an, ob und warum sie Einschlafschwierigkeiten hatten und wie oft und warum sie nachts aufgewacht waren.

### 2.0.5.3 Leistungsverhalten

In vielen Untersuchungen werden morgens, meist auch abends, Leistungstests durchgeführt. Dabei werden Wahlreaktionstests präferiert, die sowohl quantitative (Geschwindigkeit) als auch qualitative (Genauigkeit) Leistungsparameter erfassen. Die Ergebnisse sind allerdings kontrovers und die Effekte in der Regel gering [Griefahn et al. 2000, Jurriëns et al. 1983, Öhrström & Björkman 1988, Öhrström & Rylander 1990].

In den hier durchgeführten Untersuchungen wurden abends und morgens spezielle Leistungstests am PC durchgeführt, welche die gegenüber (partieller) Schlafdeprivation besonders empfindlichen 'exekutiven' oder 'frontalen' Funktionen beanspruchen.

*Go-/Nogo-Test.* In der einfachen Version dieses Tests werden die Wörter 'drück' und 'stopp' sowohl in Klein- als auch in Großbuchstaben in randomisierter Folge jeweils 60 Mal für 170 Millisekunden im Zentrum des Bildschirms präsentiert. Die Probanden hatten die Aufgabe, mit einem Tastendruck auf das Erscheinen des Wortes 'drück' bzw. 'DRÜCK' zu reagieren, nicht jedoch auf 'stopp' und 'STOPP'. In der komplexen Version dieses Tests erschienen die Wörter in wiederum randomisierter Folge nun aber jeweils 50 Mal, wobei die Probanden mit einem Tastendruck auf 'drück' und 'STOPP', nicht jedoch auf 'DRÜCK' und 'stopp' reagieren sollten. Das Interstimulus-Interval betrug bei beiden Testversionen 1 750 Millisekunden.

|              | Go-/Nogo<br>einfach | Go-/Nogo<br>komplex |                     |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>drück</b> | <b>x</b>            | <b>x</b>            | <b>kompatibel</b>   |
| <b>DRÜCK</b> | <b>x</b>            | -                   | <b>inkompatibel</b> |
| <b>stopp</b> | -                   | -                   | <b>kompatibel</b>   |
| <b>STOPP</b> | -                   | <b>x</b>            | <b>inkompatibel</b> |

x – Reaktion erforderlich

*Switch-Test.* Zweistellige Zahlen wurden für jeweils 170 Millisekunden im Uhrzeigersinn in den Ecken eines virtuellen Quadrats präsentiert, das den Mittelpunkt des Bildschirms umgab. Bei Zahlen, die oberhalb bzw. unterhalb der virtuellen horizontalen Mittellinie lagen, war die Position der geraden bzw. der größeren Ziffer mittels zweier entsprechend angeordneter Tasten anzugeben. Da die insgesamt 240 Zahlen im Uhrzeigersinn erschienen, konnten sich die Probanden auf die jeweils nachfolgende Aufgabe (non-switch/switch) einstellen. Das Reaktions-Stimulusinterval betrug jeweils 1 000 Millisekunden.

Für beide Tests wurde die quantitative (Reaktionszeit) und die qualitative Leistung (Fehlerraten) ermittelt. Für den Switch-Test wurden die Berechnungen getrennt für Non-Switch und für Switch-Aufgaben vorgenommen. Die Differenz beider ergab die Wechselkosten.



## 2.0.6 Auswertung / Statistik

Nach der Aufbereitung der Rohdaten (s. o.) berücksichtigte die Auswertung folgende Reaktionstypen:

- Akute Primärreaktionen beschreiben die Wirkung einzelner Geräusche und sind insbesondere für intermittierte Geräuschsituationen relevant. Es handelt sich um die Darstellung von Arousals und Schlafstadienwechseln bis hin zum Aufwachen sowie um Änderungen der Herzschlagfrequenz unmittelbar im Anschluss an einzelne Schallereignisse in Abhängigkeit von Geräuschart und Maximalpegel.
- Strukturelle Änderungen des Schlafablaufs wurden durch Änderungen der Gesamtschlafzeit, Anzahl, Dauer und Verteilung der einzelnen Schlafstadien, der Schlafstadienwechsel etc. beschrieben.
- Folgereaktionen oder Nachwirkungen, die im nachfolgenden Wachzustand zu beobachten sind und sich u. U. als Änderungen der Befindlichkeit und des Leistungsverhaltens manifestieren.

Der Einfluss der Geräuscharten und der Pegel sowie der Moderatoren auf diese Reaktionen wurde varianz- und regressionsanalytisch untersucht. Auf der Basis dieser Daten wurden in Kooperation mit dem DLR logistische Regressionen zur Prognose lärmbedingter Aufwachreaktionen errechnet. Mittels Hauptkomponentenanalyse wurde der SSI (Schlafstörungsindex) entwickelt.

Der Wilcoxon Test wurde für die Differenzen zwischen Ruhe- und Lärmnächten der Experimentalgruppe gerechnet, sowie für den Vergleich zwischen Experimental- und Kontrollgruppe. Der Friedmans Test sowie der Kruskal-Wallis Test und das Generalisierte Lineare Modell (GLM) wurden genutzt, um den Gesamteffekt zwischen Pegeln und Lärmarten (intraindividuelle Vergleiche) zu quantifizieren. Korrelationen zwischen physiologischen Schlafvariablen, subjektiver Bewertung und Leistungsdaten wurden mit linearen Regressionsmodellen gerechnet. P-Werte wurden als signifikant eingestuft, wenn sie den Wert von 0.05 nicht überschritten, p-Werte von maximal 0.10 wurden als Trend eingestuft. Alle Analysen wurden mit SAS 9 für Windows durchgeführt.

### **Ereigniskorrelierte Auswertung der Herzschlagfrequenzen**

Aus den in allen Nächten kontinuierlich aufgezeichneten EKGs wurden die Zeitpunkte jeder einzelnen R-Zacke mit einer Abtastrate von 256 Hz bestimmt. Da das Auswerteprogramm bei großen Körperbewegungen häufig versagte, wurden die Aufzeichnungen und Zeitmarkierungen visuell geprüft und bei erkennbaren R-Zacken entsprechend korrigiert. Momentane Herzschlagfrequenzen wurden aus den RR-Abständen errechnet, wobei Herzschlagfrequenzen oberhalb von 130 bzw. unterhalb von 35 Schlägen pro Minute als Datenlücke behandelt wurden.

Für die ereigniskorrelierte Auswertung wurden die resultierenden Datensätze mit den Dateien, die die Geräuschbeginne (N=33015) und die aus dem Polysomnogramm bestimmten Wachphasen enthielten, verknüpft. Für jedes einzelne Geräusch wurden die Zeitreihen der

Herzschlagfrequenzen mit kubischen Splines interpoliert und anschließend mit 2 Hz äquidistant über einen Zeitraum vom 20 s vor bis 60 s nach Geräuschbeginn abgetastet. Die Änderung der Herzschlagfrequenzen für den Zeitraum 10 s vor bis 60 s nach Geräuschbeginn ergab sich als Differenz der Herzschlagfrequenzen zu einem prästimulatorischen Mittelwert, der aus den Herzschlagfrequenzen 20 bis 10 s vor Geräuschbeginn berechnet wurde.

Wie bei ereigniskorrelierten Auswertungen zur Verminderung von Streuungseinflüssen üblich, wurden für jeden Probanden die Zeitverläufe je nach Fragestellung über die nachfolgend – mit ihren verschiedenen Ausprägungen – in Klammern aufgeführten Einflussfaktoren gemittelt:

- Lärminduzierte Aufwachreaktion (Ja/Nein)
- Lärmquelle (Luft, Schiene, Straße)
- Maximalpegel (3 Klassen: < 50, 50-60, > 60 dB(A))
- Schlaftiefe vor Geräuschbeginn (S2, SWS, REM)
- Versuchsdauer (Geräuschbeginn vor bzw. nach 4 Uhr (der Grenzwert wurde 1 h nach der chronologischen Mitte (3 Uhr) gewählt, da sich hiermit aufgrund der asymmetrischen Verteilung der Lärmereignisse über die Nacht annähernd gleich große Stichprobenumfänge für den ersten und zweiten Teil der Nacht ergaben).

Inferenzstatistische Auswertungen erfolgten für die über 5-s-Intervalle gemittelten Verläufe mit ANOVA für Messwiederholungen, die als lineare Modelle mit gemischten Effekten [Littell et al. 1996] mit unstrukturierter Kovarianzmatrix für die betrachteten Einflussfaktoren, sowie mit autoregressiver Struktur für den zeitlichen Verlauf berechnet wurden. Bei signifikanter Interaktion von zeitlichem Verlauf mit dem Einflussfaktor wurden mit nachgeschalteten F-Tests (sog. 'simple effects' [Winer 1970]) Zeitintervalle mit signifikant unterschiedlichen Werten für die Faktorausprägungen identifiziert.

Da die Änderung der Herzschlagfrequenzen deutlich vom Vorliegen einer lärminduzierten Aufwachreaktion abhing, erfolgten die Analysen bzgl. der Lärmquelle getrennt für Geräusche mit und ohne AWR, sowie bzgl. Maximalpegel, Schlaftiefe und Versuchsdauer getrennt nach Aufwachreaktion und Lärmquelle.

## Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war auf vier Jahre angelegt. Tabelle 2-4 stellt den zeitlichen Ablauf dar. Dieser wurde bezüglich der experimentellen Untersuchungen strikt eingehalten. Probleme ergaben sich jedoch, nachdem ein vollzeitlich beschäftigter Mitarbeiter Ende Januar (in der Tabelle durch einen Pfeil gekennzeichnet), das Institut verließ. Obwohl sofort um kostenneutrale Verlängerung gebeten wurde, wurde diese erst 14 Tage nach dem regulären Ablauf des Projekts gewährt.

Tab. 2.0-4: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

| Lfd Jahr  | 1    |   |   |   | 2    |   |   |   | 3    |   |   |   | 4    |   |   |   |      |  |  |
|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|--|--|
| Kalenderjahr  | 2002 |   |   |   | 2003 |   |   |   | 2004 |   |   |   | 2005 |   |   |   | 2006 |  |  |
| Quartal   | 4    | 1 | 2 | 3 | 4    | 1 | 2 | 3 | 4    | 1 | 2 | 3 | 4    | 1 | 2 | 3 |      |  |  |
| <b>Arbeitspaket 1 – Wirkungsäquivalente Bewertung unterschiedlicher Lärmquellen</b> |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Vorbereitung  | ■    | ■ | ■ |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Experimente   |      |   | ■ | ■ | ■    |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Auswertung  |      |   |   |   |      | ■ | ■ | ■ | ■    | ■ |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| <b>Arbeitspaket 2 – Frequenzspektren</b>  |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Vorbereitung  |      |   |   |   |      | ■ | ■ |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Experimente   |      |   |   |   |      |   | ■ | ■ | ■    |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Auswertung  |      |   |   |   |      |   |   |   |      | ■ | ■ | ■ | ■    | ■ |   |   |      |  |  |
| <b>Arbeitspaket 3 – Temporäre Verkehrsruhe</b>                                      |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Vorbereitung  |      |   |   |   |      |   |   |   | ■    |   |   |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Const Routine   |      |   |   |   |      |   |   |   |      | ■ | ■ |   |      |   |   |   |      |  |  |
| Experimente   |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   | ■ | ■ | ■    | ■ | ■ | ■ |      |  |  |
| Auswertung  |      |   |   |   |      |   |   |   |      |   |   |   |      | ■ | ■ | ■ |      |  |  |

### Kooperationen

Im Sinne kompatibler und generalisierbarer Ergebnisse erfolgten methodische Abstimmungen bezüglich der Aufzeichnung und Auswertung des Schlafs nach internationalen Kriterien mit dem DLR, das insbesondere die Wirkung von Fluglärm untersucht. Die Geräusche wurden im Rahmen der Einzelaufgabe 2011 (Koordination) in Absprache mit den weiteren Projektpartnern ausgewählt, die entsprechenden Geräusche und Szenarien wurden von SASS (Einzelaufgabe 2111) bereitgestellt. Die Beurteilung der Wirkung einzelner Frequenzspektren erfolgte in Kooperation mit den Projektpartnern, die die Sprachverständlichkeit und die kognitive Leistung, die Wirkung auf die Sprachkommunikation und die Wirkung kombinierter Lärmquellen untersuchten. Das Arbeitspaket 3 hat enge Beziehungen zur Feldstudie 2131, in der die Belästigung zu verschiedenen Tageszeiten analysiert wurde. Darüber hinaus bestanden enge Kooperationen auf internationaler Ebene [Muzet, Tassi/Frankreich, Ohrström/Schweden, Passchier-Vermeer/Niederlande].

## 2.1 Vergleichende Bewertung von Schienen-, Straßen- und Flugverkehrslärm und deren Wirkung auf das Schlafverhalten

### 2.1.1 Einleitung

Verkehrslärm ist in den letzten Jahrzehnten zu einer wesentlichen Ursache extrinsischer Schlafstörungen geworden. Die Beeinträchtigung der physischen und mentalen Erholung mit Nachwirkungen auf Befinden, Leistung und Gesundheit wird in den kommenden Jahren mit weiterhin ansteigendem Verkehrsaufkommen zunehmen. Verkehrliche Entlastungen sind dann aber nicht mehr allein durch Ausweichen in der Fläche möglich; es wird vielmehr zu zeitlichen Verlagerungen in die Randstunden und in die Nacht kommen, so dass die Lärmbelastung in der Nacht stärker als am Tage zunehmen wird.

Zur Vorhersage und Bewertung von Lärmwirkungen auf die betroffenen Anwohner werden u. a. der äquivalente Pegel ( $L_{Aeq}$ ), der LDN (day-night-level) oder der LDEN (day-evening-night-level) berechnet [EU 2002/49/EG]. Die Validität dieser integralen Maße bzw. das diesen zu Grunde liegende Konzept der Energieäquivalenz ist aber begrenzt, zumindest unter Berücksichtigung einer Meta-Analyse, die basierend auf 55 sozialwissenschaftlichen Untersuchungen mit insgesamt etwa 58 000 Interviews zeigt, dass Fluglärm am stärksten belästigt und Schienenverkehrslärm am wenigsten, wobei Straßenverkehrslärm eine intermediäre Position einnimmt (Abb. 2.1-1 [Miedema & Oudshoorn 2001, Miedema & Vos 1998]). Auf solchen Befunden basiert die in mehreren Ländern etablierte Bonus-Malus-Regelung, die an Bahntrassen einen höheren äquivalenten Pegel als an Straßen erlaubt. In der Bundesrepublik beträgt dieser Bonus 5 dB(A).

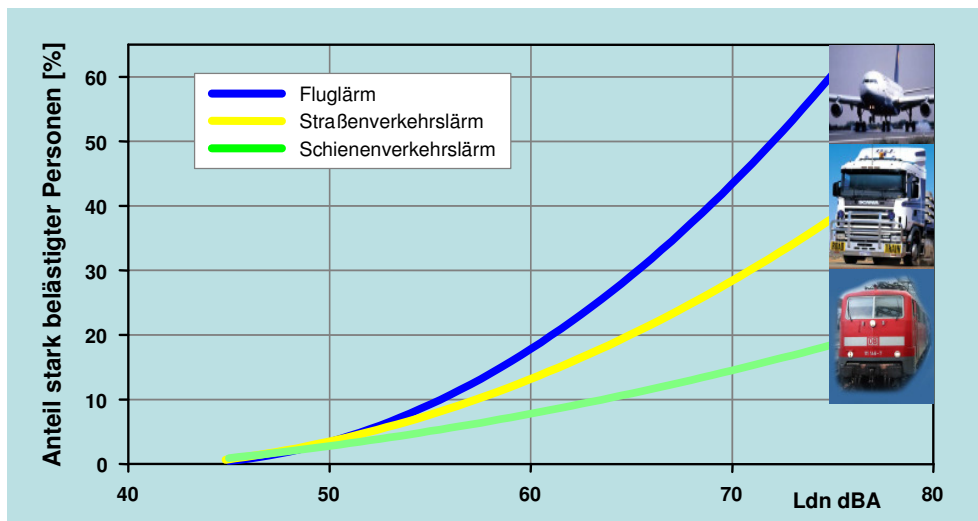


Abb. 2.1-1: Anteil stark belästigter Personen bezogen auf den DNL für Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärm nach einer Meta-Analyse von Miedema & Oudshoorn [2001].

Das Konzept der Energieäquivalenz wird insbesondere unter Schlafforschern diskutiert. Während die Wahrscheinlichkeit ereigniskorrelierter Aufwachreaktionen und Körperbewegungen deutlich mit dem Maximalpegel zunimmt, können integrale Maße die Wirkungen des vom Schienen-, Straßen- und Luftverkehr emittierten Lärms auf den Schlaf nicht

zufrieden stellend vorherzusagen [Basner et al. 2004, 2005, Griefahn et al. 2000, Passchier-Vermeer et al. 2002].

Da das Gehirn auch während des Schlafs Geräusche perzipieren, analysieren und adäquat beantworten kann, reagiert der Mensch auf für ihn bedeutsame Reize häufiger mit Aufwachen als auf neutrale Reize [Namba et al. 2004, Oswald et al. 1960]. Daraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass die Reaktion des Menschen auf Verkehrslärm während des Schlafs der Reaktion am Tage, d. h. der von diesen Geräuschen verursachten Belästigung entspricht.

Ziel dieser Untersuchung war es daher, diese Hypothese und damit die Anwendbarkeit des äquivalenten Pegels zur Vorhersage von Schlafstörungen zu überprüfen. Dazu wurde der Schlaf von 24 Probanden über einen Zeitraum von 3 aufeinander folgenden Wochen in jeweils 4 aufeinander folgenden Nächten im Labor registriert. Auf die Probanden wirkte in wöchentlich permutiertem Wechsel der von Luft-, Schienen- und Straßenverkehr emittierte Lärm mit jeweils gleichen äquivalenten Pegeln, gleichen Maximalpegeln und gleichem Pegelzeitverlauf über die Nacht ein. Als Indikatoren wurden physiologische und subjektive Daten sowie das Leistungsverhalten registriert.

## 2.1.2 Material und Methoden

*Probanden.* 32 gesunde Personen (16 Frauen, 16 Männer, 19-28 Jahre) nahmen an der Untersuchung teil. Sie kamen 9-11 Tage vor der Experimentalphase ins Labor. Sie wurden zunächst mit dem Ziel der Untersuchungen und mit dem Versuchsablauf vertraut gemacht und gaben sodann ihr schriftliches Einverständnis zu der von der Ethikkommission genehmigten Studie. Danach absolvierten sie eine Sitzung, in der sie die Leistungstests einübten.

*Design.* Nach einer Gewöhnungsnacht von Sonntag auf Montag schliefen die Probanden in drei aufeinander folgenden Wochen jeweils vier aufeinander folgende Nächte (Montagabend bis Freitag früh) im Labor. Die Kontrollgruppe (4 Frauen, 4 Männer) schlief in allen diesen Nächten unter Ruhebedingungen. Die Experimentalgruppe (12 Frauen, 12 Männer) schlief in wöchentlich permutiertem Wechsel unter der Einwirkung von Flug-, Schienen- bzw. Straßenverkehrslärm. In den vier Nächten jeder Woche schliefen die Probanden in randomisierter Folge eine Nacht ohne Lärmeinwirkung und drei Nächte mit Einwirkung von Verkehrslärm, dessen äquivalente Pegel variiert wurden (Abb. 2.1-2).

*Versuchsablauf.* Die Probanden kamen ca. 2 Stunden vor dem Ins-Bett-Gehen ins Institut. Hier wurden die Elektroden zur Registrierung des Polysomnogramms und des Elektrokardiogramms fixiert. Nach der Durchführung der Leistungstests (einfacher und komplexer Go-/Nogo-Test, Switch-Test) beurteilten sie mittels kurzer Fragebögen die aktuelle Situation und gingen dann ins Bett. Sie schliefen in separaten schallisolierten Räumen, in denen die Lufttemperatur auf 20 °C eingestellt war. Um 23 Uhr wurde das Licht gelöscht und die Schallapplikation sowie die Registrierung der physiologischen Daten gestartet. Nach dem Wecken um 7 Uhr beurteilten die Probanden die Schlafqualität und die Müdigkeit mittels kurzer Fragebögen geschätzt und danach wiederum die Leistungstests durchgeführt.

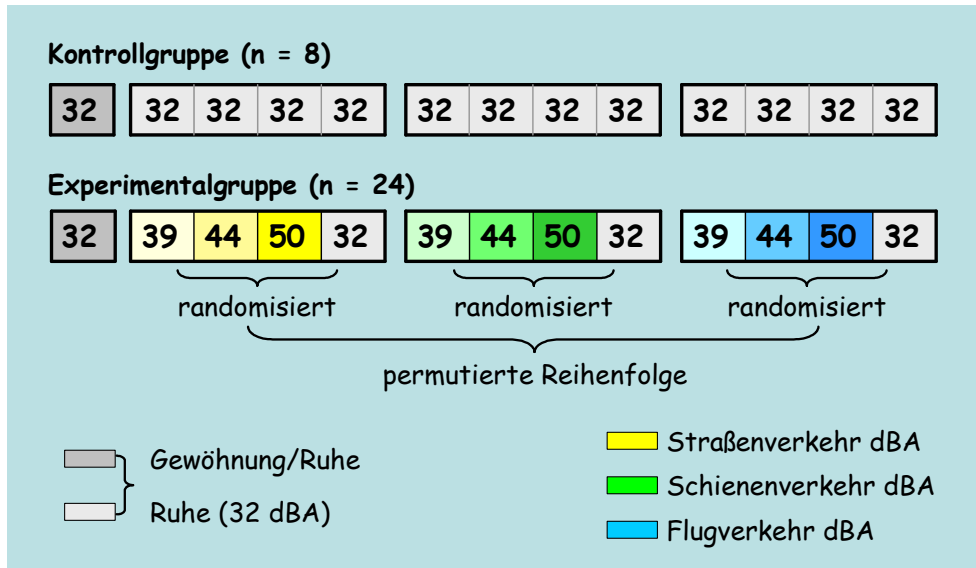


Abb. 2.1-2: Experimentelles Design zur Untersuchung unterschiedlicher Verkehrslärmarten

*Akustische Belastung.* Die Geräusche wurden über Lautsprecher in die Schlafräume abgestrahlt. Da die Wirkungen des Flug-, Straßen- und Schienenverkehrslärms auf der Basis des äquivalenten Pegels miteinander zu vergleichen waren, wurden andere akustische Parameter weitgehend konstant gehalten. Um zufällige z. B. von der Klimaanlage herrührende Geräusche zu maskieren, wurde in allen Ruhenächten ein Rosa Rauschen mit 32 dB(A) eingespielt. In den Lärmnächten wurde entweder Flug-, Schienen- oder Straßenverkehrslärm zugemischt, wobei 3 Belastungsstufen mit äquivalenten Pegeln ( $L_{Aeq}$ ) von 39, 44 und 50 dB bzw. mit Maximalpegeln ( $L_{Amax}$ ) von 50-62, 56-68 und 62-64 dB realisiert wurden (siehe Tabellen 2.1-1a und 2.1-1b). Alle drei Verkehrslärmarten wurden mit dem gleichen Pegelzeitverlauf, d. h. von 23 bis 1 Uhr mit abnehmender und von 4 bis 7 Uhr mit wieder ansteigender Verkehrsdichte appliziert (Abb. 2.1-3). Um diesen Pegelzeitverlauf zu erzielen, wurden Einzelszenarien für jeweils 30 Minuten entwickelt, die in den Tabellen 2.1-1a und 2.1-1b bezüglich der Anzahl, der Maximalpegel und der resultierenden äquivalenten Pegel sowie ihrer zeitlichen Anordnung spezifiziert sind. Da die äquivalenten Pegel (nicht jedoch die Maximalpegel) beim Schienenverkehr etwas höher waren, wurden einige zusätzliche Berechnungen vorgenommen (siehe unten).

Tab. 2.1-1a: Äquivalente Pegel und Maximalpegel des Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärms während der Experimentalnächte.

| Verkehrsart     | Ereignisse |           |               | Akustische Belastungen |                 |                     |                 |                     |                 |
|-----------------|------------|-----------|---------------|------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                 |            |           |               | Belastungsstufe 1      |                 | Belastungsstufe 2   |                 | Belastungsstufe 3   |                 |
|                 | Anzahl     | Dauer (s) | Intervall (s) | $L_{Aeq, 8 h}$ (dB)    | $L_{Amax}$ (dB) | $L_{Aeq, 8 h}$ (dB) | $L_{Amax}$ (dB) | $L_{Aeq, 8 h}$ (dB) | $L_{Amax}$ (dB) |
| Flugverkehr     | 195        | 7.6-59.0  | 27-326        | 38.9                   | 46.1-65.4       | 44.2                | 51.9-71.1       | 49.7                | 57.8-77.1       |
| Straßenverkehr  | 261        | 3.4-51.4  | 25-419        | 38.0                   | 46.1-59.7       | 43.0                | 51.9-65.9       | 49.6                | 58.3-74.0       |
| Schienenverkehr | 172        | 6.0-92.2  | 5-481         | 39.7                   | 45.3-62.3       | 44.4                | 51.0-67.8       | 50.3                | 57.6-74.1       |

Tab. 2.1-1b: Pegelzeitverlauf der äquivalenten Pegel und Maximalpegel während der Experimentalnächte.

| Zeitabschnitt (MEZ)         | Anzahl Ereignisse je 0.5 h | $L_{Aeq, 8h} = 38.0$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 43.0$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 49.6$ |            |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
|                             |                            | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ |
| <b>Straßenverkehrslärm</b>  |                            |                      |            |                      |            |                      |            |
| 0500 – 0700                 | 27                         | 41.5                 | 59.7       | 47.2                 | 65.9       | 54.4                 | 74.0       |
| 2300 – 2400, 0430 – 0500    | 19                         | 38.7                 | 58.6       | 43.9                 | 64.7       | 49.4                 | 69.5       |
| 2400 – 0100, 0400 – 0430    | 16                         | 34.4                 | 55.0       | 37.5                 | 60.8       | 42.4                 | 66.5       |
| 0100 – 0400                 | 8                          | 33.3                 | 46.1       | 34.7                 | 51.9       | 38.3                 | 58.3       |
| <b>Schienenverkehrslärm</b> |                            |                      |            |                      |            |                      |            |
|                             |                            | $L_{Aeq, 8h} = 39.7$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 44.4$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 50.3$ |            |
|                             |                            | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ |
| 0500 – 0700                 | 15                         | 44.2                 | 62.3       | 49.2                 | 67.8       | 55.3                 | 74.1       |
| 2300 – 2400, 0430 – 0500    | 13                         | 38.6                 | 61.6       | 43.8                 | 67.7       | 49.5                 | 73.7       |
| 2400 – 0100, 0400 – 0430    | 11                         | 34.8                 | 56.6       | 38.2                 | 61.1       | 43.1                 | 67.5       |
| 0100 – 0400                 | 05                         | 33.3                 | 45.3       | 35.0                 | 51.0       | 38.8                 | 57.6       |
| <b>Flugverkehrslärm</b>     |                            |                      |            |                      |            |                      |            |
|                             |                            | $L_{Aeq, 8h} = 38.9$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 44.2$ |            | $L_{Aeq, 8h} = 49.7$ |            |
|                             |                            | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ | $L_{Aeq, 0.5h}$      | $L_{Amax}$ |
| 0500 – 0700                 | 18                         | 43.1                 | 65.4       | 49.0                 | 71.1       | 54.6                 | 77.1       |
| 2300 – 2400, 0430 – 0500    | 16                         | 38.6                 | 62.0       | 43.7                 | 68.2       | 48.9                 | 72.1       |
| 2400 – 0100, 0400 – 0430    | 9                          | 33.9                 | 56.1       | 37.0                 | 62.0       | 42.5                 | 69.0       |
| 0100 – 0400                 | 8                          | 33.4                 | 46.1       | 35.2                 | 51.9       | 39.0                 | 57.8       |

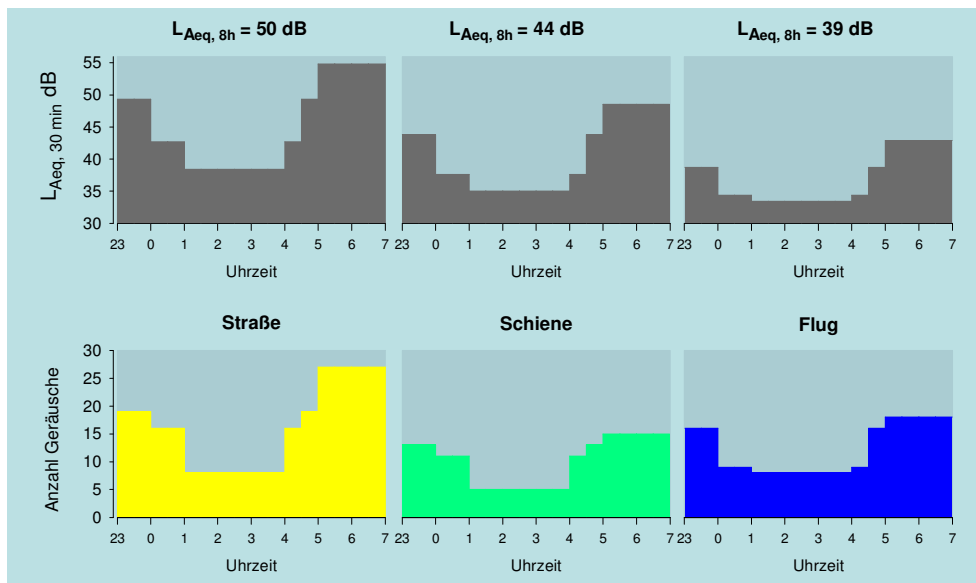


Abb. 2.1-3: Pegelzeitverlauf für den Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärm.

### Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen

Die Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen, des Polysomnogramms, der subjektiven Bewertung sowie der Leistungstests erfolgte nach dem in Kapitel 2.0.5 beschriebenen Vorgehen.

*Auswertung.* Das Polysomnogramm wurde nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [1968] ausgewertet und die Aufwachreaktionen ähnlich wie bei Basner et al. [2004]

bestimmt. Als Aufwachreaktion wurde jeder Übergang aus den Stadien S2, S3, S4 und REM zum Stadium Wach oder S1 gewertet. Als potenziell durch Lärm verursacht wurde dieser Übergang dann eingestuft, wenn er in eine von 2 aufeinander folgenden Epochen (Lärmfenster) fiel, und noch vor der Mitte der ersten Epoche ein Geräusch einsetzte. Da Wachphasen schon unter Ruhebedingungen relativ häufig auftreten, wurde geprüft, ob innerhalb der zeitlich den Lärmfenstern entsprechenden Perioden der Ruhenächte aufgewacht wurde. Durch Abzug dieser Wachphasen wurde die lärmbedingte Aufwachhäufigkeit ermittelt.

Die Aufwachhäufigkeit wurde mittels logistischer Funktionen dargestellt und der Einfluss physikalischer Geräuschparameter (Maximalpegel, Dauer, Pegelanstiegszeit, lärmfreie Intervalle) sowie individueller (Alter, Geschlecht, Lärmempfindlichkeit) und situativer Moderatoren (verstrichene Schlafzeit, Schlafstadium vor Reizbeginn) bestimmt.

### 2.1.3 Ergebnisse

*Kontroll- vs Experimentalgruppe.* Die während bzw. nach den drei Ruhenächten bei den Probanden der Experimentalgruppe aufgezeichneten Variablen unterschieden sich nicht von den entsprechenden Daten der Kontrollgruppe. Der inter-individuelle Vergleich zwischen den Ruhenächten der Kontrollgruppe und den Lärmnächten der Experimentalgruppe indizierte hingegen einen unter Lärmeinwirkung beeinträchtigten Schlaf. Statistisch signifikant war die Verkürzung der Gesamtschlafzeit (ohne intermittiertes Wach, 415.9 vs. 431.9 min,  $p = 0.03$ ), die Verlängerung der Tiefschlaf latenz (der Zeit zwischen Einschlafen und erstem Tiefschlaf, 22.4 vs. 14.6 min,  $p = 0.04$ ) sowie der ersten Tiefschlafphase (32.8 vs. 40.1 min,  $p = 0.09$ ). Die Schlafqualität wurde schlechter bewertet (31.9 vs. 38.1,  $p = 0.02$ ), während die Leistung keine Veränderungen zeigte.

#### 2.1.3.1 Lärmbedingtes Aufwachen, Ereigniskorrelierte Auswertung

Tabelle 2.1-2 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentualen, durch die einzelnen Geräuscharten verursachten Aufwachreaktionen. Demnach rief Schienenverkehrslärm deutlich häufiger Aufwachreaktionen hervor als Flug- und Straßenverkehrslärm.

Tabelle 2.1-3 zeigt den Einfluss physikalischer Parameter der Geräuscheinwirkung (Maximalpegel, Pegelanstiegszeit, Geräuschkdauer, lärmfreie Intervalle) sowie den Einfluss individueller (Alter, Lärmempfindlichkeit) und situativer Faktoren (verstrichene Schlafzeit, Tiefschlaf, REM-Schlaf). Alle in der Tabelle aufgeführten physikalischen Determinanten des Lärms haben, berechnet über alle Geräusche, einen signifikant moderierenden Effekt auf die Aufwachhäufigkeit. Die Aufwachhäufigkeit nahm mit der Dauer der einzelnen Geräusche zu, mit zunehmender Dauer der jeweils vorausgehenden lärmfreien Intervalle hingegen ab. Der Maximalpegel hatte zwar einen signifikanten Einfluss auf die Wirkung des Straßen- und des Schienenverkehrslärms, nicht jedoch auf die Wirkung der Überfliegergeräusche. Die Pegelanstiegszeit, d. h. die Zeitdauer bis zum Erreichen des Maximalpegels, moderierte die Reaktion auf Flug- und Schienenverkehrslärm, nicht aber auf Straßenverkehrs-



lärm. Die Reaktion war umso ausgeprägter je schneller der Maximalpegel erreicht worden war.

Obwohl das Alter der Probanden in engen Grenzen (19-28 Jahre) variierte, ergab sich, über alle Geräusche berechnet, eine signifikante Zunahme der Aufwachhäufigkeit mit dem Alter. Die Lärmempfindlichkeit beeinflusste die Aufwachhäufigkeit ebenso wenig wie das Geschlecht der Probanden (nicht in der Tabelle aufgeführt).

Unter den situativen Faktoren erwies sich die bis zum Eintreten eines Geräusches verstrichene Schlafzeit als hoch signifikant. Je später ein Geräusch einwirkt, desto wahrscheinlicher ist mit einer Aufwachreaktion zu rechnen. Die Aufwachhäufigkeit war bei allen Geräuscharten im Tiefschlaf am geringsten, wohingegen der REM-Schlaf bei keiner Geräuschart einen entsprechenden Einfluss hatte.

Abbildung 2.1-4 zeigt die Dosis-Wirkungsbeziehung, die – getrennt für die einzelnen Verkehrslärmarten – den Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel und dem Aufwachen beschreibt. Die resultierenden Kurven verlaufen weitgehend parallel, wobei die Kurve für den Schienenverkehrslärm deutlich über den dicht beieinander liegenden Kurven für Fluglärm und für Straßenverkehrslärm liegt.

Tab. 2.1-2: Prozentuale Aufwachhäufigkeit bei Schienen-, Straßen- und Luftverkehr. Mittelwert (AM), Standardabweichung (AM), Median, Minimum (Min) und Maximum (Max).

|                      | AM    | ± SD  | Median | (Min – Max)   |
|----------------------|-------|-------|--------|---------------|
| Fluglärm             | 8.87  | ±3.17 | 8.27   | (4.10 –19.08) |
| Straßenverkehrslärm  | 8.44  | ±3.50 | 8.06   | (4.14 –18.68) |
| Schienenverkehrslärm | 10.73 | ±3.47 | 10.41  | (5.78 –19.46) |
| Gesamt               | 9.20  | ±3.20 | 8.61   | (5.07 –19.01) |

Tab. 2.1-3: Logistische Regressionsanalysen der Aufwachwahrscheinlichkeit.  $\beta$  =  $\beta$ -Koeffizient; SE = Standard Fehler; p = p-Wert; \* =p<.05; \*\* =p<.01, \*\*\* =p<.001.

|                                | Straße  |      |     | Bahn    |      |     | Flug    |      |     | Total   |      |     |
|--------------------------------|---------|------|-----|---------|------|-----|---------|------|-----|---------|------|-----|
|                                | $\beta$ | SE   | p   | $\beta$ | SE   | p   | $\beta$ | SE   | p   | $\beta$ | SE   | p   |
| <b>Physikalische Parameter</b> |         |      |     |         |      |     |         |      |     |         |      |     |
| Maximalpegel                   | 0.03    | 0.00 | *** | 0.03    | 0.01 | *** | 0.02    | 0.01 |     | 0.03    | 0.00 | *** |
| Pegelanstiegszeit              | -0.03   | 0.02 |     | 0.12    | 0.02 | *** | 0.42    | 0.10 | *** | 0.02    | 0.01 | *   |
| Geräuschkdauer                 | 0.02    | 0.00 | *** | 0.01    | 0.00 | *** | 0.01    | 0.01 | *   | 0.01    | 0.00 | *** |
| Lärmfreies Intervall           | 0.10    | 0.02 | *** | 0.06    | 0.02 | **  | 0.12    | 0.03 | *** | 0.11    | 0.01 | *** |
| <b>Individuelle Parameter</b>  |         |      |     |         |      |     |         |      |     |         |      |     |
| Alter                          | 0.25    | 0.20 |     | 0.24    | 0.13 |     | 0.21    | 0.15 |     | 0.17    | 0.07 | **  |
| Lärmempfindlichkeit            | -0.01   | 0.00 |     | -0.01   | 0.01 |     | -0.00   | 0.00 |     | -0.00   | 0.00 |     |
| <b>Situative Parameter</b>     |         |      |     |         |      |     |         |      |     |         |      |     |
| Verstrichene Schlafzeit        | 0.00    | 0.00 | *** | 0.00    | 0.00 |     | 0.00    | 0.00 | **  | 0.00    | 0.00 | *** |
| SWS                            | -0.33   | 0.12 | *** | -0.57   | 0.13 | *** | -0.53   | 0.13 | *** | -0.46   | 0.07 | *** |
| REM Schlaf                     | -0.01   | 0.07 |     | -0.11   | 0.08 |     | 0.02    | 0.08 |     | -0.03   | 0.04 |     |

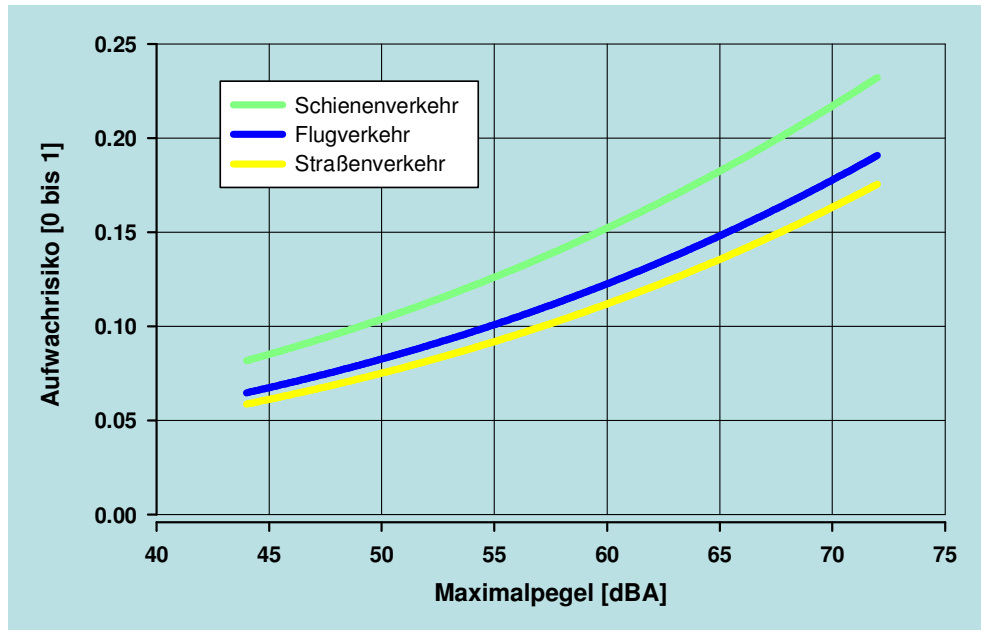


Abb. 2.1-4: Aufwachwahrscheinlichkeit durch einzelne Verkehrsgeräusche bezogen auf den Maximalpegel.

### 2.1.3.2 Änderung der Schlafstruktur, subjektive Schlafbewertung, Leistung

Tabelle 2.1-4 vergleicht intra-individuell die in bzw. nach allen Lärmnächten und den in bzw. nach allen Ruhenächten der Experimentalgruppe erhobenen Daten. Für die meisten Variablen ließen sich signifikante Unterschiede sichern. In den Lärmnächten war der

Tab. 2.1-4: Änderung der Schlafstruktur, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung, Vergleich zwischen 3 Ruhe- und 9 Lärmnächten. Mittelwerte (AM), Standardabweichung (SD) und p-Werte ( $p \leq 0.1$ : +,  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.; Wilcoxon Two-Sample Test).

| Abhängige Variablen                         | Ruhennächte |       | Lärmnächte |       | Lärm – Ruhe |       | Signifi-<br>kantz- |
|---|-------------|-------|------------|-------|-------------|-------|--------------------|
|   | AM          | ± SD  | AM         | ± SD  | AM          | ± SD  |                    |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b> |             |       |            |       |             |       |                    |
| <b>Schlafbeginn</b>                         |             |       |            |       |             |       |                    |
| Einschlaf latenz (SOL)                      | 21.8        | ±12.7 | 23.7       | ±11.0 | 1.9         | ± 7.9 | +                  |
| Tiefschlaf latenz (SWS-Latenz)              | 17.7        | ± 9.5 | 22.4       | ±15.2 | 4.7         | ±13.2 | ***                |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)                  | 9.2         | ± 8.2 | 13.0       | ±11.8 | 3.8         | ± 7.6 | **                 |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 35.7        | ±16.9 | 32.8       | ±14.3 | -2.9        | ± 8.6 | +                  |
| REM-Schlaf                                  | 11.4        | ± 4.3 | 12.5       | ± 3.9 | 1.1         | ± 3.9 |                    |
| <b>Gesamtschlaf</b>                         |             |       |            |       |             |       |                    |
| Schlafperiode (SPT)                         | 455.3       | ±19.6 | 454.6      | ±10.6 | -0.7        | ±16.6 |                    |
| Gesamtschlafzeit (TST)                      | 425.3       | ±23.5 | 415.9      | ±21.9 | -9.4        | ±15.6 | ***                |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)              | 30.0        | ±13.4 | 38.7       | ±16.2 | 8.7         | ±11.1 | ***                |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 73.3        | ±25.6 | 67.9       | ±26.2 | -5.3        | ±11.0 | *                  |
| REM-Schlaf                                  | 107.0       | ±14.2 | 100.6      | ±15.5 | -6.4        | ±11.8 | *                  |
| Schlafeffizienz-Index                       | 0.93        | ±0.03 | 0.91       | ±0.04 | -0.02       | ±0.02 | ***                |
| Schlafstörungs-Index                        | 0.03        | ±0.95 | 0.61       | ±1.10 | 0.58        | ±0.61 | ***                |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>           |             |       |            |       |             |       |                    |
| Subjektive Schlafqualität                   | 38.3        | ± 4.8 | 31.9       | ± 5.4 | -6.5        | ± 5.0 | ***                |
| Müdigkeit                                   | 4.3         | ± 1.8 | 5.0        | ± 1.5 | 0.8         | ± 1.1 | ***                |
| <b>Leistung</b>                             |             |       |            |       |             |       |                    |
| Non-switch (ms)                             | 365.4       | ±47.4 | 369.5      | ±47.7 | 4.1         | ±11.4 | +                  |
| Switch (ms)                                 | 370.6       | ±49.0 | 374.4      | ±50.4 | 3.8         | ±10.0 | +                  |

Schlafbeginn durch eine mäßig verlängerte Einschlaf latenz (1.9 min), eine signifikant verlängerte Tiefschlaf latenz (4.7 min), eine verlängerte Zeit in S0&1 (3.8 min) sowie durch eine verkürzte Tiefschlafzeit (-2.9 min) beeinträchtigt. Bezogen auf den Gesamtschlaf war die intermittierte Wachzeit (WASO) um 8.7 Minuten zu Lasten der Gesamtschlafzeit (TST, -9.4 min) verkürzt. Der Tiefschlaf und der Traumschlaf waren um 5.3 bzw. 6.4 Minuten verkürzt. Der Schlafeffizienz-Index war entsprechend reduziert und der Schlafstö rungs-Index signifikant erhöht. Die Probanden beurteilten ihre Schlafqualität schlechter, schätzten ihre Müdigkeit höher ein und arbeiteten im Switch-Test langsamer.

### Verkehrslärmart

Tabelle 2.1-5 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen der abhängigen Variablen für jede Geräuschart sowie die p-Werte für die Unterschiede zu den Ruhenächten. Abbildungen 2.1-5 und 2.1-6 geben die deutlichsten Änderungen bezogen auf den Schlafbeginn (bis zum Ende des 1. Schlafzyklus) und auf den Gesamtschlaf wieder. Aus der Tabelle und den Abbildungen wird deutlich, dass die meisten physiologischen Variablen am ausgeprägtes ten durch Schienenverkehrslärm und am wenigsten durch Straßenverkehrslärm beeinträch tigt waren.

Tab. 2.1-5: Änderungen der physiologischen Schlafstruktur, der subjektiven Schlafbewertung und der Leis tung, Vergleich mit den Ruhenächten (Q) und Angabe der kategorisierten p-Werte. Wilcoxon-Test, Fried mans Test : p ≤ 0.05: \*, p ≤ 0.01: \*\*, p ≤ 0.001: \*\*\*.

| Abhängige Variablen                         | Geräuschart     |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
|---|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-----|-------|
|   | Flugverkehr (A) |       | Straßenver-kehr (R) |       |       | Schienenver-kehr (T) |       |       |     |       |
|   | AM              | ± SD  | Q:A                 | AM    | ± SD  | Q:R                  | AM    | ± SD  | Q:T | A:R:T |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b> |                 |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
| <b>Schlafbeginn</b>                         |                 |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
| Einschlaf latenz (SOL)                      | 21.3            | ±7.7  |                     | 25.2  | ±14.3 |                      | 24.1  | ±17.0 |     |       |
| Tiefschlaf latenz (SWS-Latenz)              | 23.2            | ±19.3 | ***                 | 19.6  | ±13.6 |                      | 24.6  | ±16.4 | *** | *     |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)                  | 12.8            | ±12.6 | **                  | 9.8   | ±7.1  |                      | 16.3  | ±17.6 | *** | *     |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 33.5            | ±14.3 |                     | 39.9  | ±15.8 |                      | 29.1  | ±15.4 | **  | *     |
| REM-Schlaf                                  | 13.8            | ±6.3  |                     | 12.7  | ±5.1  |                      | 11.4  | ±4.8  |     |       |
| <b>Gesamtschlaf</b>                         |                 |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
| Schlafperiode (SPT)                         | 457.2           | ±7.7  |                     | 452.8 | ±14.3 |                      | 454.1 | ±16.6 |     |       |
| Gesamtschlafzeit (TST)                      | 418.8           | ±21.4 |                     | 416.6 | ±25.7 | **                   | 412.1 | ±31.3 | *** |       |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)              | 38.4            | ±19.0 | **                  | 36.2  | ±16.2 | **                   | 42.0  | ±21.7 | *** |       |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 70.8            | ±27.7 |                     | 68.7  | ±26.7 | *                    | 64.6  | ±26.5 | **  | **    |
| REM-Schlaf                                  | 101.4           | ±16.7 |                     | 103.1 | ±16.5 |                      | 97.5  | ±20.0 | **  |       |
| Schlafeffizienz-Index (SEI)                 | 0.93            | ±0.04 | **                  | 0.92  | ±0.04 | **                   | 0.91  | ±0.05 | *** |       |
| Schlafstö rungs-Index                       | 0.57            | ±1.05 | ***                 | 0.40  | ±1.11 | **                   | 0.84  | ±1.28 | *** |       |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>           |                 |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
| Subjektive Schlafqualität                   | 32.1            | ±6.2  | ***                 | 32.5  | ±7.1  | ***                  | 31.0  | ±5.5  | *** |       |
| Müdigkeit                                   | 5.0             | ±1.7  | *                   | 5.0   | ±1.8  | **                   | 5.1   | ±1.5  | *** |       |
| <b>Leistung</b>                             |                 |       |                     |       |       |                      |       |       |     |       |
| Non-switch                                  | (ms)            | 367.0 | ±46.2               | 372.8 | ±52.3 |                      | 368.7 | ±52.3 |     |       |
| Switch                                      | (ms)            | 372.1 | ±48.1               | 375.7 | ±54.2 |                      | 375.4 | ±56.7 |     |       |

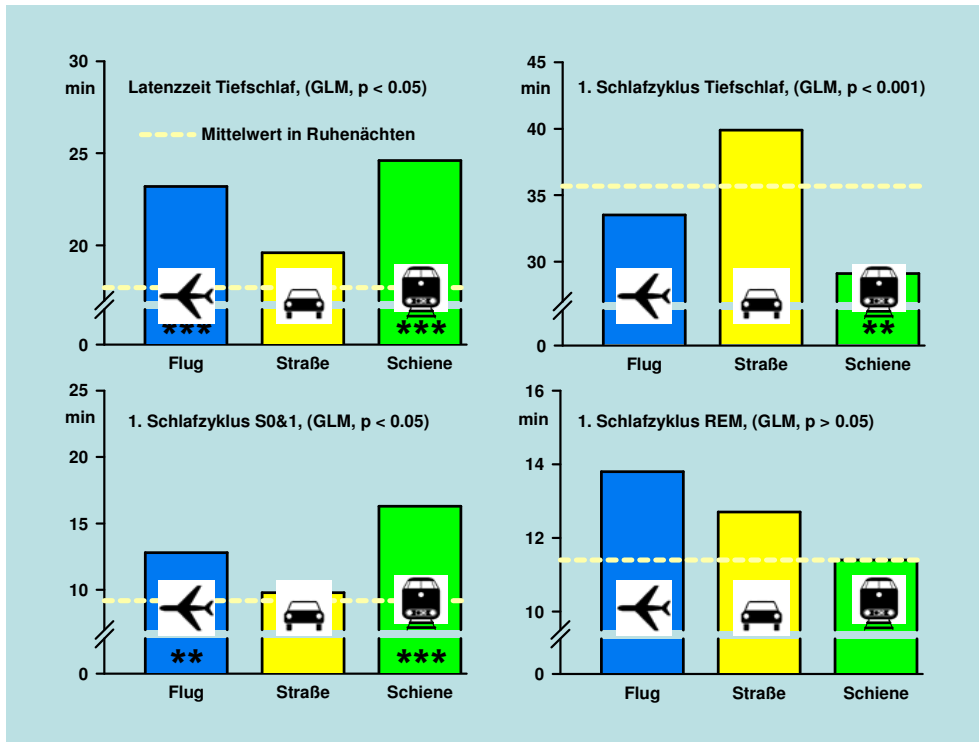


Abb. 2.1-5. Änderung ausgewählter physiologischer Parameter des Schlafbeginns in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

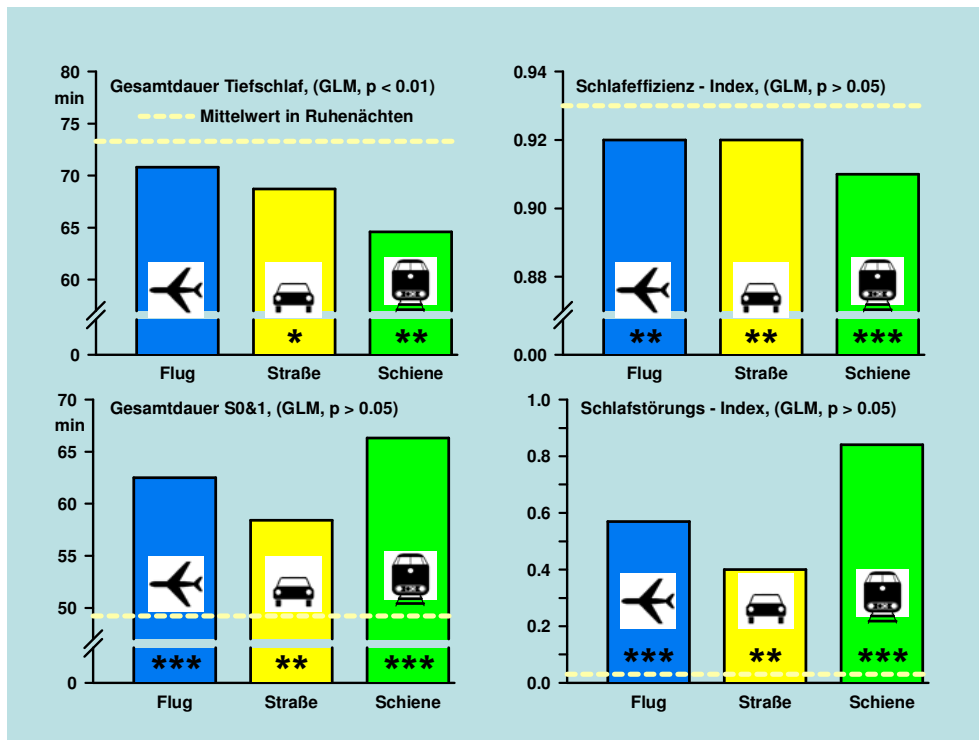


Abb. 2.1-6: Änderung ausgewählter physiologischer Parameter des Gesamtschlafs in Abhängigkeit von der Geräuschart gegenüber den Ruhenächten  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

Der Schlafbeginn war durch Straßenverkehr nicht verändert. Die Tiefschlaflatenz und die Zeit in S0&1 waren beim Flug- und beim Schienenverkehrslärm signifikant verlängert. Letzterer war zudem mit einer Verkürzung der Tiefschlafzeit assoziiert. Bezogen auf die bei keiner Geräuschart verkürzte Schlafperiode bewirkten alle Geräuscharten eine signifikante Verlängerung der intermittierten Wachzeit, einen Abfall des Schlafeffizienz-Index sowie einen Anstieg des Schlafstörungs-Index. Die Gesamtschlafzeit und die Tiefschlafzeit waren beim Straßen- und beim Schienenverkehrslärm, der REM-Schlaf nur beim Schienenverkehrslärm verkürzt.

Keine Unterschiede ergaben sich bezüglich der 'Nachwirkungen'. Alle drei Geräuschmodalitäten bewirkten eine signifikant schlechtere Beurteilung der Schlafqualität und eine erhöhte Müdigkeit. Die Leistung war nicht unterschiedlich beeinträchtigt.

Da der Schienenverkehrslärm etwas lauter als der Flug- und der Straßenverkehrslärm war (Tabelle 1-1a, 1-1b), wurden alle physiologischen und subjektiven Daten sowie die Leistung über die beiden niedrigeren Belastungsstufen des Schienenverkehrslärms gemittelt und mit den entsprechenden über die beiden höheren Belastungsstufen des Flug- und des Straßenverkehrslärms gemittelten Daten verglichen. Die Ergebnisse blieben stabil, indizierten also eine zweifelsfrei stärkere Reaktion auf Schienenverkehrslärm.

### Schallpegel

Tabelle 2.1-6 präsentiert Mittelwerte und Standardabweichungen für die in bzw. nach Lärmnächten ermittelten abhängigen Variablen für jede Belastungsstufe sowie die p-Werte für die Differenzen gegenüber den Ruhenächten. Die deutlichsten physiologischen Änderungen innerhalb der Schlafperiode sind in Abbildung 2.1-7 zusätzlich visualisiert.

Die den Schlafbeginn beschreibenden Parameter indizierten im Vergleich zu den Ruhenächten (Tab. 2.1-4) eine bereits unter Einwirkung der beiden niedrigeren Belastungsstufen mit  $L_{Aeq} = 39$  und  $44$  dB, wenn auch meist nicht signifikante Beeinträchtigung. Einschlaf- und Tiefschlaf latenzen waren, ebenso wie die Dauer in S0&1 verlängert, die Tiefschlafzeit war verkürzt. Unter der Einwirkung der höchsten akustischen Belastung mit  $L_{Aeq} = 50$  dB, ergaben bis auf die Einschlaf latenzen, alle anderen Parameter eine signifikante Störung.

Innerhalb der durch den Lärm nicht veränderten Schlafperiode, ergaben sich unter allen Belastungen signifikante strukturelle Änderungen des Schlafs. Abgesehen von der graduell mit Zunahme des äquivalenten Pegels verkürzten Zeit im Tief- und im REM-Schlaf fielen diese unter Einwirkung der beiden niedrigeren Pegelstufen nahezu gleich und unter Einwirkung von  $L_{Aeq} = 50$  dB deutlich höher aus. Signifikant war unter allen Belastungen die Verlängerung der intermittierten Wachzeit (WASO und S0&1) sowie die Zunahme des Schlafstörungs-Index. Der Schlafeffizienz-Index war signifikant nur in der niedrigsten und in der höchsten Belastungsstufe reduziert, die Gesamtschlafzeit war nur unter der höchsten Belastungsstufe verkürzt ( $L_{Aeq} = 50$  dB).

Abbildung 2.1-8 gibt die Schlafqualität, die Müdigkeit und die Reaktionszeit im Switch-Test wieder. Für diese nach den Lärmnächten erfassten Variablen ließ sich eine mit der Schallbelastung im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung zunehmende Beeinträchtigung

Tab. 2.1-6: Schlafstruktur, subjektive Bewertung des Schlags und Leistung in Abhängigkeit vom äquivalenten Pegel. P-Werte, gegenüber der Ruhenacht (Wilcoxon,  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*).

| Abhängige Variablen                         | Äquivalente Pegel |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
|---|-------------------|------------|-------------------|-------|-------------------|------|-------|------------|------|
|   | $L_{Aeq} = 39$ dB |            | $L_{Aeq} = 44$ dB |       | $L_{Aeq} = 50$ dB |      |       |            |      |
|   | AM                | $\pm$ SD   | Q:39              | AM    | $\pm$ SD          | Q:44 | AM    | $\pm$ SD   | Q:50 |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b> |                   |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
| <b>Schlafbeginn</b>                         |                   |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
| Einschlaflatenz (SOL)                       | 23.3              | $\pm 12.8$ |                   | 24.5  | $\pm 14.9$        |      | 23.5  | $\pm 12.1$ |      |
| Tiefschlaflatenz (SWS-Latenz)               | 22.5              | $\pm 17.0$ | *                 | 19.5  | $\pm 9.6$         |      | 24.6  | $\pm 22.4$ | ***  |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)                  | 14.3              | $\pm 19.8$ |                   | 10.6  | $\pm 8.4$         |      | 13.6  | $\pm 9.3$  | **   |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 34.0              | $\pm 14.8$ |                   | 33.8  | $\pm 14.8$        |      | 30.9  | $\pm 15.5$ | *    |
| REM-Schlaf                                  | 12.0              | $\pm 5.3$  |                   | 11.3  | $\pm 4.9$         |      | 13.9  | $\pm 5.0$  | *    |
| <b>Gesamtschlaf</b>                         |                   |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
| Schlafperiode (SPT)                         | 455.3             | $\pm 14.2$ |                   | 454.4 | $\pm 14.8$        |      | 455.0 | $\pm 12.0$ |      |
| Gesamtschlafzeit (TST)                      | 418.8             | $\pm 24.3$ |                   | 418.4 | $\pm 27.0$        |      | 413.2 | $\pm 25.8$ | **   |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)              | 36.5              | $\pm 17.1$ | **                | 36.0  | $\pm 17.8$        | *    | 41.7  | $\pm 20.2$ | ***  |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)                  | 58.4              | $\pm 24.5$ | **                | 59.4  | $\pm 23.3$        | **   | 66.5  | $\pm 22.4$ | ***  |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)                    | 69.6              | $\pm 29.1$ |                   | 68.0  | $\pm 26.0$        | *    | 66.0  | $\pm 26.1$ |      |
| REM-Schlaf                                  | 102.2             | $\pm 16.3$ |                   | 100.6 | $\pm 19.9$        |      | 99.4  | $\pm 16.9$ | **   |
| Schlafeffizienz-Index                       | 0.92              | $\pm 0.04$ | **                | 0.92  | $\pm 0.04$        |      | 0.91  | $\pm 0.05$ | ***  |
| Schlafstörungs-Index                        | 0.52              | $\pm 1.24$ | ***               | 0.44  | $\pm 1.27$        | **   | 0.80  | $\pm 1.11$ | ***  |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>           |                   |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
| Subjektive Schlafqualität                   | 34.4              | $\pm 6.6$  | ***               | 32.8  | $\pm 5.7$         | ***  | 28.5  | $\pm 6.8$  | ***  |
| Müdigkeit                                   | 4.5               | $\pm 1.6$  |                   | 5.0   | $\pm 1.7$         | ***  | 5.6   | $\pm 1.8$  | ***  |
| <b>Leistung</b>                             |                   |            |                   |       |                   |      |       |            |      |
| Non-switch (ms)                             | 366.7             | $\pm 50.0$ |                   | 369.6 | $\pm 47.2$        | *    | 372.2 | $\pm 47.7$ | **   |
| Switch (ms)                                 | 371.2             | $\pm 50.4$ |                   | 375.1 | $\pm 50.9$        |      | 376.9 | $\pm 51.9$ | **   |

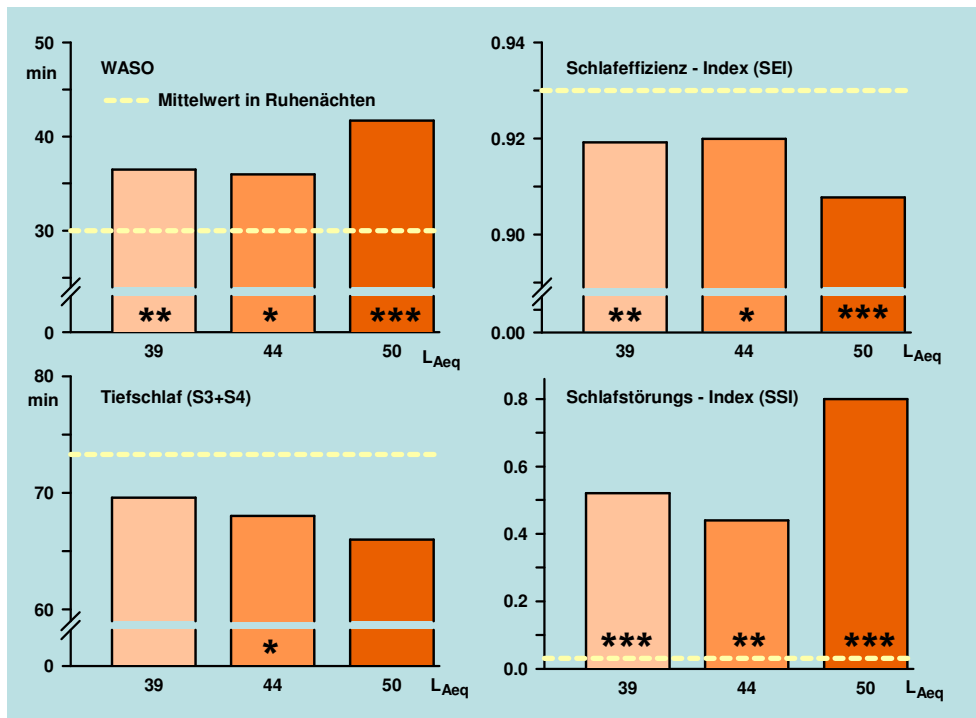


Abb. 2.1-7: Änderungen ausgewählter physiologischer Parameter in Abhängigkeit vom äquivalenten Pegel (24 Probanden; 19-28 Jahre); Wilcoxon-Test; Signifikanzniveau  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

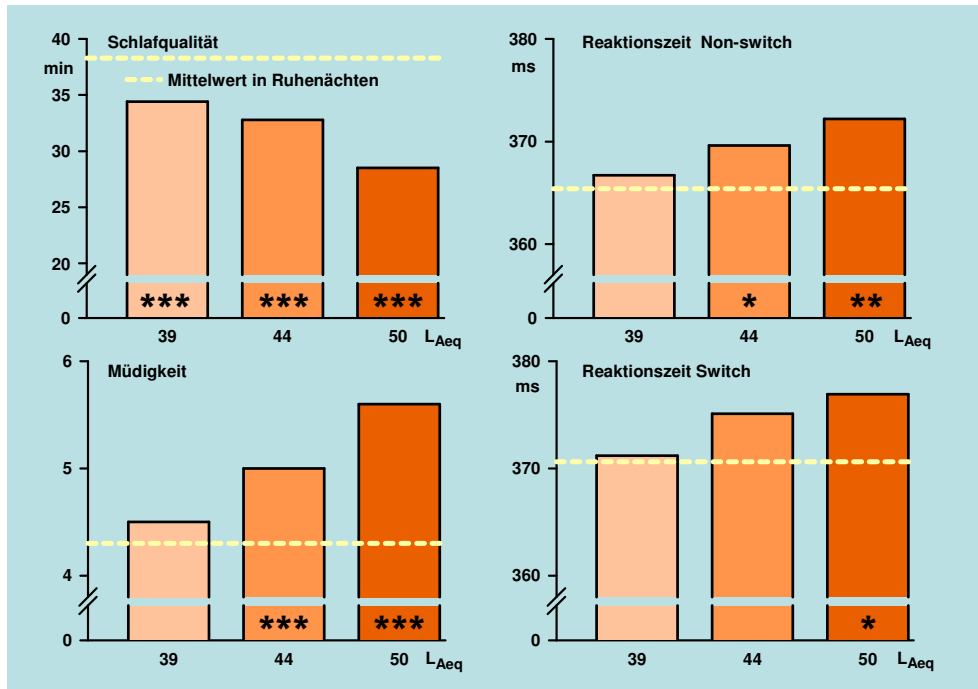


Abb. 2.1-8: Änderungen der subjektiven Schlafbewertung und der Reaktionszeit im Switch-Test bezogen auf die Ruhenächte, Wilcoxon-Test, Signifikanzniveau  $p \leq 0.05$ : \*,  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*.

sichern. Die Schlafqualität nahm mit zunehmendem Pegel ab, die selbst eingeschätzte Müdigkeit nahm zu und die Reaktionszeit im Switch-Test war sowohl bei Aufgabenwiederholungen als auch bei Aufgabenwechseln zunehmend verlängert.

**Korrelationen.** Tabelle 2.1-7 präsentiert die Korrelationen zwischen den physiologischen Parametern einerseits und der subjektiv bewerteten Schlafqualität bzw. der Leistung andererseits. Wegen der großen Anzahl der Daten (24 Probanden x 12 Nächte) wurde der p-

Tab. 2.1-7: Signifikante Korrelationskoeffizienten ( $p \leq 0.01$ ) für die Beziehung zwischen physiologischen Schlafparametern, subjektiver Schlafbewertung und Reaktionszeit im Switch-Test. (24 Probanden, 288 Nächte, Signifikanzniveau:  $p \leq 0.01$ : \*\*,  $p \leq 0.001$ : \*\*\*).

|                                       | Subjektive<br>Schlafqualität | Reaktionszeit<br>Switch | Reaktionszeit<br>Non-Switch |
|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| <b>Physiologische Schlafparameter</b> |                              |                         |                             |
| <b>Schlafbeginn</b>                   |                              |                         |                             |
| Einschlaflatenz (SOL)                 | -.23 ***                     |                         |                             |
| Tiefschlaflatenz (SWS-Latenz)         | -.31 ***                     | .29 **                  | .29 **                      |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)            | -.24 **                      | .28 **                  | .29 **                      |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)              |                              | -.33 **                 | -.33 **                     |
| <b>Gesamtschlaf</b>                   |                              |                         |                             |
| Schlafperiode (SPT)                   | .20 ***                      |                         |                             |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)        | -.21 ***                     |                         |                             |
| Gesamtschlafzeit (TST)                | .27 ***                      |                         |                             |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)            | -.29 **                      |                         |                             |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)              |                              | -.38 **                 | -.38 **                     |
| REM-Schlaf                            | .26 **                       |                         |                             |
| Schlafeffizienz-Index                 | .22 ***                      |                         |                             |
| Schlafstörungs-Index                  | -.29 ***                     | .26 ***                 | .26 ***                     |

Wert, von dem an Signifikanz anzunehmen ist, auf  $p < 0.01$  gesetzt. Die Schlafqualität war deutlich mit der Wachzeit assoziiert. Je höher die Einschlaf- und die Tiefschlaflatenz sowie die Zeit in S0&1 (bezogen auf erste Schlafperiode und auf den Gesamtschlaf) war, desto schlechter wurde die Schlafqualität bewertet. Die Reaktionszeiten im Switch-Test waren mit zunehmender Tiefschlaflatenz (also erschwertem Einschlafen) assoziiert, ebenso mit einer Zunahme der Zeit in S0&1 zu Beginn der Nacht und mit einer Verkürzung des Tiefschlafs sowohl zu Beginn als auch während der gesamten Schlafzeit.

## 2.1.4 Diskussion

### 2.1.4.1 Methodische Aspekte

*Polysomnographie.* Während der beiden letzten Dekaden wurden Schlafstörungen häufig durch Körperbewegungen (Aktimetrie) indiziert, da diese am Handgelenk getragenen und einer Armbanduhr ähnlichen Geräte von den Probanden ohne Weiteres akzeptiert werden, da die Bewegungen leichter aufzuzeichnen und leichter auszuwerten sind als das Polysomnogramm [Fidell et al. 1995, Griefahn et al. 2000, Ollerhead et al. 1992, Passchier-Vermeer et al. 2002]. Die Aktimetrie gibt jedoch keinerlei Information über die Schlaftiefe und kann Aufwachreaktionen nicht zuverlässig identifizieren. Deshalb wurde hier die Polysomnographie, also das Verfahren gewählt, mit dem Schlaf- und Wachzustand zuverlässig erkannt und Dauer und Verteilung der einzelnen Schlafstadien ermittelt werden können [Rechtschaffen & Kales 1968]. Das Verfahren ist international standardisiert, was den Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Untersuchungen ermöglicht.

*Subjektive Bewertung des Schlafs.* Die Fragebögen zur subjektiven Bewertung des Schlafs stellen ein sicherlich zuverlässiges Instrument dar. Die so ermittelte Schlafqualität bestätigt die von anderen Autoren [z. B. Kawada et al. 1993, Öhrström 1995] wiederholt beschriebenen Assoziationen mit der Einschlafatenz, der Gesamtschlafzeit, der Zeit in S0&1 und mit der Schwierigkeit einzuschlafen (hier indiziert durch die verlängerte Tieflatenz).

*Leistung.* Berichte über Leistungsbeeinträchtigungen im Anschluss an lärmbedingte Schlafstörungen sind kontrovers und werden nur von wenigen Autoren beschrieben [z. B. Kawada et al. 1993, LeVere et al. 1975, Öhrström 1995, Tulen et al. 1986]. Die meisten der bisher angewandten Tests (meist einfache oder Wahlreaktionstests) sind offensichtlich nicht empfindlich genug, um Leistungsbeeinträchtigungen durch mäßige Schlafstörungen, wie sie üblicherweise durch Lärm verursacht werden, aufzuzeigen [Arnberg et al. 1990, Basner et al. 2004, Griefahn et al. 2000, Passchier-Vermeer et al. 2002]. Die hier durchgeführte Untersuchung fokussierte deshalb auf die im Frontalhirn lokalisierten exekutiven Funktionen, die in einigen Untersuchungen schon durch partiellen Schlafentzug verändert waren [Heuer et al. 1998, Jones et al. 2001]. Tatsächlich nahmen die Reaktionszeiten sowohl für Aufgabenwiederholungen als auch für Aufgabenwechsel mit nächtlicher Schallbelastung zu. Die signifikante Korrelation zwischen der Dauer im Tiefschlaf mit der nächtlichen Schallbelastung einerseits und mit der Reaktionszeit andererseits legt ein Modell



nahe, demzufolge die Arbeitsgeschwindigkeit nach lärmgestörten Nächten kausal über die verkürzte Tiefschlafzeit mit der Einwirkung von Lärm verknüpft ist. Dies entspricht im Wesentlichen einer Untersuchung von Born und Plihal [2000], die eine Beeinträchtigung des deklarativen Gedächtnisses bei einer Reduktion des Tiefschlafs beobachtet hatten. Die hier ermittelten Ergebnisse indizieren eine hohe Empfindlichkeit exekutiver Funktionen selbst auf geringfügige Schlafstörungen [Jones et al. 2001].

#### **2.1.4.2 Lärmwirkungen allgemein**

Die hier ermittelten mit der Lärmeinwirkung assoziierten Änderungen des Schlafverhaltens, der subjektiven Schlafbewertung, der Leistung und der kardialen Funktion stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen anderer Studien überein.

*Aufwachen.* Die Aufwachhäufigkeit lag mit 8-11 % deutlich unter den von Basner et al. [2004] im Labor ermittelten Häufigkeiten, die exemplarisch in der Literaturübersicht in Abbildung 1-3 gezeigt sind. Eine Ursache hierfür ist sicherlich die Tatsache, dass an den Versuchen von Basner et al. [2004] auch ältere Personen teilgenommen hatten, die im Allgemeinen stärker auf nächtlichen Lärm reagieren. Zum Anderen waren die lärmfreien Intervalle zwischen den Schallereignissen in der Untersuchung von Basner et al. [2004] mit ca. 4 bis 120 Minuten deutlich länger als in der hier durchgeführten Studie, in der die Intervalle zwischen 5 Sekunden und 6 Minuten lagen, was – wie eine Metaanalyse belegt [Griefahn 1985] – mit einer höheren Reaktionsbereitschaft verbunden ist.

*Lärmbedingte Änderungen der Schlafstruktur.* Gehäufte lärmbedingte Aufwachreaktionen und Schlaftiefenänderungen bewirken letztlich strukturelle Änderungen des Schlafablaufs. Dementsprechend indizierten alle auf den Schlafbeginn und auf den Gesamtschlaf bezogenen Parameter eine Beeinträchtigung des Schlafs (siehe Tabelle 2.1-4). Eher selten wurde bisher eine gleichzeitige Verminderung von Tiefschlaf und von REM-Schlaf beobachtet. Meist war nur eines dieser beiden Schlafstadien verkürzt, der Tiefschlaf eher bei jüngeren, der REM-Schlaf eher bei älteren Personen [Eberhardt 1987, Griefahn 1985, Muzet et al. 1980]. Die Verkürzung beider Schlafstadien um insgesamt allerdings nur 12 Minuten ist wohl mit dem hier gewählten Verlauf der nächtlichen Schallbelastung zu erklären. Diese war, der Realsituation an Straßen und an vielen Flughäfen entsprechend, zu Beginn der Nacht, wo der Tiefschlaf vorherrscht, und am Ende der Nacht, wo der REM-Schlaf dominiert, deutlich höher als in der Mitte der Nacht.

#### **2.1.4.3 Einfluss der Geräuschart**

Die dieser Untersuchung zu Grunde liegende Hypothese basiert zum Einen auf wiederholten Beobachtungen, wonach der Mensch selbst während des Schlafs auf für ihn bedeutsame Geräusche stärker reagiert als auf neutrale Geräusche [Namba et al. 2004, Oswald et al. 1960] und zum anderen auf einer Metaanalyse, der zu Folge Fluglärm am stärksten belästigt und Schienenverkehrslärm am wenigsten [Miedema & Oudshoorn 2001, Miedema & Vos 1998]. Eine entsprechend differenzierte Reaktion war hier erwartet worden, nämlich die stärkste Reaktion auf Fluglärm und die geringste auf Schienenverkehrslärm. Diese

Hypothese bestätigte sich jedoch nicht. Während die Folgereaktionen, also die subjektive Bewertung des Schlafs und die Leistung, keine Unterschiede zwischen den drei Verkehrslärmarten ergaben, reagierten die physiologischen Variablen durchaus verschieden auf die drei Verkehrslärmarten. So führte Schienenverkehrslärm häufiger zum Aufwachen als Flug- und Straßenverkehrslärm und verursachte damit auch die ausgeprägtesten strukturellen Änderungen des Schlafablaufs. Dies war auch dann noch der Fall, wenn die beiden niedrigeren Pegelstufen des Schienenverkehrslärms mit den beiden höheren Belastungsstufen des Flug- und des Straßenverkehrslärms verglichen wurden. Schienenverkehrslärm verursachte weiterhin die stärksten Veränderungen der Herzschlagfrequenz (siehe Kap. 2.4).

Derzeit gibt es nur wenige Untersuchungen zur Wirkung unterschiedlicher Geräuscharten auf den Schlaf. Vernet [1979] führte eine Felduntersuchung durch, in der Straßenverkehrslärm – mutmaßlich wegen der größeren Anzahl an Ereignissen – bei gleichem äquivalentem Pegel stärkere Störungen hervorrief als Schienenverkehrslärm. In einer anderen Feldstudie wurden 377 Anwohner, die in ihrer Wohnumgebung sowohl Schienen- als auch Straßenverkehrslärm hören konnten, wobei aber eine Quelle dominierte, über 2 x 5 aufeinander folgende Nächte beobachtet. Doch weder die Körperbewegungen noch die subjektive Bewertung oder die Leistung ergaben unterschiedliche Reaktionen auf die zwei Geräuscharten, obwohl ausführliche Interviews der gleichen Personen einen deutlichen Bonus für die Schiene ergaben [Griefahn et al. 2000].

Schließlich ergaben eher begrenzte Laboruntersuchungen zur Frage ereigniskorrelierter Reaktionen die stärkste Reaktion auf Schienenverkehrslärm, selbst wenn deren Maximalpegel niedriger als die des Fluglärms waren [Muzet et al. 1985, Hofman et al. 1993].

Die stärkere Reaktion auf Schienenverkehrslärm ist im Wesentlichen wohl auf deren spezifische physikalische Parameter zurückzuführen. Einen signifikanten Einfluss auf die Aufwachhäufigkeit (und auf das Ausmaß der kardialen Reaktion, siehe Kap. 2.4) hat die Pegelanstiegszeit. Je kürzer diese ist, desto eher ist mit einer Aufwachreaktion zu rechnen und desto ausgeprägter ist die Beschleunigung der Herzschlagfrequenz.

Ein weiterer Faktor, der die stärkere Reaktion auf Schienenverkehrslärm begründet, ist die beim Schienenverkehr geringere Anzahl der Geräusche, bzw. – damit verbunden – die längeren, den einzelnen Geräuschen vorausgehenden lärmfreien Intervalle. Einige Autoren beschrieben zwar eine mit der Anzahl der Schallreize zunehmende Reaktion, fanden aber keinen linearen Zusammenhang. Der Anstieg wird vielmehr zunehmend kleiner, so dass ab einer gewissen Anzahl sogar mit einer Wiederabnahme der Häufigkeit und des Ausmaßes der Reaktion zu rechnen ist [Basner et al. 2004, Griefahn 1985, Griefahn et al. 1976]. Ursächlich hierfür ist die zum Zeitpunkt einer nachfolgenden Schalleinwirkung noch nicht vollständig abgeklungene durch den vorhergehenden Schallreiz ausgelöste Erregungszunahme.

Ein weiterer Faktor, der zu der starken Reaktion auf Schienenverkehrslärm beiträgt, ist zudem dessen gegenüber Flug- und Straßenverkehrslärm deutlich längere Dauer. Die Ma-

ximalpegel waren zwar bei allen Geräuschen gleich, wirkten beim Schienenverkehr jedoch deutlich länger auf die Probanden ein. Abgesehen davon kommen dadurch auch die charakteristischen zeitlichen Strukturen bzw. der damit verbundene Informationsgehalt zur Geltung, was die Reaktion durchaus verstärkt.

#### **2.1.4.4 Einfluss der akustischen Belastung, des Maximalpegels und der äquivalenten Pegel**

##### **Maximalpegel**

Die Aufwachhäufigkeit war, wie auch von anderen Autoren wiederholt beschrieben, bei allen Geräuscharten durch den Maximalpegel der einwirkenden Geräusche bestimmt [Basner et al. 2004, Ollerhead et al. 1992]. Die Abhängigkeit vom Maximalpegel war beim Fluglärm jedoch am geringsten, was – wie bereits ausgeführt – möglicherweise mit der relativ langen Pegelanstiegszeit und den früh einsetzenden Adaptationsmechanismen zu erklären ist.

##### **Äquivalenter Pegel**

Bezüglich der strukturellen Veränderungen des Schlafablaufs ergab sich eine graduell mit der Zunahme der akustischen Belastung abnehmende Zeit im Tiefschlaf und im REM-Schlaf. Die weiteren physiologischen Schlafparameter änderten sich nur mäßig und nahezu gleich auf die beiden niedrigeren Pegelstufen ( $L_{Aeq} = 39, 44$  dB) aber deutlich stärker auf die höchste Belastung mit  $L_{Aeq} = 50$  dB. Dies deutet darauf hin, dass integrale Lärmmaße zur Bewertung und zur Vorhersage von Schlafstörungen nicht geeignet sind, wohingegen ereigniskorrelierte Aufwachreaktionen und Körperbewegungen deutlich mit dem Maximalpegel ansteigen [Basner et al. 2004, Griefahn et al. 2000, Passchier-Vermeer et al. 2002].

Andererseits war die Zunahme des äquivalenten Pegels aber mit graduell verstärkten Folgereaktionen, einem zunehmenden Abfall der subjektiv bewerteten Schlafqualität, einer entsprechenden Zunahme der Müdigkeit und einer zunehmend verlängerten Reaktionszeit im Switch-Test assoziiert. Diese 'Nachwirkungen' lassen sich also offensichtlich durch den äquivalenten Pegel vorhersagen. Diese Schlussfolgerung stützt sich auf ausgedehnte Laborstudien, in denen die Reaktion auf unterschiedliche akustische Bedingungen untersucht [Maschke et al. 1995, Ohrström 1995, 2004] sowie auf Feldstudien, in denen die akustische Belastung abrupt geändert worden war (z. B. durch Schallschutzfenster, durch Installation von Straßentunneln oder Eröffnung neuer Verkehrswege wie Autobahnen oder Flughäfen [Eberhardt 1987, Griefahn 1985, Ohrström et al. 1998, Vallet et al. 1983]).

#### **2.1.5 Schlussfolgerung**

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden die Wirkungen der vom Schienen-, Straßen- und Flugverkehr emittierten Geräusche, die mit gleichen äquivalenten Pegeln, mit gleichen Maximalpegeln und gleichen Pegel-Zeitverläufen während der Nacht appliziert worden waren, miteinander verglichen.

Mit zunehmenden äquivalenten Pegeln ergaben sich allmählich zunehmende Änderungen der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung, wohingegen die physiologischen Variablen, abgesehen von der Tiefschlaf- und der Traumschlafzeit, nur mäßig auf die niedrigeren Pegelstufen, aber deutlich stärker auf den höchsten Lärmpegel reagierten. Daher scheint sich der äquivalente Pegel für die Bewertung der subjektiven Einschätzung des Schlafs, nicht aber für die physiologischen Schlafstörungen zu eignen.

Mehrere Länder erlauben an Bahnstrecken einen höheren äquivalenten Pegel als an Straßen. Dieser Bonus, der in der Bundesrepublik 5 dB(A) beträgt, basiert auf groß angelegten sozialwissenschaftlichen Untersuchungen, wonach Flugverkehrslärm am meisten und Schienenverkehrslärm am wenigsten belästigt, was am deutlichsten durch die Metaanalyse von Miedema und Mitarbeiter [Miedema & Oudshoorn 2001, Miedema & Vos 1998] zum Ausdruck kommt. Der 'Schienenbonus' wird darüber hinaus auch durch Untersuchungen von Hygge [2003] gestützt, der die Leistung während der Exposition gegenüber den auch hier angewandten drei Verkehrslärmarten mit ebenfalls gleichen äquivalenten Pegeln und gleichen Maximalpegeln untersuchte und die geringste Beeinträchtigung unter der Einwirkung von Schienenverkehrslärm fand. Die Ergebnisse der hier vorgelegten Untersuchung werfen die Frage auf, ob dieser Bonus auch für den erheblich vom Wachbewusstsein abweichenden Zustand des Schlafs gilt. Die Modifikation oder gar das Aussetzen des Schienenbonus wäre jedoch voreilig. Eine derart weit reichende Entscheidung erfordert die Bestätigung der hier erarbeiteten Ergebnisse auf der Basis unterschiedlicher und der Realsituation stärker angepasster Geräuschszenarien.

## 2.2 Dämmung tiefer Frequenzen (< 200 Hz) von Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen und deren Wirkung auf den Schlaf

### 2.2.1 Einleitung

Als niederfrequent werden Geräusche eingeordnet, in deren Frequenzspektrum die Frequenzen von 20-200 Hz dominieren [Persson-Waye 2006]. In einigen Untersuchungen werden hierzu auch Frequenzen bis 500 Hz gezählt. Auf deren besonderes Störpotenzial wird in den letzten Jahren wiederholt hingewiesen. Im häuslichen Bereich sind diese häufig durch Klimaanlagen, insbesondere durch Ventilatoren, sowie durch von außen eindringende Verkehrsgeräusche verursacht. Tiefe Frequenzen haben eine hohe Reichweite und passieren Wände und schalldämmende Fenster relativ leicht. Da deren Dämmung weit geringer als die der hohen Frequenzen ausfällt, dominieren sie häufig das Geräuschbild in (geschlossenen) Räumen. Dadurch bedingt muss, so ist zu vermuten, die Reduktion der Lärmwirkung deutlich geringer ausfallen als es der Reduktion der A-bewerteten Schallpegel z. B. durch schalldämmende Fenster entspricht [z. B. Griefahn 1985, Hofman et al. 1995].

Das hohe Störpotential tiefer Frequenzen lässt sich aus einigen wenigen Publikationen ableiten. So behindert tieffrequenter Verkehrslärm die Sprachkommunikation z. B. durch Maskierung der Konsonanten. Dies führt zu erhöhter Anspannung und Konzentration [Peters et al. 1998, Wood & Cowan 1995], es werden mentale Verarbeitungskapazitäten gebunden, was die Ressourcen für weitere kognitive Prozesse einschränkt und insbesondere das Arbeitsgedächtnis beeinträchtigt [Surprenant 1999]. Hinzu kommen physiologische Reaktionen mit u. U. vermehrter Ausschüttung von Stresshormonen [Bengtsson & Waye 2003, Osguthorpe & Mills 1982, Sloven 2003].

Dementsprechend sind auch Leistungsbeeinträchtigungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten, wie sie von Persson Waye et al. [1997] unter Einwirkung niederfrequenter Geräusche beobachtet und von den Probanden auch so empfunden wurden. Die wenigen Untersuchungen zum Leistungsverhalten unter Einwirkung tieffrequenter Geräusche sind insgesamt jedoch widersprüchlich und die beobachteten Leistungsbeeinträchtigungen insgesamt eher marginal [Bengtsson et al. 2004, Pawlaczyk-Luszczynska et al. 1974]. So fanden Key & Payne [1981] keine stärkere Beeinträchtigung durch niederfrequente Geräusche, während Benton & Leventhall [1986] über eine erhöhte Fehlerrate berichteten. Möglicherweise findet sich die Tendenz zu reduzierter Leistung aber nur bei Personen, die als besonders empfindlich gegenüber tiefen Frequenzen einzustufen sind.

Die Beeinträchtigung von Kommunikation und Leistung kann eine wesentliche Ursache der Belästigung sein, die bei Einwirken niederfrequenter Geräusche häufig größer als bei Einwirken höherer Frequenzen ist [Persson Waye 2006, Persson Waye & Agge 2005, Persson Waye & Rylander 2001]. So stuften Personen, die sich über solche Geräusche beschwert hatten, auch bei experimentell applizierten Schmalbandgeräuschen die niederfrequenten Geräusche eher als unerträglich ein [Broner & Leventhall 1984]. In einer anderen Untersuchung empfan-

den Personen, auf die niederfrequente Geräusche einwirkten, eine stärkere Beeinträchtigung ihres Konzentrationsvermögens als Personen, auf die Geräusche mit eher mittleren Frequenzen einwirkten [Persson Wayne & Rylander 2001].

Ein indirekter Hinweis auf die Bedeutung tiefer Frequenzen ergibt sich z. B. auch aus der zunehmenden Störbarkeit älterer Menschen, deren Hörverlust vor allem die mittleren und höheren Frequenzen betrifft, während die Perzeption tiefer Frequenzen weitgehend erhalten bleibt.

Richtlinien der WHO empfehlen daher, die Emissionsgrenzen für Geräusche mit vorwiegend niedrigen Frequenzen weiter abzusenken [Berglund et al. 1999]. Es besteht also Grund zur Annahme, dass die gezielte Dämmung tiefer Frequenzen eine deutliche Entlastung auf mehreren Ebenen, der Kommunikation, der Leistung und des Befindens bewirkt.

Tieffrequente Geräusche verursachen mutmaßlich auch stärkere Störungen des Schlafs als höherfrequente Geräusche. Darauf weisen bereits Untersuchungen aus den 60er und den 70er Jahren hin. So riefen vor allem kurz dauernde tieffrequente Schalle (< 100 Hz) mit kurzer Pegelanstiegszeit (1 ms) K-Komplexe im Schlafstadium S2 [Vetter & Horvath 1962] und bei Neugeborenen elektromyographische Reaktionen hervor [Hutt et al. 1968].

Keine bedeutsamen Störungen der Schlaffeffizienz fanden hingegen Inaba und Okada [1988], die einzelne Frequenzen im Bereich von 10 und 63 Hz mit 50 bis 105 dB SPL im Abstand von jeweils 20 Minuten mit einer Dauer von 30 Sekunden einwirken ließen.

Experimentelle Untersuchungen, in denen Terzbandgeräusche mit jeweils gleichem Maximalpegel, aber unterschiedlichen Mittenfrequenzen (50, 125, 250, 1000 Hz) appliziert wurden, ergaben eine replizierbare inverse Beziehung zwischen dem Ausmaß der polysomnografisch diagnostizierten Schlafstörungen und der Mittenfrequenz [LeVere et al. 1973, 1974]. Auf die besondere Wirksamkeit niederfrequenter Geräusche weist auch eine Feldstudie hin, in der die nächtliche Kortisolausscheidung besser mit dem C- als mit dem A-bewerteten Pegel korrelierte [Ising & Ising 2000]. Demgegenüber reagierten in einer ruhigen Umgebung wohnende Erwachsene, die sowohl dem Straßenverkehr, einem tieffrequenten Ventilationsgeräusch und der Kombination beider Geräusche ausgesetzt waren [Öhrstöm & Skånberg 2004], auf den Straßenverkehrslärm weniger, wenn ein Ventilationsgeräusch zugemischt wurde, da dieses einen eher nivellierenden Effekt hatte.

Basierend auf diesen Berichten war zu erwarten, dass die vom Schienen- wie von Straßenverkehr emittierten Geräusche nach der Dämmung tiefer Frequenzen deutlich geringere Schlafstörungen verursachen. Zur Prüfung dieser Hypothese wurden 16 Probanden untersucht, von denen jeweils die Hälfte dem Schienen- bzw. dem Straßenverkehrslärm ausgesetzt war. In systematischem wöchentlichen Wechsel wirkten die Originalgeräusche und deren im Bereich < 200 Hz um 12 dB gedämmten Derivate auf die Probanden ein.

## **2.2.2 Material und Methoden**

*Probanden.* 16 gesunde Personen (8 Frauen, 8 Männer, 20-28 Jahre,  $23.6 \pm 2.3$  Jahre) nahmen an den Versuchen teil. Sie kamen 9 bis 11 Tage vor der Experimentalphase ins Labor; sie

wurden mit dem Versuchsablauf vertraut gemacht und absolvierten eine Sitzung, in der sie die Leistungstests einübten.

*Design.* Nach einer Gewöhnungsnacht von Sonntag auf Montag schliefen die Probanden in zwei aufeinander folgenden Wochen jeweils vier aufeinander folgende Nächte, von Montagabend bis Freitagmorgen im Labor. Jeweils acht Probanden schliefen unter der Einwirkung von Schienen-, bzw. Straßenverkehrslärm. In systematischem Wechsel wurden in der ersten bzw. in der zweiten Woche die Originalgeräusche bzw. deren im niederfrequenten Bereich gedämmte Derivate appliziert. In den vier Nächten jeder Woche wurden in randomisierter Folge kein Lärm (Ruhenacht) sowie Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche mit äquivalenten Pegeln von 39, 44 und 50 dB(A) appliziert (siehe Abb. 2.2-1).

*Versuchsablauf.* Der für alle Arbeitspakete identische Versuchsablauf ist in Kap. 2.0.3 ausführlich beschrieben.

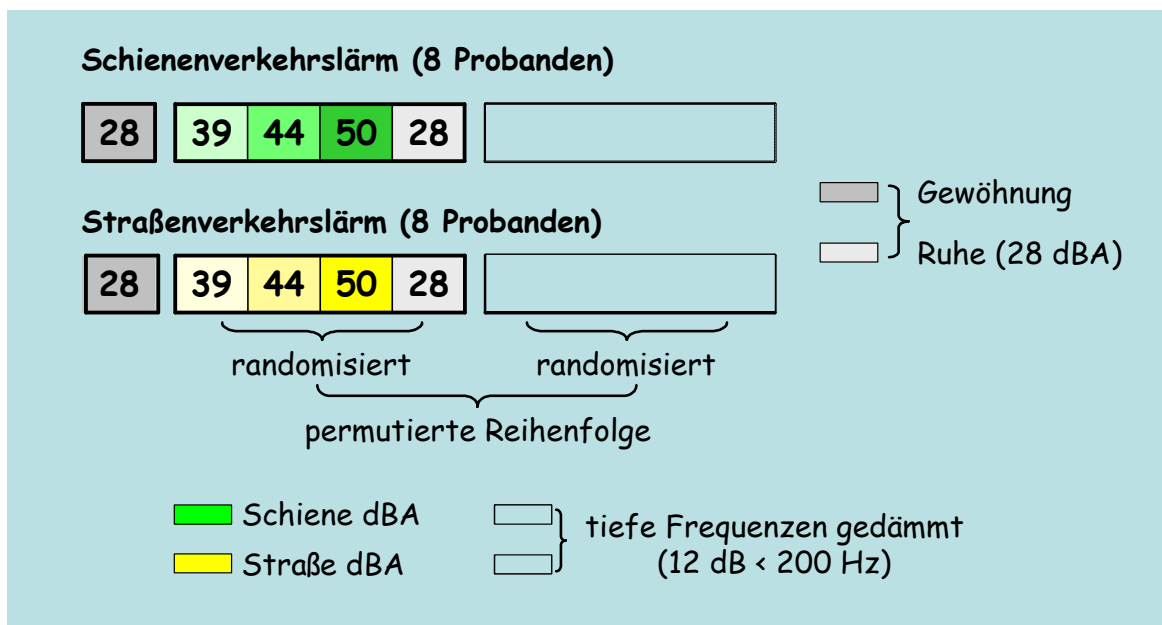


Abb. 2.2-1: Experimentelles Design zur Untersuchung der Wirkung frequenzgedämpfter Geräusche.

*Akustische Belastung.* Es wurden die gleichen Geräusche wie im Arbeitspaket 1 (Kap 2.1) appliziert. Die Maximalpegel, die äquivalenten Pegel und die Abfolge waren identisch. Der Grundpegel war jedoch um 4 dB, auf 28 dB(A) gesenkt worden. In systematischem, wöchentlichem Wechsel wurden die Originalgeräusche bzw. deren frequenzgedämmte Derivate appliziert. Sowohl die Schienen- als auch die Straßenverkehrsgeräusche waren im Frequenzbereich < 200 Hz um 12 dB gedämmt worden. Beispiele der Amplitudenspektren zeigen die Abbildungen 2.2-2 und 2.2-3.

### Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen

Die Aufzeichnung und Auswertung der abhängigen Variablen, des Polysomnogramms, der subjektiven Bewertung sowie der Leistungstests erfolgte nach dem in Kapitel 2.0 beschriebenen Vorgehen.

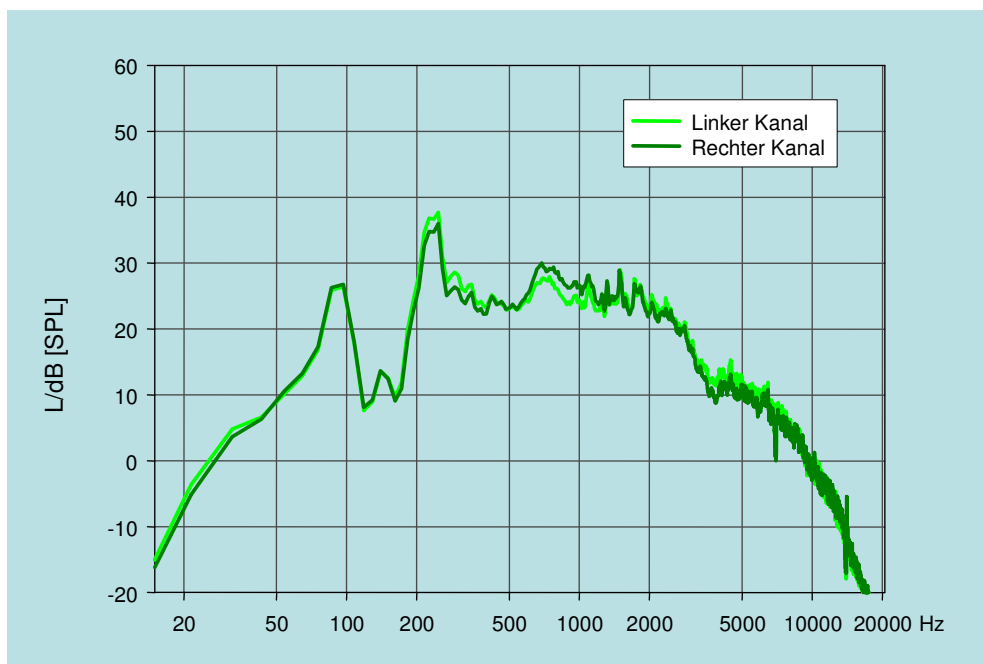
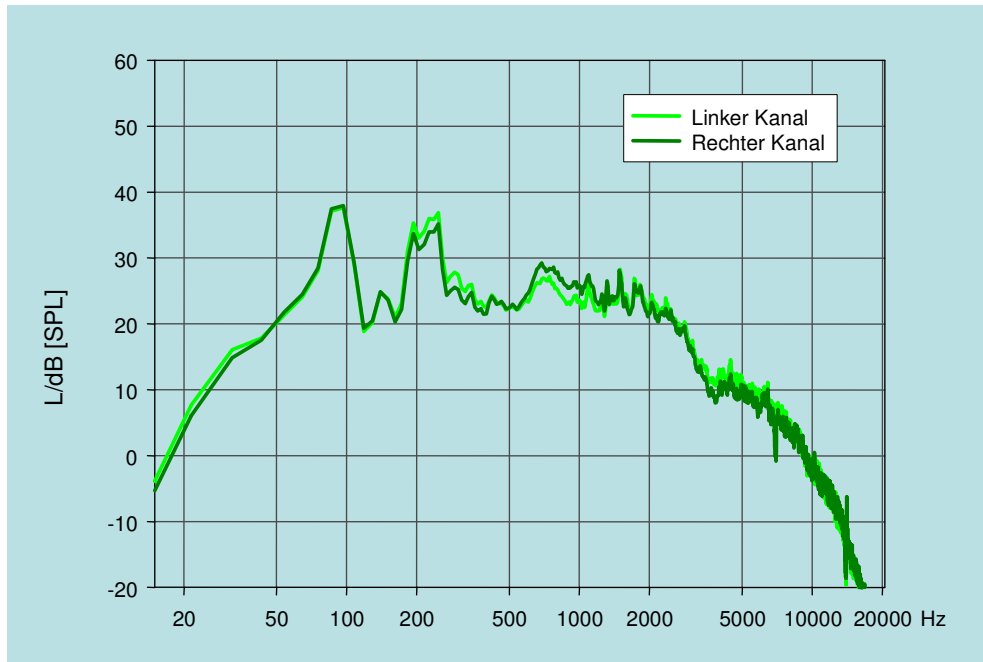


Abb. 2.2-2: Frequenzspektrum eines 30-minütigen Schienenverkehrsgeräusches  
oberes Bild: Originalgeräusch  
unteres Bild: nach der Dämmung der Frequenzen < 200 Hz um 12 dB



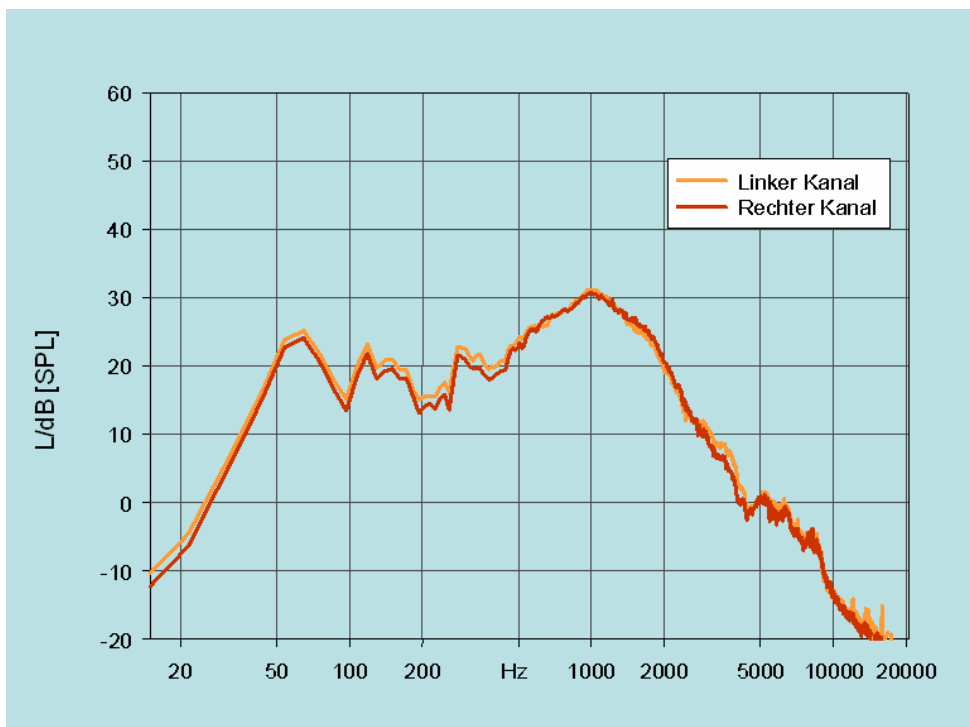
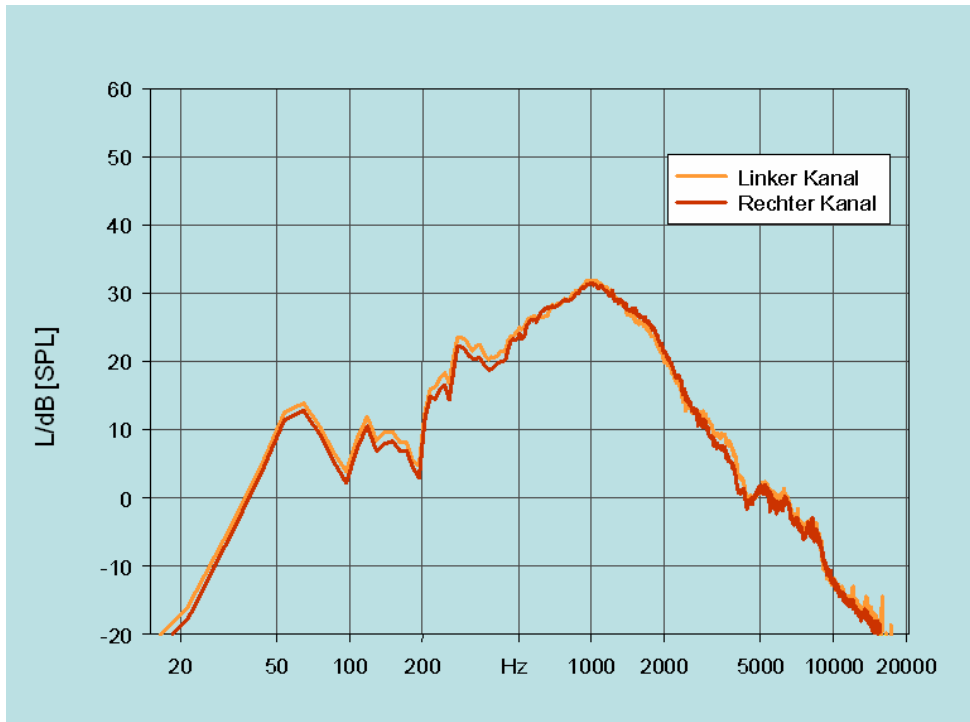


Abb. 2.2-3: Frequenzspektrum eines 30-minütigen Straßenverkehrsgeräusches  
oberes Bild: Originalgeräusch  
unteres Bild: nach der Dämmung der Frequenzen < 200 Hz um 12 dB

## 2.2.3 Ergebnisse

### 2.2.3.1 Lärmbedingtes Aufwachen, ereigniskorrelierte Auswertung

Die ereigniskorrelierte Auswertung ergab für Schienenverkehrslärm eine durchschnittliche Aufwachwahrscheinlichkeit von 9.2 % (9 % bei Originalgeräuschen, 9.3 % bei frequenzgedämmten Geräuschen) und für den Straßenverkehrslärm eine prozentuale Aufwachwahrscheinlichkeit von 7 % (7.2 % bei Originalgeräuschen, 6.8 % bei gedämmten Geräuschen). Demnach rief Schienenverkehrslärm deutlich häufiger Aufwachreaktionen hervor als Straßenverkehrslärm.

Tabelle 2.2-1 zeigt den Einfluss physikalischer Parameter der Geräuscheinwirkung (Maximalpegel, Pegelanstiegszeit, Geräuschkdauer, lärmfreie Intervalle und Dämmung) sowie den Einfluss der Lärmempfindlichkeit als individueller Parameter sowie einiger situativer Faktoren (verstrichene Schlafzeit, Tiefschlaf, REM-Schlaf).

Tab. 2.2-1: Logistische Regressionsanalysen der Aufwachwahrscheinlichkeit.  $\beta$  =  $\beta$ -Koeffizient; SE = Standard Fehler; p = p-Wert; \* = p<.05; \*\* = p<.01, \*\*\* = p<.001.

|                                | Straße  |      |     | Schiene |      |     |
|--------------------------------|---------|------|-----|---------|------|-----|
|                                | $\beta$ | SE   | p   | $\beta$ | SE   | p   |
| <b>Physikalische Parameter</b> |         |      |     |         |      |     |
| Maximalpegel                   | 0.05    | 0.01 | *** | 0.05    | 0.01 | *** |
| Pegelanstiegszeit              | 0.03    | 0.02 |     | 0.05    | 0.02 | **  |
| Geräuschkdauer                 | 0.02    | 0.01 | *** | 0.01    | 0.00 | **  |
| Lärmfreies Intervall           | 0.10    | 0.03 | *** | 0.10    | 0.03 | *** |
| Dämmung                        | -0.08   | 0.09 |     | 0.06    | 0.09 |     |
| <b>Individuelle Parameter</b>  |         |      |     |         |      |     |
| Lärmempfindlichkeit            | 0.02    | 0.02 |     | -0.01   | 0.01 |     |
| <b>Situative Parameter</b>     |         |      |     |         |      |     |
| Verstrichene Schlafzeit        | 0.00    | 0.00 | **  | 0.00    | 0.00 | *** |
| SWS                            | 0.16    | 0.14 |     | -0.42   | 0.17 | *   |
| REM Schlaf                     | 0.25    | 0.10 | *   | 0.17    | 0.10 | +   |

Mit Ausnahme der Dämmung hatten alle in der Tabelle aufgeführten physikalischen Determinanten des Lärms einen signifikant moderierenden Effekt auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Je höher der Maximalpegel eines Geräusches, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit aufzuwachen. Die Pegelanstiegszeit, d. h. die Zeitdauer bis zum Erreichen des Maximalpegels, moderierte die Reaktion auf Schienenverkehrslärm, wobei eine inverse Beziehung bestand und die Wahrscheinlichkeit einer Aufwachreaktion mit kürzer werdender Pegelanstiegzeit (schnellerem Erreichen der Maximalpegel) zunahm. Für den Straßenverkehrslärm bestand eine solche Beziehung nicht. Die Aufwachwahrscheinlichkeit nahm bei beiden Verkehrslärmarten mit der Dauer der einzelnen Geräusche sowie mit zunehmender Dauer des jeweils vorausgehenden lärmfreien Intervalls zu. Eine Dämmung von tiefen Frequenzen < 200 Hz hatte – entgegen der Annahmen – keinen Einfluss auf das Aufwachen.

Die Lärmempfindlichkeit als individueller Faktor beeinflusste das Aufwachen nicht, während situative Parameter einen bedeutsamen Einfluss hatten. Die bis zum Eintreten eines Geräusches verstrichene Schlafzeit erwies sich für beide Geräuscharten als hoch signifikant. Je län-

ger die einem Geräusch vorausgehende lärmfreie Zeit war, desto wahrscheinlicher war mit einer Aufwachreaktion zu rechnen. Die Aufwachhäufigkeit war bei Schienenverkehrslärm im Tiefschlaf am geringsten und im REM-Schlaf für Schienen- und Straßenverkehrslärm am größten.

### 2.2.3.2 Änderung der Schlafstruktur, subjektive Schlafbewertung

Tabelle 2.2-2 präsentiert Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Schlafparameter, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistungsdaten, getrennt für die Nächte ohne Lärmeinwirkung (Ruhennächte) und diejenigen Nächte, in denen die Originalgeräusche bzw. die frequenzgedämmten Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche appliziert worden waren. Die Reaktionen auf die gedämmten Geräusche entsprachen quantitativ etwa den Reaktionen auf die Originalgeräusche. Die Einschlaf latenz war verlängert, ebenso die Dauer bis zur ersten Tiefschlafphase. Die Schlafperiode (die Dauer vom Einschlafen bis zum terminalen Aufwachen) sowie die Zeit im Tief- und REM-Schlaf waren nicht verändert, die Gesamtschlafzeit jedoch zugunsten einer verlängerten intermittierten Wachzeit verkürzt. Die Schlaffeizienz war signifikant reduziert und der Schlafstörungsindex signifikant erhöht.

Tab. 2.2-2: Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Schlafparameter, der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung in Ruhennächten sowie in Nächten, in denen reale bzw. frequenzgedämmte Schienen- und Straßenverkehrsgeräusche einwirkten. 16 Probanden, 19-28 Jahre, Wilcoxon-Test und p-Werte (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ ).

| Abhängige Variablen   | Ruhennächte        |                    | Lärmnächte<br>(Schiene und Straße) |                            | Wilcoxon-Test    |       |       |
|---|--------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|-------|-------|
|   | (R)<br>AM $\pm$ SD | (R)<br>AM $\pm$ SD | Original (U)<br>AM $\pm$ SD        | Gedämmt (D)<br>AM $\pm$ SD | R : U<br>p-Werte | R : D | D : U |
| <b>Physiologische Schlafparameter</b>   |                    |                    |                                    |                            |                  |       |       |
| <b>Schlafbeginn</b>   |                    |                    |                                    |                            |                  |       |       |
| Einschlaf latenz (SOL)  | 18.5 $\pm$ 9.3     | 23.5 $\pm$ 11.2    | 20.9 $\pm$ 8.2                     | 0.06                       | 0.09             | 0.18  |       |
| Tiefschlaf latenz (SWS-Latenz)  | 14.9 $\pm$ 5.6     | 18.6 $\pm$ 10.1    | 17.8 $\pm$ 5.1                     | 0.08                       | 0.01             | 0.59  |       |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)  | 8.6 $\pm$ 9.5      | 8.1 $\pm$ 4.7      | 8.6 $\pm$ 4.9                      | 0.43                       | 0.44             | 0.83  |       |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)  | 36.4 $\pm$ 13.1    | 36.3 $\pm$ 13.0    | 33.8 $\pm$ 11.2                    | 0.95                       | 0.38             | 0.30  |       |
| REM-Schlaf  | 11.1 $\pm$ 7.5     | 13.2 $\pm$ 6.2     | 10.8 $\pm$ 5.9                     | 0.30                       | 0.98             | 0.43  |       |
| <b>Gesamtschlaf</b>   |                    |                    |                                    |                            |                  |       |       |
| Schlafperiode (SPT)   | 459.0 $\pm$ 11.5   | 456.3 $\pm$ 11.2   | 456.7 $\pm$ 9.8                    | 0.18                       | 0.30             | 0.97  |       |
| Gesamtschlafzeit (TST)  | 432.1 $\pm$ 16.8   | 421.3 $\pm$ 22.8   | 423.4 $\pm$ 14.6                   | 0.02                       | <0.01            | 0.71  |       |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)  | 26.9 $\pm$ 9.6     | 35.0 $\pm$ 15.5    | 33.3 $\pm$ 11.5                    | 0.03                       | 0.03             | 0.50  |       |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)  | 48.6 $\pm$ 16.9    | 56.6 $\pm$ 19.5    | 55.2 $\pm$ 17.1                    | 0.09                       | 0.19             | 0.67  |       |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)  | 74.8 $\pm$ 28.5    | 70.2 $\pm$ 25.5    | 71.1 $\pm$ 24.4                    | 0.35                       | 0.27             | 0.81  |       |
| REM-Schlaf  | 103.6 $\pm$ 17.3   | 107.1 $\pm$ 17.4   | 102.9 $\pm$ 14.3                   | 0.21                       | 0.72             | 0.18  |       |
| Schlaffeizienz-Index (SEI)  | 0.94 $\pm$ 0.02    | 0.92 $\pm$ 0.04    | 0.93 $\pm$ 0.0                     | 0.02                       | 0.02             | 0.53  |       |
| Schlafstörungs-Index  | -0.15 $\pm$ 1.20   | 0.36 $\pm$ 1.13    | 0.44 $\pm$ 0.86                    | 0.03                       | <0.001           | 0.98  |       |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>   |                    |                    |                                    |                            |                  |       |       |
| Subjektive Schlafqualität   | 37.2 $\pm$ 5.8     | 29.60 $\pm$ 6.48   | 30.6 $\pm$ 4.6                     | <0.01                      | <0.001           | 0.51  |       |
| Müdigkeit   | 4.7 $\pm$ 1.8      | 5.63 $\pm$ 1.67    | 5.4 $\pm$ 2.1                      | <0.01                      | 0.01             | 0.57  |       |
| <b>Reaktionszeiten bei wiederholten Aufgaben (non-switch) und bei Aufgabenwechsel</b> |                    |                    |                                    |                            |                  |       |       |
| Non-switch (ms)   | 377.3 $\pm$ 44.6   | 372.0 $\pm$ 46.8   | 381.6 $\pm$ 51.1                   | 0.23                       | 0.30             | 0.19  |       |
| Switch (ms)   | 372.3 $\pm$ 37.4   | 367.4 $\pm$ 39.1   | 373.3 $\pm$ 41.5                   | 0.25                       | 0.93             | 0.38  |       |
| Fehler switch   | 12.5 $\pm$ 5.5     | 14.2 $\pm$ 9.1     | 13.6 $\pm$ 6.3                     | 0.77                       | 0.36             | 0.71  |       |
| Fehler non switch   | 12.3 $\pm$ 8.1     | 13.0 $\pm$ 7.2     | 10.6 $\pm$ 5.8                     | 0.86                       | 0.11             | 0.10  |       |
| Wechselkosten Reaktionszeit   | 5.0 $\pm$ 15.8     | 4.6 $\pm$ 16.9     | 8.3 $\pm$ 18.5                     | 0.72                       | 0.17             | 0.06  |       |
| Wechselkosten Fehler  | 0.3 $\pm$ 8.1      | 1.2 $\pm$ 4.1      | 3.0 $\pm$ 3.0                      | 0.75                       | 0.10             | 0.08  |       |

Die Schlafqualität wurde sowohl nach den Nächten, in denen die Originalgeräusche einwirkten als auch nach den Nächten, in denen frequenzgedämmte Derivate appliziert worden waren, als deutlich vermindert eingestuft und die Müdigkeit signifikant höher bewertet. Die Leistung nach Ruhenächten unterschied sich nicht von der Leistung nach Nächten mit Lärmwirkung (Originalgeräusche sowie gedämmte Geräusche).

Beim direkten Vergleich der Reaktionen auf Originalgeräusche und frequenzgedämmte Verkehrsgeräusche konnten weder bei den physiologischen Schlafparametern noch bei den subjektiven Parametern am nächsten Morgen Unterschiede gefunden werden. Bezüglich der Leistung wurden für die gedämmten Geräusche im Vergleich zu den Originalgeräuschen höhere Wechselkosten bei den Fehlern und bei der Reaktionszeit ermittelt.

In Tabelle 2.2-3 sind die Ergebnisse für beide Geräuschmodalitäten getrennt dargestellt. Der Vergleich der in den Lärmnächten erhobenen Daten ergab zwar – in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Arbeitspakets 1 (Kap. 2.1) – eine etwas stärkere Reaktion auf den Schienenverkehrslärm, die aber nur für die Zeit bis zum Erreichen der ersten Tiefschlafphase ausschließlich bei der Gegenüberstellung der gedämmten Geräusche signifikant war.

Der Vergleich der Reaktion auf die gedämmten und auf die Originalgeräusche ergab – hypothesenkonform – für die Straßenverkehrsgeräusche im ersten Schlafzyklus weniger S0&1 und eine geringere Müdigkeit am folgenden Morgen. Bei Schienenverkehrsgeräuschen ergaben sich – im Widerspruch zur Hypothese – eine verlängerte Tiefschlaflatenz und höhere Wechselkosten bei der Reaktionszeit.

Tabelle 2.2-4 präsentiert die Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells, das die interindividuellen Unterschiede in der Reaktion auf die beiden Geräuscharten sowie die intraindividuellen Unterschiede der Reaktion auf die Dämmung und die Wechselwirkung von Dämmung und Geräuschart zeigt. Über gedämmte und Originalgeräusche varianzanalytisch gemittelt (Haupteffekt Geräuschart) ergaben sich inter-individuell keine signifikant unterschiedlichen Reaktionen auf Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche. Intra-individuell (Haupteffekt Dämmung) wurde eine hypothesenkonforme, numerisch allerdings geringe Reduktion von S0&1 nach Dämmung der Originalgeräusche gefunden. Gleichzeitig konnten wiederum nicht hypothesenkonforme Reaktionen am nächsten Morgen in der Form beobachtet werden, dass die Reaktionszeiten tendenziell und die Wechselkosten bei den Fehlern nach gedämmten Lärmszenarien im Vergleich nach ungedämmten Lärmszenarien signifikant verlängert bzw. erhöht waren.

Schließlich ergaben die beiden Wechselwirkungen zwischen Dämmung und Geräuschart für die Straßenverkehrsgeräusche hypothesenkonforme, für die Schienenverkehrsgeräusche aber nicht konforme Ergebnisse. Während die Zeit in Wach und im Schlafstadium S1 im ersten Schlafzyklus sowie die Müdigkeit am nächsten Morgen nach Einwirkung frequenzgedämmter Straßenverkehrsgeräusche geringer war als bei den originalen Straßenverkehrsgeräuschen war die Applikation der frequenzgedämmten Schienenverkehrsgeräusche mit einer Zunahme der Wachzeit und des Schlafstadiums S1 sowie einer erhöhten Müdigkeit verbunden.

Tab. 2.2-3: Mittelwerte und Standardabweichungen physiologischer Schlafparameter, subjektiver Schlafbewertung und Leistung in Ruhenächten und in Nächten, in denen reale bzw. frequenzgedämmte Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche einwirkten. 16 Pbn, 19 - 28 Jahre, Wilcoxon-Test und p-Werte (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ ).

| Abhängige Variablen  | Straßenverkehrslärm (R) |                |                                | Schienenverkehrslärm (T) |                |                                 | R:T                             |                                 |  |
|--|-------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
|  | Original<br>(U)         | Gedämmt<br>(D) | R <sub>D</sub> :R <sub>U</sub> | Original<br>(U)          | Gedämmt<br>(D) | T <sub>D</sub> : T <sub>U</sub> | R <sub>U</sub> : T <sub>U</sub> | R <sub>D</sub> : T <sub>D</sub> |  |
|  | AM ± SD                 | AM ± SD        | Wilcox. p                      | AM ± SD                  | AM ± SD        | Wilcox. p                       | Wilcox. p                       | Wilcox. p                       |  |
| <b>Physiologische Schlafparameter</b>  |                         |                |                                |                          |                |                                 |                                 |                                 |  |
| <b>Schlafbeginn</b>  |                         |                |                                |                          |                |                                 |                                 |                                 |  |
| Einschlaflatenz (SOL)  | 23.2 ±12.1              | 21.4 ±9.0      | 0.69                           | 23.8 ±11.0               | 20.4 ±7.8      | 0.25                            | 0.79                            | 0.71                            |  |
| Tiefschlaflatenz (SWS-Latenz)  | 18.6 ±13.7              | 14.5 ±3.5      | 0.41                           | 18.6 ±5.8                | 21.0 ±4.3      | 0.05                            | 0.21                            | 0.01                            |  |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)   | 9.1 ±6.14               | 6.9 ±4.3       | <0.01                          | 7.2 ±2.6                 | 10.3 ±5.1      | 0.11                            | 0.83                            | 0.11                            |  |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)   | 40.8 ±15.9              | 38.3 ±11.0     | 0.55                           | 31.7 ±8.0                | 29.2 ±10.0     | 0.55                            | 0.19                            | 0.10                            |  |
| REM-Schlaf   | 13.1 ±5.1               | 11.4 ±6.1      | 0.64                           | 13.2 ±7.5                | 10.2 ±6.0      | 0.55                            | 0.92                            | 0.64                            |  |
| <b>Gesamtschlaf</b>  |                         |                |                                |                          |                |                                 |                                 |                                 |  |
| Schlafperiode (SPT)  | 457.2 ±12.0             | 456.1 ±11.2    | 0.55                           | 455.3 ±11.1              | 457.3 ±8.9     | 0.64                            | 0.56                            | 0.83                            |  |
| Gesamtschlafzeit (TST)   | 417.7 ±27.4             | 422.3 ±15.2    | 0.84                           | 424.9 ±18.3              | 424.5 ±15.0    | 1.00                            | 0.56                            | 0.56                            |  |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)   | 39.5 ±19.5              | 33.8 ±12.3     | 0.46                           | 30.4 ±9.2                | 32.8 ±11.6     | 0.98                            | 0.56                            | 0.96                            |  |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)   | 60.1 ±25.7              | 53.4 ±22.6     | 0.46                           | 53.2 ±11.2               | 57.1 ±10.3     | 0.74                            | 0.64                            | 0.56                            |  |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)   | 74.5 ±32.2              | 71.9 ±28.0     | 0.71                           | 66.0 ±17.9               | 70.2 ±22.1     | 0.25                            | 0.71                            | 0.87                            |  |
| REM-Schlaf   | 104.0 ±20.1             | 100.2 ±15.7    | 0.64                           | 110.3 ±14.8              | 105.6 ±13.2    | 0.27                            | 0.60                            | 0.79                            |  |
| Schlafeffizienz-Index (SEI)  | 0.91 ±0.04              | 0.93 ±0.03     | 0.46                           | 0.93 ±0.02               | 0.93 ±0.03     | 0.95                            | 0.49                            | 0.96                            |  |
| Schlafstörungs-Index   | 0.38 ±1.53              | 0.33 ±1.08     | 0.64                           | 0.33 ±0.62               | 0.54 ±0.64     | 0.74                            | 0.96                            | 0.71                            |  |
| <b>Subjektive Bewertung des Schlafs</b>  |                         |                |                                |                          |                |                                 |                                 |                                 |  |
| Subjektive Schlafqualität  | 29.5 ±6.5               | 30.3 ±3.9      | 0.69                           | 29.8 ±6.9                | 31.0 ±5.4      | 0.69                            | 0.87                            | 0.87                            |  |
| Müdigkeit  | 5.9 ±1.1                | 4.7 ±1.9       | 0.05                           | 5.4 ±2.2                 | 6.1 ±2.2       | 0.30                            | 0.87                            | 0.14                            |  |
| <b>Reaktionszeiten bei wiederholten Aufgaben (non-switch) und bei Aufgabenwechsel (switch)</b> |                         |                |                                |                          |                |                                 |                                 |                                 |  |
| Non-switch (ms)  | 374.5 ±42.0             | 380.5 ±46.5    | 0.31                           | 369.6 ±54.0              | 382.6 ±58.5    | 0.46                            | 0.87                            | 0.71                            |  |
| Switch (ms)  | 367.6 ±32.5             | 372.4 ±34.3    | 0.20                           | 367.2 ±47.0              | 374.1 ±50.2    | 0.64                            | 0.87                            | 0.64                            |  |
| Fehler switch  | 14.4 ±10.0              | 13.3 ±5.1      | 0.98                           | 14.0 ±8.8                | 13.9 ±7.7      | 0.64                            | 0.96                            | 1.00                            |  |
| Fehler non switch  | 12.0 ±6.5               | 9.1 ±3.2       | 0.12                           | 14.2 ±8.1                | 12.0 ±7.5      | 0.50                            | 0.87                            | 0.71                            |  |
| Wechselkosten Reaktionszeit  | 6.9 ±20.9               | 8.1 ±21.6      | 0.63                           | 2.4 ±12.8                | 8.5 ±16.3      | 0.03                            | 0.49                            | 0.67                            |  |
| Wechselkosten Fehler   | 2.4 ±4.5                | 4.1 ±2.9       | 0.55                           | -0.13 ±3.4               | 1.9 ±2.9       | 0.13                            | 0.22                            | 0.23                            |  |

Tab. 2.2-4: Allgemeines Lineares Modell zur Bestimmung der inter-individuellen Unterschiede bezüglich der Geräuschart und der intra-individuellen Unterschiede bezüglich der Wirkung der Frequenzdämmung und der Wechselwirkung von Dämmung und Geräuschart (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ ).

| Abhängige Variablen  | Inter-individuell |         | Intra-individuell |         |                     |         |
|--|-------------------|---------|-------------------|---------|---------------------|---------|
|  | Geräuschart       |         | Dämmung           |         | Dämmung*Geräuschart |         |
|  | F                 | p-value | F                 | p-value | F                   | p-value |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b>  |                   |         |                   |         |                     |         |
| <b>Schlafbeginn</b>  |                   |         |                   |         |                     |         |
| Einschlaflatenz (SOL)  | 0.00              | 0.96    | 2.63              | 0.13    | 0.22                | 0.65    |
| Tiefschlaflatenz (SWS-Latenz)  | 0.95              | 0.35    | 0.17              | 0.69    | 2.45                | 0.14    |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)   | 0.14              | 0.72    | 0.23              | 0.64    | 8.06                | 0.01    |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)   | 2.81              | 0.12    | 1.43              | 0.25    | 0.00                | 0.99    |
| REM-Schlaf   | 0.07              | 0.80    | 1.04              | 0.33    | 0.07                | 0.79    |
| <b>Gesamtschlaf</b>  |                   |         |                   |         |                     |         |
| Schlafperiode (SPT)  | 0.00              | 0.95    | 0.04              | 0.85    | 0.51                | 0.49    |
| Gesamtschlafzeit (TST)   | 0.34              | 0.57    | 0.15              | 0.71    | 0.22                | 0.65    |
| Intermittierte Wachzeit (WASO)   | 1.00              | 0.33    | 0.13              | 0.72    | 0.78                | 0.39    |
| S0&1 (Zeit in Wach und S1)   | 0.03              | 0.87    | 48.72             | < 0.001 | 1.35                | 0.26    |
| SWS (Zeit im Tiefschlaf)   | 0.16              | 0.69    | 0.11              | 0.74    | 1.82                | 0.20    |
| REM-Schlaf   | 0.59              | 0.46    | 2.63              | 0.13    | 0.03                | 0.86    |
| Schlafeffizienz-Index (SEI)  | 0.92              | 0.35    | 0.15              | 0.71    | 0.74                | 0.40    |
| Schlafstörungen-Index  | 0.03              | 0.87    | 0.14              | 0.71    | 0.36                | 0.56    |
| <b>Subjektive Bewertung des Schlafs</b>  |                   |         |                   |         |                     |         |
| Subjektive Schlafqualität  | 0.04              | 0.85    | 0.43              | 0.52    | 0.01                | 0.91    |
| Müdigkeit  | 0.25              | 0.62    | 0.40              | 0.54    | 6.74                | 0.02    |
| <b>Reaktionszeiten bei wiederholten Aufgaben (non-switch) und bei Aufgabenwechsel (switch)</b> |                   |         |                   |         |                     |         |
| Non-switch (ms)  | 0.00              | 0.96    | 3.22              | 0.09    | 0.42                | 0.53    |
| Switch (ms)  | 0.00              | 0.97    | 1.33              | 0.27    | 0.04                | 0.84    |
| Error switch   | 0.00              | 0.98    | 0.10              | 0.75    | 0.08                | 0.79    |
| Error non switch   | 0.71              | 0.41    | 2.87              | 0.11    | 0.07                | 0.80    |
| Costs Reaction Time  | 0.05              | 0.82    | 3.44              | 0.08    | 1.50                | 0.24    |
| Costs Error  | 2.42              | 0.14    | 5.15              | 0.04    | 0.03                | 0.86    |

adjustierte p-Werte nach Greenhouse-Geisser

## 2.2.4 Diskussion

Allgemeine mit der Lärmeinwirkung assoziierte Änderungen des Schlafverhaltens und der subjektiven Schlafbewertung waren auch in diesem Arbeitspaket nachzuweisen. Die Gesamtschlafzeit ist unter Lärmeinfluss im Vergleich zu den Ruhenächten um 11 Minuten bei den Originalgeräuschen bzw. um 9 Minuten bei den gedämmten Geräuschen verkürzt. Gehäufte lärmbedingte Aufwachreaktionen und eine verlängerte Einschlaflatenz bewirken letztlich strukturelle Änderungen des Schlafablaufes. Wie auch schon in Arbeitspaket 1 konnten für einige physiologische Schlafparameter unter Schienenverkehrslärm größere Beeinträchtigungen festgestellt werden als unter Straßenverkehrslärm. Während die Folge-reaktionen am nächsten Tag keine Unterschiede zwischen den Verkehrsarten ergaben, führte Schienenverkehrslärm zu häufigeren Aufwachreaktionen und – betrachtet man nur die gedämmten Geräusche – auch zu einem späteren Einsetzen des Tiefschlafs.

Aus mehreren Publikationen zur Problematik der Sprachverständlichkeit, der Leistung und der Lästigkeit lässt sich ein höheres Störpotenzial niedriger Frequenzen ableiten, weshalb

die WHO empfiehlt, Geräusche mit einem hohen Anteil tiefer Frequenzen stärker zu gewichten und bei der Lärmbekämpfung strengere Maßstäbe anzulegen [Berglund et al. 1999].

Abgesehen von der relativ gut belegten höheren Lästigkeit niederfrequenter Geräusche und der möglichen Beeinträchtigung der Leistung [Persson Waye 2006, Persson Waye & Agge 2005, Persson Waye & Rylander 2001] wurden psychovegetative Symptome wie Kopfschmerzen, Druck auf das Trommelfell, Müdigkeit und Schläfrigkeit sowie Konzentrationsstörungen unter der länger dauernden Einwirkung niederfrequenter Geräusche gefunden. Andererseits weisen die Ergebnisse einiger Untersuchungen darauf hin, dass tieffrequente im Vergleich zu höherfrequenten Geräuschen auch stärkere Schlafstörungen verursachen.

Einen überzeugenden Beleg für das höhere Störpotenzial tiefer Frequenzen erbrachten LeVere et al. [1973]. Die Autoren applizierten während des Schlafs verschiedene Terzbandgeräusche mit Mittenfrequenzen zwischen 50 und 1 000 Hz und fanden selbst im Tiefschlaf stärkere kortikale Desynchronisationen auf die niederfrequenten im Vergleich zu den höherfrequenten Terzbandgeräuschen. Entsprechend berichteten Verzini et al. [1999], dass die akustische Energie verschiedener Lärmquellen im Frequenzbereich 20-160 Hz vermehrt mit Schlafstörungen, Müdigkeit und Konzentrationsbeeinträchtigungen assoziiert war. Demgegenüber fanden Persson Waye & Rylander [2002] in Nächten mit Einwirkung niederfrequenter Geräusche keine vermehrten Schlafstörungen, obwohl die Probanden sich morgens müder und angespannter fühlten und ihr Einschlafen als erschwert bezeichnet hatten. Letzteres war aber vor allem bei denjenigen der Fall, die sich durch niederfrequente Geräusche belästigt fühlten. Inwieweit die in einer Untersuchung von Persson Waye et al. [2003] ermittelte Reduktion der Cortisol Awakening Response, die innerhalb der ersten halben Stunde nach dem Aufwachen zu beobachten ist, als Lärmeffekt interpretiert werden kann, ist fraglich, zumal diese Ergebnisse in einer weiteren Untersuchung nicht reproduziert werden konnten [Persson Waye et al. 2003, 2004].

Basierend auf diesen Untersuchungen war zu erwarten, dass die Dämmung der tiefen Frequenzen des Verkehrslärms einen positiven Effekt hat und dass die durch Verkehrslärm erzeugten Beeinträchtigungen des Schlafverhaltens dann geringer ausfallen. In der vorliegenden Untersuchung wurden die tiefen Frequenzen bis 200 Hz um 12 dB gedämmt. Diese technisch nur schwer zu erzielende Dämmung wurde gewählt, um mit einer nur begrenzten Anzahl an Probanden zunächst grundsätzlich zu klären, ob die Dämmung tiefer Frequenzen eine Verbesserung bzw. eine Verminderung der lärmbedingten Schlafstörungen bewirken kann.

Die hier durchgeführte Untersuchung ergab zwar für den Straßenverkehr eine mäßige Änderung physiologischer Variablen nach der Dämmung tiefer Frequenzen im Sinne einer Verbesserung, nicht jedoch für den entsprechend behandelten Schienenverkehrslärm. Die mit der Dämmung erzielte Wirkung war jedoch deutlich geringer als nach den Ergebnissen von LeVere et al. [1973, 1974] zu erwarten war. Die Ursache hierfür ist sicherlich darin zu sehen, dass die genannten Autoren ausschließlich Terzbandgeräusche, also nur einen klei-

nen Ausschnitt eines breiten Frequenzspektrums appliziert hatten, während hier nur ein Teil des breiten Spektrums des Schienen- wie des Straßenverkehrslärms gedämmt worden war. Dass mit der Dämmung der tiefen Frequenzen des Schienenverkehrslärms keine Verbesserung erzielt worden war, ist wohl auf dessen im Vergleich zum Straßenverkehrslärm höheren Frequenzanteilen zurückzuführen.

Die für den Straßenverkehrslärm erzielten Ergebnisse entsprechen tendenziell den Beobachtungen von Hellbrück et al. [2006] sowie Klatte et al. [2006], die unter der Einwirkung von Straßenverkehrslärm signifikante Beeinträchtigungen der Leistung im Konzentrationsleistungs-Test (KLT) sowie im Grammatical Reasoning-Test (GRT) fanden, die nach der Dämmung der tiefen Frequenzen um 12 dB geringer ausfielen. Damit einhergehend fanden die Autoren auch eine von den Probanden weniger stark empfundene Beeinträchtigung der Befindlichkeit bei der Bearbeitung dieser Leistungstests. Auch bei den Prozessen des Lesens und des Textverstehens ließen sich nach der Dämmung tiefer Frequenzen mäßige Verbesserungen, d. h. geringere Beeinträchtigungen nachweisen.

Als weitere Erklärung für die mäßige Wirkung auf das Schlafverhalten ist die Annahme plausibel, dass – wie schon die Verarbeitung der Schallreize in Arbeitspaket 1 (Kap. 2.1) gezeigt hatte – der völlig andersartige Bewusstseinszustand im Schlaf gegenüber dem Wachbewusstsein eine Bedeutung hat. Damit wäre auch denkbar, dass während des Schlafes die höheren Frequenzen eine entscheidendere Rolle spielen und dass deren Dämmung zu einer Reduktion lärmbedingter Schlafstörungen führen kann. Letzteres lässt sich vermuten auf der Basis einer von Bisping [2006] vorgetragenen Untersuchung, der zu Folge die Dämmung der höheren Frequenzen deutlich angenehmer empfunden worden war.

### **2.2.5 Schlussfolgerungen**

In der hier durchgeführten Untersuchung wurde die Wirkung von frequenzgedämmten Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen auf physiologische Schlafparameter, subjektive Schlafbewertung und Leistung im Vergleich zu Originalgeräuschen untersucht. Eine Dämmung tiefer Frequenzen unter 200 Hz um 12 dB brachte weder bei den primären Reaktionen noch bei den Folgereaktionen eindeutige, d. h. für beide untersuchten Verkehrsarten geltende, signifikante Verbesserungen. Hypothesenkonforme Veränderungen konnten ausschließlich für die Wirkung von Straßenverkehrsgeräuschen festgestellt werden.



## 2.3 Wirkungen temporärer Verkehrsruhe

### 2.3.1 Einleitung

Zahlreiche Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Reagibilität auf nächtliche Schallreize im Laufe der Nacht zunimmt. Die Wahrscheinlichkeit aufzuwachen und mit Körperbewegungen zu reagieren, nimmt mit der verstrichenen Schlafzeit allmählich zu. Die Ursache hierfür ist die im Laufe der Nacht allmählich abfallende Schlaftiefe, die mit der Schlafdauer fortschreitende Entmüdung, der gegen Morgen ansteigende sympathische Tonus und die zunehmende Erholung des Gehörs, also eine insgesamt abfallende Reaktionsschwelle [z. B. Basner et al. 2004, Ehrenstein & Müller-Limmroth 1981, Fidell et al. 1994, Griefahn 1978, Passchier-Vermeer et al. 2002, Thiessen & Lapointe 1983]. Trotzdem lassen sich aus diesen Untersuchungen, in denen die Schallreize über die ganze Nacht verteilt einwirkten, keine Empfehlungen zur zeitlich sinnvollen Terminierung einer temporären Verkehrsruhe ableiten, da davon auszugehen ist, dass die Reaktion auf akustische Reize durch die Reaktion auf vorhergehende Geräusche mitbestimmt ist.

Maschke [1992] prüfte die Wirkung unterschiedlicher zeitlicher Expositionsmuster, bei denen er die Verkehrsdichte variierte, ohne jedoch eine lärmfreie Periode zu realisieren und fand die ausgeprägtesten strukturellen Änderungen des Schlafs bei einer Konzentration von Fluggeräuschen auf die ersten und auf die beiden letzten Stunden und die geringste Reaktion bei einer Konzentration der Überflüge nur auf die beiden ersten Nachtstunden.

Letzteres beobachtete auch Griefahn [1998], die das Geräusch von Panzerschüssen entweder in den ersten drei Stunden nach dem Ins-Bettgehen oder nur in den letzten drei Stunden vor dem Wecken applizierte.

Temporär begrenzte Ruhezeiten werden sowohl für die erste als auch für die zweite Hälfte der Nacht in Erwägung gezogen. Teilweise werden, z. B. am Flughafen Frankfurt/Main, 6-stündige Ruhezeiten von 23 bis 5 Uhr gefordert. Da diese Ruhezeiten notwendigerweise zeitlich fixiert sind, ist davon auszugehen, dass mit diesem Ansatz nur Personen mit zeitlich entsprechendem Schlafverhalten optimal geschützt werden. Da ein großer Teil der Bevölkerung aber habituell oder aus beruflichen Gründen früher oder später ins Bett geht bzw. früher oder später aufsteht, stellt sich die Frage, ob und in welchem Umfang der Vorteil der limitierten Verkehrsruhe für diese Personen gemindert wird.

Um dies zu prüfen, wurden Versuche mit drei Modellen temporärer Verkehrsruhe durchgeführt, deren Eckzeiten sich an den Schlafzeiten des größten Teils der Bevölkerung orientierten. An den Versuchen nahmen Personen mit typischen Schlafzeiten (Normalschläfer) teil, aber auch Personen mit früheren und mit späteren Schlafzeiten (Früh- und Spätschläfer). Generell wurde für Nächte mit initialer Lärmbelastung erwartet, dass der Schlafbeginn beeinträchtigt ist, dass diese Störungen während der nachfolgenden Ruhe aber kompensiert werden und so weder bezogen auf den Gesamtschlaf noch auf die subjektive Beurteilung des Schlafs nachweisbar sind. Bei terminaler, auf das Ende der Nacht konzentrier-

ter Lärmbelastung wurde zwar keine Beeinträchtigung des Schlafbeginns, wohl aber des Gesamtschlafs und der subjektiven Schlafbewertung erwartet.

Die vorgegebenen Ruhezeiten sind bei Früh- und bei Spätschläfern teilweise reduziert oder eingebettet in eine initiale und eine terminale Lärmbelastung, so dass im Vergleich zu den Normalschläfern stärkere Beeinträchtigungen zu erwarten waren.

### 2.3.2 Material und Methoden

*Experimentelles Design.* Alle Probanden schliefen nach einer Gewöhnungsnacht von Sonntag auf Montag in zwei aufeinander folgenden Wochen jeweils vier aufeinander folgende Nächte von Montagabend bis Freitag früh im Labor. Jeweils 8 Probanden gingen zu einer 'normalen' Zeit um 23 Uhr (Normalschläfer), eine Stunde früher um 22 Uhr (Frühschläfer) bzw. eine Stunde später um 0 Uhr (Spätschläfer) ins Bett und standen acht Stunden später um 7, um 6 bzw. um 8 Uhr auf. In einem systematischen wöchentlichen Wechsel schliefen sie unter Einwirkung von Schienen- bzw. Straßenverkehrslärm, in den vier Nächten jeder Woche in randomisierter Folge eine Nacht unter Ruhebedingungen und drei Nächte unter Einwirkung von Verkehrslärm mit einer abends beginnenden, 4- bzw. 6-stündigen, sowie einer morgens einsetzenden 4-stündigen Verkehrsruhe. Das Design ist in Abbildung 1 dargestellt.

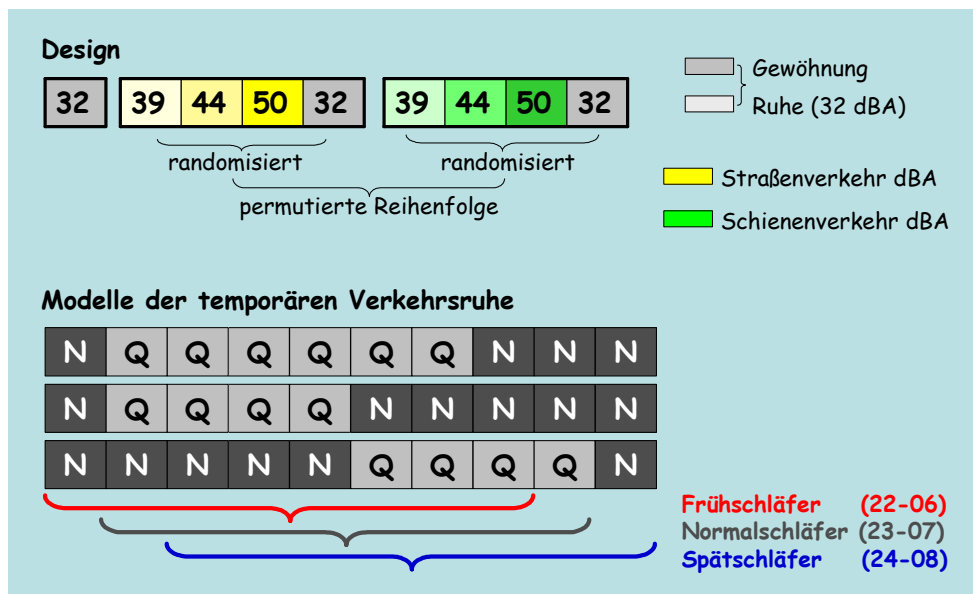


Abb. 2.3-1: Temporäre Verkehrsruhe, experimentelles Design.

*Probanden.* An der Untersuchung nahmen insgesamt 24 Personen teil (12 Frauen, 12 Männer, 21-27 Jahre,  $23.0 \pm 1.9$  Jahre). Jeweils 8 Probanden (4 Frauen, 4 Männer) waren auf der Basis des Morgen-Abendfragebogens (D-MEQ [Griefahn et al. 2001]) zur Bestimmung der individuellen, subjektiven Phasenlage, dem Morgen-, dem Neutral- bzw. dem Abendtyp zuzuordnen. Sie absolvierten sodann eine jeweils 24-stündige Constant Routine zur Bestimmung der Melatonin- und der Cortisolprofile, deren zeitliche Parameter (Onset der Melatoninsynthese, Akrophase der Cortisolproduktion) signifikant mit dem D-MEQ-Score

( $r_{\text{mel}} = -0.502$ ,  $p = 0.013$ ;  $r_{\text{cort}} = -0.509$ ,  $p = 0.011$ ) korrelierten. Diese Prozedur war erforderlich um sicherzustellen, dass die Probanden auch in der Lage waren, die für sie vorgesehenen Schlafzeiten einzuhalten.

*Akustische Belastung.* Für die temporäre Verkehrsruhe wurden 3 Modelle gewählt. Dies waren 2 initiale jeweils um 23 Uhr beginnende 4- bzw. 6-stündige Ruhezeiten sowie eine terminale um 3 Uhr einsetzende 4-stündige Verkehrsruhe. Die Eckzeiten von 23 Uhr und 7 Uhr orientierten sich am Schlafverhalten Erwachsener, die überwiegend zu dieser Zeit ins Bett gehen bzw. aufstehen.

Unter der plausiblen Annahme, dass der in den Ruhezeiten unterbundene Verkehr nicht entfällt, sondern sich auf die für den Verkehr offenen Zeiten verteilt, wurde das in den Arbeitspaketen AP1 und AP2 (Kap. 2.1 und 2.2) gewählte Verkehrsvolumen (Abb. 2.1-3, Tab. 2.1-1a, Tab. 2.1-1b) auf 4 bzw. 2 Stunden verdichtet. Bei einer 4-stündigen Verkehrsruhe und damit einem 4-stündigen verkehrsoffenen Zeitfenster wurde darüber hinaus ein eher gradueller Abfall bzw. Anstieg angenommen. Daher wurden 30-minütige Szenarien mit äquivalenten Pegeln von  $L_{\text{Aeq}} = 34, 37, 40$  und  $45$  dB durch Variation der Anzahl der Vorbeifahrten (Pkw bzw. Züge) mit Maximalpegeln zwischen  $56$  und  $68$  dB(A) entwickelt und entsprechend Tabelle 2.3-1 bzw. Abbildung 2.3-2 zusammengesetzt. Bei einer 6-stündigen Verkehrsruhe war hingegen davon auszugehen, dass sich das gesamte Verkehrsvolumen eher gleichmäßig auf die verbleibende 2-stündige verkehrsoffene Periode verteilt und die Lärmbelastung dementsprechend abrupt einsetzt.

Da Frühschläfer schon um 22 Uhr ins Bett gingen und Spätschläfer erst um 8 Uhr aufstanden, waren 10-stündige Geräuschkennlinien von 22 bis 8 Uhr erforderlich. Für die Randstunden von 22-23 und 7-8 Uhr wurden die jeweils höchsten akustischen Belastungen mit  $L_{\text{Aeq}} = 45$  dB gewählt. Während der gesamten Zeit, also auch während der Verkehrsruhe und in den Ruhenächten wurde ein Rosa Rauschen von  $28$  dB(A) appliziert.

Die Verkehrsdichten (Anzahl an Vorbeifahrten/Stunde) sind für den Straßen- und für den Schienenverkehr für jede fortlaufende Stunde in Tabelle 2.3-1 aufgelistet. Der Verlauf der äquivalenten Pegel ist jeweils bezogen auf 30 Minuten dauernde Abschnitte, getrennt für die drei Modelle der temporären Ruhe sowie die drei durch unterschiedliche Schlafzeiten definierten Untergruppen in Abb. 2.3-2 dargestellt. In Tabelle 2.3-2 sind die akustischen Belastungen für die Früh-, Normal- und Spätschläfer und bei den drei Modellen der temporären Ruhe als äquivalente Pegel getrennt für den Schienen- und den Straßenverkehr angegeben. Tabelle 2.3-3 zeigt die individuelle stündliche Verteilung der Lärm- und der Ruhezeiten bei Früh-, Normal- und Spätschläfern.

Der äquivalente Pegel lag meist zwischen  $39.4$  und  $40$  dB(A). Höhere Pegel ergaben sich bei Frühschläfern, für die die morgendliche Verkehrsruhe und bei Spätschläfern, bei denen die um 23 Uhr beginnende 3- bzw. 4-stündige Verkehrsruhe um jeweils eine Stunde verkürzt war.

Tab. 2.3-1: Verlauf der Verkehrsdichte und der äquivalenten Pegel. N: Anzahl stündlicher Vorbeifahrten.

|   | Uhrzeit    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 22-23      | 23-00 | 00-01 | 01-02 | 02-03 | 03-04 | 04-05 | 05-06 | 06-07 | 07-08 |
|   | Ruhennacht |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Vorbeifahrten                               | 0          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| LAeq dB                                     | 28         | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    |
| 4-stündige initiale Ruhe von 23 bis 03 Uhr  |            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| LAeq dB                                     | 45         | 28    | 28    | 28    | 28    | 34    | 38    | 45    | 45    | 45    |
| N Straße                                    | 48         | 0     | 0     | 0     | 0     | 16    | 33    | 48    | 48    | 48    |
| N Schiene                                   | 30         | 0     | 0     | 0     | 0     | 10    | 24    | 30    | 30    | 30    |
| 4-stündige terminale Ruhe von 03 bis 07 Uhr |            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| LAeq dB                                     | 45         | 45    | 45    | 38    | 34    | 28    | 28    | 28    | 28    | 45    |
| N Straße                                    | 48         | 48    | 48    | 33    | 16    | 0     | 0     | 0     | 0     | 48    |
| N Schiene                                   | 30         | 30    | 30    | 24    | 10    | 0     | 0     | 0     | 0     | 30    |
| 6-stündige initiale Ruhe von 23 bis 05 Uhr  |            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| LAeq dB                                     | 45         | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 28    | 45    | 45    | 45    |
| N Straße                                    | 62         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 62    | 62    | 62    |
| N Schiene                                   | 40         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 40    | 40    | 40    |

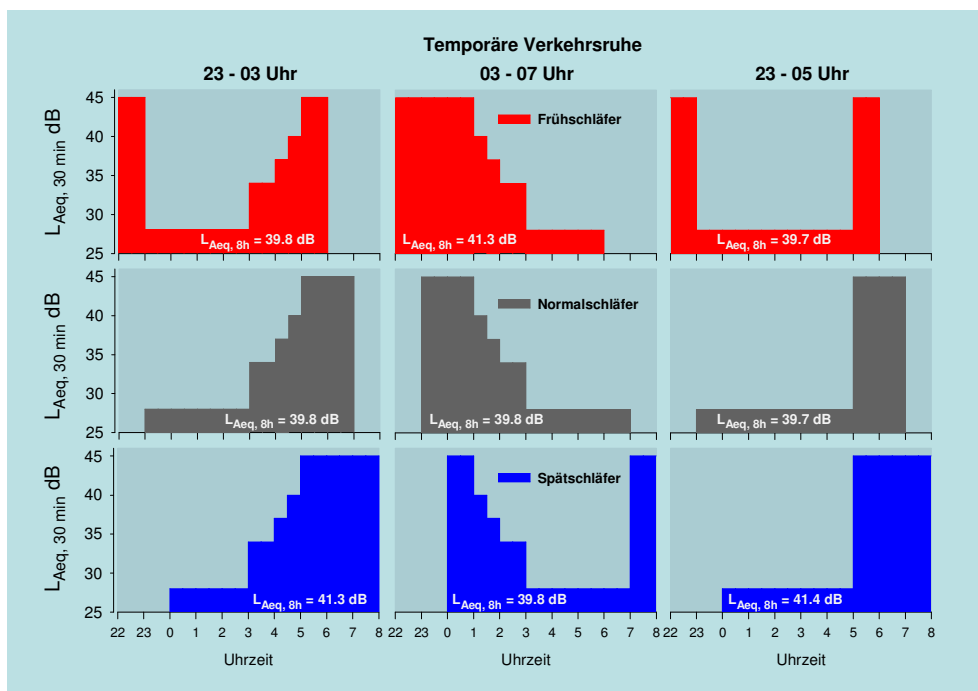


Abb. 2.3-2: Pegel-Zeitverlauf bei temporärer Verkehrsruhe bei Personen mit unterschiedlichen Schlafzeiten.

Tab. 2.3-2: Äquivalente Pegel, denen die Probanden während der 8-stündigen Bettzeit ausgesetzt waren.

| Verkehrsruhe   | 23 – 03 Uhr |        | 03 – 07 Uhr |        | 23 – 05 Uhr |        |
|----------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
|                | Schiene     | Straße | Schiene     | Straße | Schiene     | Straße |
| Normalschläfer | 39.8        | 39.7   | 39.8        | 39.7   | 40.0        | 39.4   |
| Frühschläfer   | 39.8        | 39.7   | 41.3        | 41.2   | 40.0        | 39.4   |
| Spätschläfer   | 41.3        | 41.2   | 39.8        | 39.7   | 41.7        | 41.1   |

Tab. 2.3-3: Stündliche Verteilung der Lärmbelastung in den 3 Untergruppen bei den verschiedenen Modellen temporärer Verkehrsruhe.

| Verkehrsruhe         | 23 – 03 Uhr  | 03 – 07 Uhr | 23 – 05 Uhr |
|----------------------|--|-------------|-------------|
| Stündliche Belastung | Reale stündliche Verteilung von Lärm (N) – Ruhe (Q) von 22 bis 8 Uhr |             |             |
|                      | NQQQQNNNN  | NNNNNQQQQ   | NQQQQQQNN   |
| Frühschläfer         | NQQQQNN  | NNNNNQQQ    | NQQQQQQN    |
| Normalschläfer       | QQQQNNNN   | NNNNQQQQ    | QQQQQQNN    |
| Spätschläfer         | QQQNNNN  | NNNQQQQ     | QQQQQNN     |

### 2.3.3 Ergebnisse

In den Ruhenächten unterschieden sich Früh-, Normal- und Spätschläfer kaum. Lediglich bei der Schlafbewertung gaben Frühschläfer eine geringere Müdigkeit an (Tab. 2.3-4).

#### 2.3.3.1 Intra-individueller Vergleich zwischen Ruhe- und Lärmnächten

Bedingt durch die drei Modelle temporärer Verkehrsruhe und die drei durch unterschiedliche Schlafzeiten definierten Gruppen resultierten neun Expositionsmuster, die sowohl mit Schienen- als auch mit Straßenverkehrslärm realisiert worden waren. In Tabelle 2.3-4 sind für jedes einzelne Expositionsmuster die in bzw. nach den Ruhenächten sowie in bzw. nach den Lärmnächten mit variierender Verkehrsruhe registrierten Parameter des Schlafablaufs und der subjektiven Schlafbewertung aufgelistet. Das jeweilige Expositionsmuster ist im Kopf der Tabelle durch die reale individuelle stündliche Lärmbelastung symbolisiert. Oberhalb jeder Variablen­gruppe ist angegeben, ob für diese – unter Berücksichtigung der jeweiligen Lärmbelastung und der individuellen Schlafzeit – keine Änderung (=) oder eine Beeinträchtigung (↓) gegenüber den Ruhenächten erwartet worden war. Grau bzw. Gelb und Orange hinterlegt sind die in den Lärmnächten mit  $p \leq 0.1$ ,  $0.05$  bzw.  $0.01$  gegenüber den Ruhenächten ermittelten Beeinträchtigungen.

Vier Expositionsmuster begannen mit 3- bis 6-stündiger Ruhe und endeten mit 5- bis 2-stündiger Lärmbelastung (Spalten 4, 6, 7, 9). Für diese Szenarien war keine Beeinträchtigung des Schlafbeginns (Löschen des Lichts bis Ende des ersten Schlafzyklus) erwartet worden, was sich bis auf eine leicht verlängerte Einschlafdauer bestätigte. Die auf den Gesamtschlaf bezogenen physiologischen Parameter und die subjektive Schlafbewertung waren im Vergleich zu den Ruhenächten jedoch – zum Teil hoch signifikant – beeinträchtigt.

Tab. 2.3-4: Temporäre Verkehrsruhe. Intra-individuelle Unterschiede zwischen Ruhenacht und Lärmnächten mit 3 Modellen temporärer Verkehrsruhe bei Personen mit unterschiedlichen Schlafzeiten. Mittelwerte und Standardabweichungen der physiologischen Schlafparameter und der subjektiven Schlafbewertung und der Leistung. **Q**: Ruhe, **N**: Lärm, Wilcoxon-Test (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ )

| Tatsächliche individuelle Lärmbelastung/Stunde | Morgentliche 4-stündige Verkehrsruhe 3-7 Uhr |             |             | Abendliche 4-stündige Verkehrsruhe 23-3 Uhr |             |             | Abendliche 6-stündige Verkehrsruhe 23-5 Uhr |             |             | Ruhenächte Kein Lärm |             |             |      |    |      |    |      |
|--|--|-------------|-------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|------|----|------|----|------|
|  | Normal                                       | Früh        | Spät        | Normal                                      | Früh        | Spät        | Normal                                      | Früh        | Spät        | Normal               | Früh        | Spät        |      |    |      |    |      |
|  | NNNNQQQQ                                     | NNNNNQQQ    | NNNQQQQN    | QQQQNNNN                                    | NQQQQNNN    | QQQNNNNN    | QQQQQQNN                                    | NQQQQQQN    | QQQQQNNN    | QQQQQQQQ             | QQQQQQQQ    | QQQQQQQQ    |      |    |      |    |      |
| AM   | ± SD   | AM          | ± SD        | AM  | ± SD        | AM          | ± SD  | AM          | ± SD        | AM                   | ± SD        | AM          | ± SD | AM | ± SD | AM | ± SD |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b>    |  |             |             |   |             |             |   |             |             |                      |             |             |      |    |      |    |      |
| <b>Schlafbeginn</b>                            | ↓  |             | ↓           |   |             |             | =   |             | ↓           |                      | =           |             |      |    |      |    |      |
| Einschlaf latenz (SOL)                         | 18.8 ±10.0                                   | 28.4 ±16.9  | 38.3 ±23.6  | 14.2 ±8.8                                   | 26.6 ±16.5  | 22.5 ±12.7  | 21.6 ±13.6                                  | 27.3 ±25.7  | 21.4 ±11.2  | 20.2 ±13.5           | 23.0 ±17.5  | 17.2 ±9.1   |      |    |      |    |      |
| Tiefschlaf latenz                              | 19.7 ±9.6                                    | 23.3 ±17.3  | 16.7 ±3.8   | 14.8 ±4.9                                   | 18.1 ±5.6   | 15.7 ±3.5   | 16.8 ±5.5                                   | 20.4 ±7.2   | 16.5 ±4.4   | 16.6 ±6.4            | 17.3 ±6.6   | 14.9 ±4.2   |      |    |      |    |      |
| 1. Schlafzyklus S0&1                           | 7.6 ±4.8                                     | 8.1 ±9.4    | 7.7 ±4.2    | 5.7 ±3.4                                    | 6.1 ±2.7    | 7.2 ±4.1    | 7.6 ±3.3                                    | 7.3 ±2.8    | 7.8 ±4.1    | 7.0 ±3.2             | 5.1 ±2.2    | 5.7 ±4.2    |      |    |      |    |      |
| 1. Schlafzyklus SWS                            | 27.6 ±16.9                                   | 21.2 ±8.6   | 28.5 ±9.3   | 39.8 ±10.5                                  | 30.4 ±11.9  | 35.3 ±16.2  | 38.8 ±13.4                                  | 39.0 ±17.8  | 34.3 ±13.4  | 35.7 ±13.3           | 37.4 ±16.9  | 39.2 ±8.7   |      |    |      |    |      |
| <b>Gesamtschlaf</b>                            | =  | =           | ↓           | ↓   | ↓           | ↓           | ↓   | ↓           | ↓           | ↓                    | ↓           | ↓           |      |    |      |    |      |
| Gesamtschlafzeit                               | 437.9 ±7.7                                   | 430.1 ±16.6 | 406.0 ±31.2 | 438.0 ±13.0                                 | 412.0 ±33.7 | 414.4 ±28.9 | 429.8 ±9.7                                  | 409.5 ±44.4 | 414.1 ±26.4 | 437.8 ±16.8          | 428.7 ±38.2 | 434.4 ±15.9 |      |    |      |    |      |
| Intermittierte Wachzeit                        | 23.3 ±3.6                                    | 21.4 ±8.4   | 35.5 ±14.6  | 27.8 ±15.6                                  | 40.3 ±21.4  | 41.6 ±22.7  | 28.4 ±10.1                                  | 32.0 ±24.6  | 43.7 ±21.5  | 22.0 ±5.5            | 30.5 ±23.8  | 28.1 ±11.3  |      |    |      |    |      |
| SWS (Tiefschlaf)                               | 58.3 ±15.2                                   | 67.0 ±37.3  | 51.3 ±16.6  | 62.8 ±13.8                                  | 68.0 ±28.6  | 57.5 ±18.6  | 55.3 ±18.3                                  | 71.4 ±29.2  | 58.2 ±20.8  | 61.7 ±11.5           | 81.9 ±32.2  | 67.7 ±16.8  |      |    |      |    |      |
| REM-Schlaf                                     | 126.9 ±20.3                                  | 120.8 ±16.5 | 119.2 ±22.5 | 124.6 ±24.0                                 | 108.6 ±15.0 | 117.6 ±22.3 | 121.5 ±18.2                                 | 105.9 ±19.0 | 115.4 ±19.7 | 120.2 ±28.9          | 119.3 ±13.2 | 125.0 ±17.2 |      |    |      |    |      |
| Schlafeffizienz-Index                          | 0.95 ±0.01                                   | 0.95 ±0.02  | 0.92 ±0.04  | 0.94 ±0.03                                  | 0.91 ±0.05  | 0.91 ±0.05  | 0.94 ±0.02                                  | 0.93 ±0.05  | 0.90 ±0.05  | 0.95 ±0.01           | 0.93 ±0.06  | 0.94 ±0.02  |      |    |      |    |      |
| Schlafstörungs-Index                           | -0.17 ±0.52                                  | -0.19 ±0.91 | 0.49 ±0.70  | -0.21 ±0.78                                 | 0.34 ±1.20  | 0.46 ±0.95  | 0.31 ±0.77                                  | 0.14 ±1.33  | 0.64 ±0.70  | -0.27 ±0.68          | -0.32 ±1.25 | -0.24 ±0.97 |      |    |      |    |      |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>              | =  | =           | ↓           | ↓   | ↓           | ↓           | ↓   | ↓           | ↓           | ↓                    | ↓           | ↓           |      |    |      |    |      |
| Subjektive Schlafqualität                      | 36.2 ±8.2                                    | 35.8 ±5.0   | 29.7 ±7.5   | 31.4 ±7.7                                   | 30.6 ±6.0   | 29.9 ±6.5   | 33.8 ±7.3                                   | 30.2 ±8.0   | 30.4 ±3.9   | 39.3 ±6.5            | 40.4 ±5.3   | 35.4 ±5.6   |      |    |      |    |      |
| Müdigkeit                                      | 4.6 ±2.2                                     | 3.3 ±1.6    | 6.0 ±1.9    | 6.2 ±0.9                                    | 4.1 ±2.4    | 6.1 ±2.1    | 5.6 ±1.9                                    | 4.1 ±1.8    | 6.1 ±1.5    | 4.6 ±0.9             | 3.3 ±2.1    | 5.1 ±1.5    |      |    |      |    |      |
|  | <b>1</b>                                     | <b>2</b>    | <b>3</b>    | <b>4</b>                                    | <b>5</b>    | <b>6</b>    | <b>7</b>                                    | <b>8</b>    | <b>9</b>    | <b>10</b>            | <b>11</b>   | <b>12</b>   |      |    |      |    |      |

Zwei Expositionsmuster endeten nach einer initialen 4- bis 5-stündigen Lärmbelastung mit einer 4- bis 5-stündigen Verkehrsruhe (Spalten 1, 2). Hier war der Schlafbeginn deutlich gestört. Einschlaf- und Tiefschlaflatenz sowie die Zeit in S0&1 waren verlängert (aber in nur einem Fall signifikant) und die Tiefschlafzeit im 1. Schlafzyklus signifikant verkürzt. Demgegenüber war aber keiner der auf den Gesamtschlaf bezogenen physiologischen Parameter oder die Schlafbewertung verändert, was auf eine Kompensation hindeutet.

Bei drei Expositionsmustern war die Verkehrsruhe in eine anfängliche und eine abschließende Lärmphase eingeschlossen (Spalten 3, 5, 8). Bis auf eine Ausnahme war in diesen Nächten, wenn auch nicht immer signifikant, der Schlafbeginn durch verlängerte Ein- und Tiefschlaflatenzen, eine längere Zeit in S0&1 sowie durch eine verkürzte Zeit im Tiefschlaf gestört. In diesen Nächten waren darüber hinaus die meisten auf den Gesamtschlaf bezogenen Parameter und die subjektive Schlafbewertung beeinträchtigt.

Prinzipiell ergab der Vergleich der 9 Expositionsmuster (Kap. 2.3.3.1) mit den Ruhenächten, dass Lärmbelastungen am Anfang der Nacht den Schlafbeginn zwar beeinträchtigen, dass diese Störungen sich aber nicht auf die Gesamtstruktur des Schlafs und der subjektiven Bewertung auswirken. Demgegenüber beeinträchtigten Lärmbelastungen am Ende der Nacht sowohl die Struktur des Gesamtschlafs als auch die Schlafbewertung. Deshalb wurden für die folgenden Betrachtungen nur die physiologischen Parameter des Gesamtschlafs, die intermittierte Wachzeit, die Schlafeffizienz und der Schlafstörungsindex sowie die subjektive Bewertung der Schlafqualität und die Einschätzung der Müdigkeit berücksichtigt.

Um die Bedeutung der zeitlichen Position der Verkehrsruhe noch einmal zu verdeutlichen, wurden die 9 Expositionsmuster zu 3 Kategorien zusammengefasst: (1) Lärmeinwirkung zu Beginn, (2) am Ende und (3) zu Beginn und am Ende der Nacht. Die Ergebnisse zeigen Tabelle 2.3-5 und Abbildung 2.3.3. Signifikante Unterschiede gegenüber den jeweiligen

Tab. 2.3-5: Schlafparameter in Nächten mit (1) initialer, (2) in 2 Lärmphasen eingeschlossener und (3) terminaler Verkehrsruhe. Vergleich zu Ruhenächten, Wilcoxon-Test (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ ).

|   | <b>1</b><br><b>Ruhe - Lärm</b> |       | <b>2</b><br><b>Lärm - Ruhe - Lärm</b> |                      | <b>3</b><br><b>Lärm - Ruhe</b> |        |          |
|---|--------------------------------|-------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------|----------|
| Normal                                      | QQQQNNNN<br>QQQQQQNN           |       | Spät                                  | NNNQQQQN             |                                | Normal | NNNNQQQQ |
| Früh  | QQQNNNNN<br>QQQQQNNN           |       | Früh                                  | NQQQQNNN<br>NQQQQQQN |                                | Früh   | NNNNNQQQ |
|   | AM ± SD                        |       | AM ± SD                               |                      | AM ± SD                        |        |          |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b> |                                |       |                                       |                      |                                |        |          |
| Gesamtschlafzeit                            | 423.9                          | ±21.6 | 408.3                                 | ±33.1                | 434.0                          | ±13.1  |          |
| Intermittierte Wachzeit                     | 35.2                           | ±17.1 | 36.1                                  | ±16.7                | 22.3                           | ± 6.3  |          |
| Schlafeffizienz-Index                       | 0.92                           | ±0.04 | 0.92                                  | ±0.04                | 0.95                           | ±0.01  |          |
| Schlafstörungs-Index                        | 0.32                           | ±0.72 | 0.38                                  | ±0.94                | -0.18                          | ±0.72  |          |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>           |                                |       |                                       |                      |                                |        |          |
|   | =                              |       | =                                     |                      | =                              |        |          |
| Subj. Schlafqualität                        | 31.4                           | ± 5.8 | 30.0                                  | ± 6.5                | 36.0                           | ± 6.6  |          |
| Müdigkeit                                   | 6.0                            | ± 1.4 | 5.1                                   | ± 2.0                | 3.9                            | ± 2.0  |          |

Ruhenächten sind entsprechend gekennzeichnet. Diese Darstellung macht deutlich, dass die Verkehrsruhe am Ende der Nacht die größte Entlastung bewirkt. Bei jeder Exposition, bei der am Ende der Nacht eine Lärmeinwirkung stattfindet, ist die Gesamtschlafzeit verkürzt, die intermittierende Wachzeit verlängert, der Schlafeffizienz-Index geringer und der Schlafstörungs-Index höher; die Probanden bewerten ihre Schlafqualität nach solchen Nächten schlechter und sie fühlen sich müder.

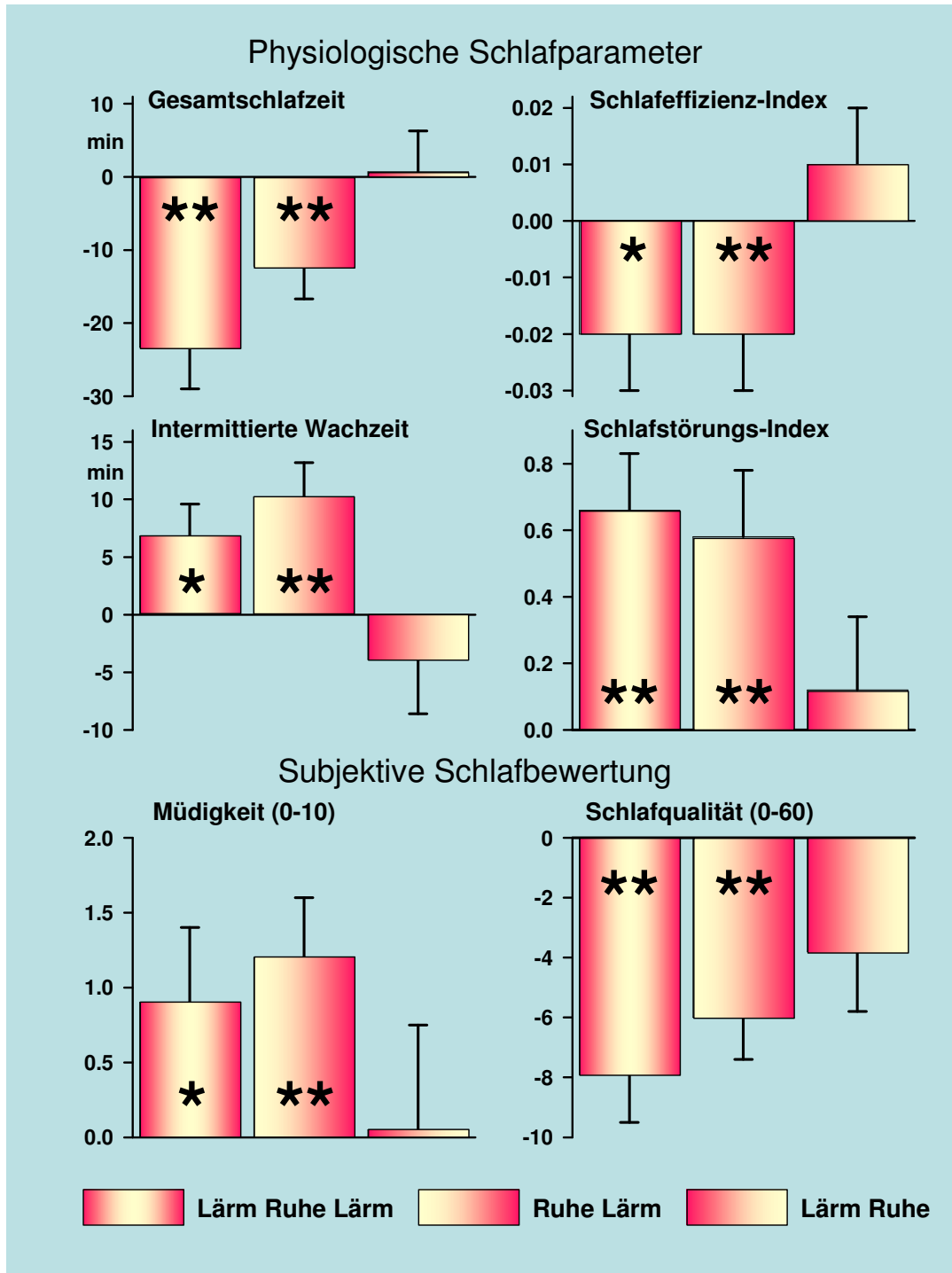


Abb. 2.3-3: Vergleich einzelner Schlafparameter bei Früh-, Normal- und Spätschläfern und unterschiedlich terminierter Verkehrsruhe. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ .



### 2.3.3.2 Schlafverhalten der Früh-, Normal- und Spätschläfer

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse leiten sich im Wesentlichen bereits aus Abschnitt 2.3.3.1 ab. Tabelle 2.3-6 vergleicht die Wirkung der abendlichen mit der morgendlichen Verkehrsruhe auf das Schlafverhalten und die Schlafbewertung der Früh-, Normal- und Spätschläfer. Gelb bzw. grau hinterlegt sind die mit  $p \leq 0.05$  bzw.  $\leq 0.1$  signifikanten Unterschiede.

Bei Früh- und Normalschläfern ist die morgendliche Verkehrsruhe deutlich besser zu bewerten als eine Ruhephase zu Beginn der Nacht. Die intermittierte Wachzeit ist dann kürzer, die Schlafeffizienz höher und der Schlafstörungs-Index niedriger; die Schlafqualität wird höher bewertet und die Müdigkeit geringer eingeschätzt. Bei den Spätschläfern ist der Vorteil der morgendlichen Verkehrsruhe, an die sich eine einstündige erhebliche Lärmbelastung anschloss, auf die Verkürzung der intermittierten Wachzeit beschränkt.

Die gewählten Ruhezeiten orientierten sich am Schlafverhalten des größten Teils der Bevölkerung, weshalb anzunehmen war, dass Normalschläfer hiervon am meisten profitieren. Für Personen mit früheren und mit späteren Schlafzeiten wurden wegen verkürzter bzw. zwischen zwei Lärmphasen eingebetteter Ruhezeiten stärkere Beeinträchtigungen erwartet.

Tabelle 2.3-7 vergleicht das Schlafverhalten der Früh- und der Spätschläfer mit dem der Normalschläfer für die gegensätzlichen Modelle der temporären Verkehrsruhe. Oberhalb der Variablengruppen ist wieder gekennzeichnet, ob bei Früh- oder Spätschläfern im Vergleich zu Normalschläfern keine Abweichungen (=) oder stärkere Beeinträchtigungen (↓) erwartet worden waren.

Tab. 2.3-6: Vergleich abendlicher und morgendlicher Verkehrsruhe. Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) physiologischer Schlafparameter und subjektiver Schlafbewertung. Wilcoxon-Test (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ ).

| Verkehrsruhe<br>Std. Lärmbelastung          | Frühschläfer      |                                      | Normalschläfer    |                                      | Spätschläfer      |                                      |
|---|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
|   | 3-7 h<br>NNNNNQQQ | 23-3 / 23-5h<br>NQQQQNNN<br>NQQQQQQN | 3-7 h<br>NNNNQQQQ | 23-3 / 23-5h<br>QQQQNNNN<br>QQQQQQNN | 3-7 h<br>NNNQQQQN | 23-3 / 23-5h<br>QQQNNNNN<br>QQQQQNNN |
|   | AM ± SD           | AM ± SD                              | AM ± SD           | AM ± SD                              | AM ± SD           | AM ± SD                              |
| <b>Physiologische Schlafparameter (min)</b> |                   |                                      |                   |                                      |                   |                                      |
|   |                   | ↓                                    |                   | ↓                                    |                   | ↓                                    |
| Intermittierte Wachzeit                     | 21.4 ± 8.4        | 36.7 ± 19.7                          | 23.3 ± 3.6        | 27.8 ± 9.1                           | 35.5 ± 14.6       | 42.7 ± 20.4                          |
| Schlafeffizienz-Index                       | 0.95 ± 0.02       | 0.92 ± 0.04                          | 0.95 ± 0.01       | 0.94 ± 0.02                          | 0.92 ± 0.04       | 0.91 ± 0.05                          |
| Schlafstörungs-Index                        | -0.19 ± 0.91      | 0.27 ± 1.17                          | -0.17 ± 0.52      | 0.10 ± 0.60                          | 0.49 ± 0.70       | 0.55 ± 0.79                          |
| <b>Subjektive Schlafbewertung</b>           |                   |                                      |                   |                                      |                   |                                      |
|   |                   | ↓                                    |                   | ↓                                    |                   | ↓                                    |
| Subj. Schlafqualität                        | 35.8 ± 5.0        | 30.3 ± 5.9                           | 36.2 ± 8.2        | 32.6 ± 6.7                           | 29.7 ± 7.5        | 30.2 ± 4.8                           |
| Müdigkeit                                   | 3.3 ± 1.6         | 4.1 ± 1.7                            | 4.6 ± 2.2         | 5.9 ± 1.0                            | 6.0 ± 1.9         | 6.1 ± 1.7                            |

Bei morgendlicher Verkehrsruhe begann die Nacht bei allen Probanden mit mehrstündiger Lärmbelastung. Zwischen Früh- und Normalschläfern, bei denen die Nacht mit einer 3- bzw. 4-stündigen Ruhe endete, ergaben sich keine Unterschiede. Bei Spätschläfern, bei denen die Verkehrsruhe von einer einstündigen Belastung mit hoher Verkehrsdichte gefolgt war, resultierte im Vergleich zu den Normalschläfern eine erhebliche Beeinträchti-

gung der physiologischen Parameter des Schlafablaufs ( $p \leq 0.05$ ) und der subjektiven Schlafbewertung ( $p \leq 0.1$ ).

Tab. 2.3-7: Temporäre Verkehrsruhe. Schlafverhalten von Früh- und Spätschläfern im Vergleich zu Normalschläfern. Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) physiologischer Schlafparameter und subjektiver Schlafbewertung. Wilcoxon-Test (orange:  $p \leq 0.01$ , gelb  $p \leq 0.05$ , grau  $p < 0.1$ ).

|   | <b>Frühschläfer</b>  |            | <b>Normalschläfer</b> |            | <b>Spätschläfer</b>  |            |
|---|----------------------|------------|-----------------------|------------|----------------------|------------|
|   | AM $\pm$ SD          |            | AM $\pm$ SD           |            | AM $\pm$ SD          |            |
| <b>Initiale Lärmbelastung, Verkehrsruhe 3-7 Uhr</b>     |                      |            |                       |            |                      |            |
| Stdl. Lärmbelastung                                     | NNNNNQQQ             |            | NNNNQQQQ              |            | NNNQQQQN             |            |
| <i>Physiologische Schlafparameter (min)</i>             |                      |            |                       |            |                      |            |
|   | =                    |            |                       |            | ↓                    |            |
| Intermittierte Wachzeit                                 | 21.4                 | $\pm 8.4$  | 23.3                  | $\pm 3.6$  | 35.5                 | $\pm 14.6$ |
| Schlafeffizienz-Index                                   | 0.95                 | $\pm 0.02$ | 0.95                  | $\pm 0.01$ | 0.92                 | $\pm 0.04$ |
| Schlafstörungs-Index                                    | -0.19                | $\pm 0.91$ | -0.17                 | $\pm 0.52$ | 0.49                 | $\pm 0.70$ |
| <i>Subjektive Schlafbewertung</i>                       |                      |            |                       |            |                      |            |
|   | =                    |            |                       |            | ↓                    |            |
| Subj. Schlafqualität                                    | 35.8                 | $\pm 5.0$  | 36.2                  | $\pm 8.2$  | 29.7                 | $\pm 7.5$  |
| Müdigkeit   | 3.3                  | $\pm 1.6$  | 4.6                   | $\pm 2.2$  | 6.0                  | $\pm 1.9$  |
| <b>Terminale Lärmbelastung, Verkehrsruhe 23-3/5 Uhr</b> |                      |            |                       |            |                      |            |
| Stdl. Lärmbelastung                                     | NQQQQNNN<br>NQQQQQQN |            | QQQQNNNN<br>QQQQQQNN  |            | QQQNNNNN<br>QQQQQNNN |            |
| <i>Physiologische Schlafparameter (min)</i>             |                      |            |                       |            |                      |            |
|   | =                    |            |                       |            | ↓                    |            |
| Intermittierte Wachzeit                                 | 36.7                 | $\pm 19.7$ | 27.8                  | $\pm 9.1$  | 42.7                 | $\pm 20.4$ |
| Schlafeffizienz-Index                                   | 0.92                 | $\pm 0.04$ | 0.94                  | $\pm 0.02$ | 0.91                 | $\pm 0.05$ |
| Schlafstörungs-Index                                    | 0.27                 | $\pm 1.17$ | 0.10                  | $\pm 0.60$ | 0.55                 | $\pm 0.79$ |
| <i>Subjektive Schlafbewertung</i>                       |                      |            |                       |            |                      |            |
|   | =                    |            |                       |            | ↓                    |            |
| Subj. Schlafqualität                                    | 30.3                 | $\pm 5.9$  | 32.6                  | $\pm 6.7$  | 30.2                 | $\pm 4.8$  |
| Müdigkeit   | 4.1                  | $\pm 1.7$  | 5.9                   | $\pm 1.0$  | 6.1                  | $\pm 1.7$  |

Bei abendlicher Verkehrsruhe konnten Normal- und Spätschläfer ohne Lärmbelastung einschlafen. Bei Letzteren war die Ruhezeit jedoch um eine Stunde verkürzt, was zu einer längeren Zeit im Wachstadium und zu einer geringeren Schlafeffizienz führte. Auch Schlafqualität und Müdigkeit waren in der erwarteten Richtung, jedoch nicht signifikant verändert. Obwohl die Nacht bei Frühschläfern mit einer einstündigen starken Lärmbelastung begann, war deren Schlaf nicht stärker als bei Normalschläfern beeinträchtigt.

Wie erwartet profitierten Normalschläfer von der temporären Ruhe am meisten. Frühschläfer, bei denen die abendliche Verkehrsruhe in zwei Lärmperioden eingebettet und die morgendliche Verkehrsruhe um ein Stunde verkürzt war, waren geringfügig stärker beeinträchtigt als Normalschläfer. Spätschläfer hingegen, bei denen die abendliche Verkehrsruhe verkürzt war und der morgendlichen Verkehrsruhe eine Stunde mit hoher Verkehrsdichte folgte, waren erheblich stärker als Normalschläfer beeinträchtigt.

### 2.3.3.3 Akute Reaktionen auf das Einsetzen von Ruhe bzw. Lärm

Für die abendliche Verkehrsruhe waren 2 Modelle gewählt worden, bei denen die Ruhe jeweils um 23 Uhr einsetzte. Nach der 4-stündigen Verkehrsruhe nahm die Verkehrsdichte langsam zu, nach der 6-stündigen Ruhe setzte abrupt eine hohe Verkehrsdichte ein. Trotz unterschiedlicher Dauer und Verteilung des Lärms ergaben sich keine auf den Gesamtschlaf bezogenen Unterschiede des physiologischen Schlafverhaltens oder der subjektiven Schlafbewertung. Deshalb war zu vermuten, dass die akute Störung bei abrupter Änderung der Verkehrsdichte weit stärker ist als bei gestufter Änderung.

In Tabelle 2.3-8 sind für alle drei Modelle der temporären Verkehrsruhe die Mittelwerte der Schlafstörungsindizes (SSI) für alle Lärm- bzw. alle lärmfreien Stunden errechnet und den für die entsprechenden Zeiten in den Ruhenächten ermittelten SSI als Differenzen gegenüber gestellt. Dabei zeigt sich eine jeweils signifikante Beeinträchtigung (Zunahme des SSI) während der Lärmeinwirkung, die bei der 6-stündigen Verkehrsruhe am stärksten ausfällt. Demgegenüber unterscheiden sich die Ruheperioden der Lärmnächte statistisch nicht signifikant von den entsprechenden Perioden der Ruhenächte. Offensichtlich bleiben lärmbedingte Störungen also auf die unmittelbare Lärmeinwirkung beschränkt. Die negativen Differenzen bei der morgendlichen Verkehrsruhe deuten auf eine mögliche Kompensation lärmbedingter Störungen in der nachfolgenden Ruheperiode hin.

Tab. 2.3-8: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der Differenzen der Schlafstörungsindizes (SSI) der Lärm- (N) und der Ruheperioden (Q) der Lärmnächte (L) und der zeitlich entsprechenden Perioden der Ruhenächte (R). Wilcoxon-Test \*\*\*  $p \leq 0.01$ .

| Verkehrsruhe     | 3-7 Uhr |           | 23-3 Uhr |           | 23-5 Uhr |           |
|------------------|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
|                  | AM      | ± SD      | AM       | ± SD      | AM       | ± SD      |
| SSI NL-Ruhenacht | 0.77    | ±1.07 *** | 0.85     | ±1.25 *** | 1.95     | ±2.43 *** |
| SSI QL-Ruhenacht | -0.27   | ±0.94     | 0.01     | ±1.07     | 0.20     | ±0.67     |

Um die Änderungen des Schlafverhaltens als Reaktion auf die Änderung der Verkehrsdichte unmittelbar zu verfolgen, wurden die SSI für jede fortlaufende Stunde errechnet und über die drei Untergruppen, aber getrennt für die 3 Modelle der Verkehrsruhe gemittelt und mit den zeitlich entsprechenden Werten der Ruhenächte verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.3-9 und in den Abbildungen 2.3-4 und 2.3-5 dargestellt, wobei zu berücksichtigen ist, dass alle Probanden nur im Zeitraum von 0 bis 6 Uhr gleichzeitig im Bett waren und zum Gesamtmittelwert beitrugen.

Bei morgendlicher Verkehrsruhe fiel die Verkehrsdichte ausgehend von 48 bzw. 30 Vorbeifahrten von Straßen- bzw. Schienenfahrzeugen ( $L_{Aeq} = 45$  dB) zwischen 1 und 2 Uhr auf 33/24 ( $L_{Aeq} = 37-40$  dB) und zwischen 2 und 3 Uhr auf 16/10 Vorbeifahrten ( $L_{Aeq} = 34$  dB) ab. Ab 3 Uhr herrschte absolute Verkehrsruhe (28 dB). Die SSI waren bei einer Verkehrsdichte von 33 Straßen- bzw. 24 Schienenfahrzeugen noch signifikant höher als die zur gleichen Zeit in den Ruhenächten bestimmten SSI. Bei einer Häufigkeit von 16 Straßen- bzw. 10 Schienenfahrzeugen mit  $L_{Aeq} = 34$  dB war der Unterschied zur Ruhenacht aber ebenso wenig signifikant wie nach Einsetzen der nachfolgenden Ruhe.



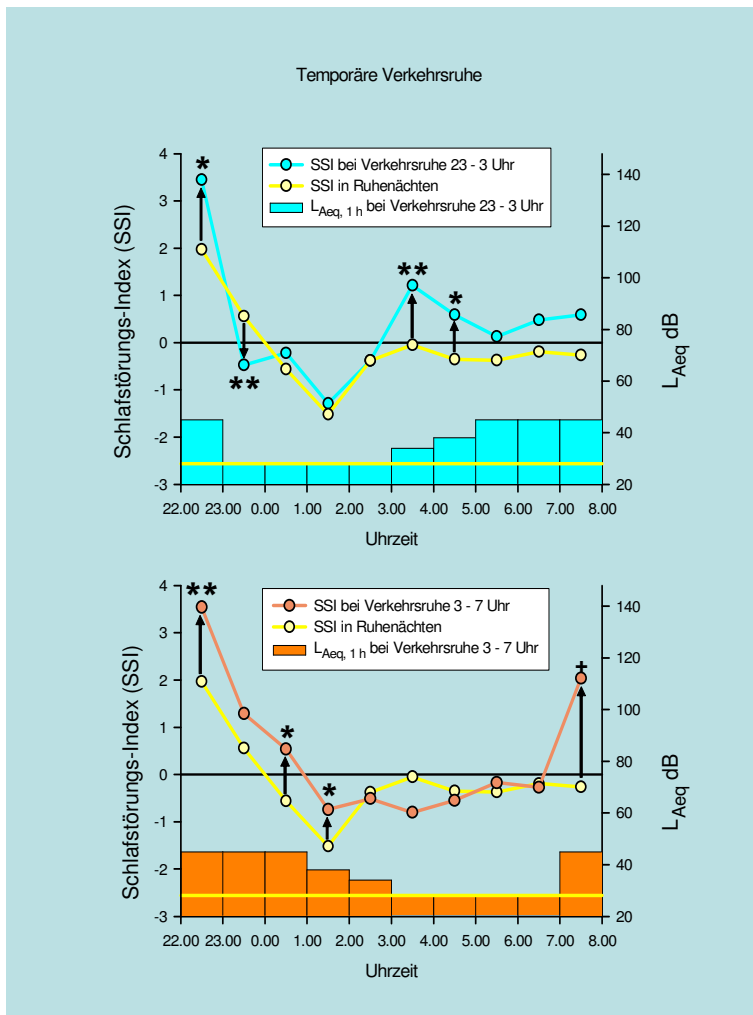


Abb. 2.3-4: Verlauf der stündlichen SSI in den Ruhenächten (gelb) und in Nächten mit 4-stündiger initialer (grün) bzw. terminaler (rot) Verkehrsrufe.

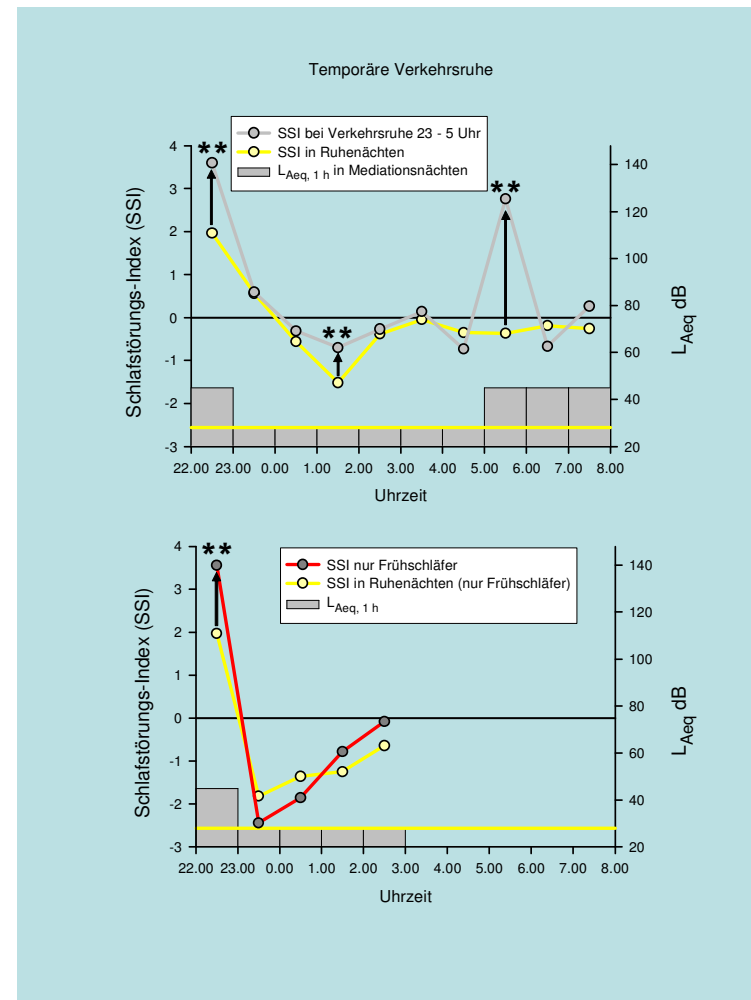


Abb. 2.3-5: Verlauf der stündlichen SSI in den Ruhenächten (gelb) und in Nächten mit 6-stündiger initialer Verkehrsrufe. Oben: Einsetzen der Lärmbelastung um 5 Uhr, unten Einsetzen der Verkehrsrufe um 23 Uhr.

In den Nächten mit 4-stündiger abends beginnender Verkehrsruhe nahm die Verkehrsdichte um 3 Uhr allmählich zu (über die Pegelstufen 34 und 37-40 auf 45 dB(A)). Dies bewirkte in der ersten und in der zweiten Stunde im Vergleich zu den entsprechenden Zeiten der Ruhenächte eine signifikante Zunahme des SSI, die jedoch schon in der dritten Stunde trotz weiter ansteigender Verkehrsdichte nicht mehr nachzuweisen war.

In den Nächten mit abends beginnender 6-stündiger Ruhe setzte um 5 Uhr ein starker Verkehr mit einem  $L_{Aeq} = 45$  dB ein, was einen hoch signifikanten Anstieg des SSI verursachte, der in der nachfolgenden Stunde trotz gleichbleibend hoher Verkehrsdichte aber auf das Niveau der Ruhenächte abfiel (die Berechnung war für die zweite Lärmstunde nur noch für Normal- und Spätschläfer und für die letzte Stunde nur für Spätschläfer möglich).

Der umgekehrte Fall des abrupten Übergangs von dieser hohen Belastung auf eine absolute Verkehrsruhe war nur bei Frühschläfern zu beobachten, die vor der um 23 Uhr beginnenden Verkehrsruhe ins Bett gingen. Bei diesen fiel der unter Lärmbelastung signifikant erhöhte SSI in der nachfolgenden lärmfreien Stunde auf einen sehr niedrigen Wert ab.

### 2.3.4 Diskussion

Schlafstörungen sind für die Anwohner von Verkehrsstraßen, Bahnlinien und Flughäfen die gravierendste Folge des Lärms. Angesichts der vor allem nachts weiter ansteigenden Verkehrsdichte ist eine weitere Zunahme lärmbedingter Schlafstörungen zu erwarten. Dies sind Änderungen der Schlaftiefe bis hin zum Aufwachen, Körperbewegungen, Funktionsänderungen im autonomen Nervensystem sowie Beeinträchtigungen der subjektiv empfundenen Schlafqualität und erhöhte Müdigkeit [Basner et al. 2004, Griefahn 1985, 1986; Griefahn & Gros 1986, Öhrström 1995, 1999].

Zur Reduktion dieser Störungen sind verschiedene Ansätze möglich. Die Behinderung der Schallausbreitung durch Schallschutzwände oder durch schalldämmende Fenster ist gegenüber quellenorientierten konstruktiven Maßnahmen am einzelnen Verkehrsmittel jedoch nachrangig. Von großer Bedeutung und kurzfristig wirksam sind darüber hinaus Maßnahmen der Verkehrslenkung, wozu totale zeitlich begrenzte oder selektive Fahrverbote und Geschwindigkeitsbegrenzungen gehören.

Für temporär begrenzte Ruhezeiten werden sowohl die erste als auch die zweite Hälfte der Nacht erwogen, sowie an Flughäfen 6-stündige Flugverbote für die Zeit von 23 bis 5 Uhr (z. B. Flughafen Frankfurt). Wegen der starr vorgegebenen Zeiten werden mit diesem Ansatz mutmaßlich aber nur Personen mit entsprechendem Schlafverhalten optimal geschützt. Da ein großer Teil der Bevölkerung aber habituell oder aus beruflichen Gründen früher oder später ins Bett geht bzw. früher oder später aufsteht, stellt sich nicht nur die Frage der optimalen Terminierung der Verkehrsruhe, sondern auch ob und in welchem Umfang der Vorteil der limitierten Verkehrsruhe für diese Personen gemindert wird.

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden 3 Modelle mit auf 4 bzw. 6 Stunden begrenzten Ruhezeiten untersucht. Die Eckzeiten orientierten sich am Schlafverhalten des

größten Teils der Erwachsenen, die um 23 Uhr ins Bett gehen und um 7 Uhr aufstehen. An den Versuchen nahmen 8 Personen mit typischem Schlafverhalten teil (Normalschläfer) sowie je 8 Personen, die eine Stunde früher bzw. später ins Bett gehen (Früh- und Spätschläfer), was zu insgesamt 9 Expositionsmustern führte.

Bei der Entwicklung der Verkehrsszenarien wurde davon ausgegangen, dass der in den Ruhezeiten unterbundene Verkehr sich auf die verkehrsoffenen Zeiten verlagert, die dann durch höhere Verkehrsdichten und stärkere akustische Belastungen bestimmt sind. Für die Modelle mit 4-stündiger Verkehrsruhe wurde weiterhin angenommen, dass die Verkehrsdichte allmählich zu- bzw. abnimmt. Bei der 6-stündigen Verkehrsruhe wurde hingegen mit einer abrupt einsetzenden hohen Belastung gerechnet.

Im Vordergrund standen die nachfolgend formulierten Hypothesen. Sie leiten sich aus Labor- und Feldstudien ab, in denen die Häufigkeit von Aufwachreaktionen bei mehr oder weniger gleich über die Nacht verteilten Schallereignissen im Laufe der Nacht allmählich zunahm. Dennoch lassen sich aus diesen Untersuchungen keine Empfehlungen für temporär begrenzte Ruhezeiten ableiten, da bei solchen Expositionsmustern nicht auszuschließen bzw. sogar davon auszugehen ist, dass die Reaktion auf ein bestimmtes Geräusch durch die Reaktion auf vorhergehende Geräusche mitbestimmt ist.

Geprüft wurden folgende Hypothesen:

- Bei abendlicher Verkehrsruhe mit anschließender Lärmbelastung in der zweiten Nachthälfte sind strukturelle Änderungen des Gesamtschlafablaufs und eine entsprechend schlechtere Schlafbewertung zu erwarten.
- Bei anfänglicher Lärmbelastung und nachfolgender Verkehrsruhe kommt es zu Störungen des Schlafbeginns, die in der nachfolgenden lärmfreien Zeit kompensiert werden, so dass weder der Gesamtschlaf noch dessen subjektive Bewertung beeinträchtigt sind.
- Die Ruhezeiten orientierten sich am Schlafverhalten des größten Teils der Bevölkerung. Ein optimaler Schutz war daher nur für Normalschläfer zu erwarten. Die vorgegebenen Ruhezeiten sind bei früheren oder späteren Schlafzeiten verkürzt bzw. in zwei Lärmphasen eingebettet, was eine stärkere Beeinträchtigung bewirkt.
- Das abrupte Einsetzen einer hohen Verkehrsdichte verursacht weit stärkere akute Störungen als eine allmählich zunehmende Verkehrsdichte.

Trotz der geringen Anzahl an Probanden und der großen Zahl von Expositionsmustern bestätigten sich die oben formulierten Hypothesen. Bei abendlicher Verkehrsruhe war der Schlafbeginn nicht beeinträchtigt, die nachfolgende Lärmbelastung verursachte aber strukturelle Änderungen des Gesamtschlafs, die intermittierte Wachzeit war verlängert, die Schlafeffizienz vermindert, ebenso die subjektiv bewertete Schlafqualität.

Am Anfang der Nacht einwirkender Lärm beeinträchtigte die physiologischen Parameter des Schlafbeginns. Einschlaf- und Tiefschlaf latenzen sowie die Zeit im Wachzustand und im Übergangsstadium S1 zwischen Wach und Schlaf (S0&1) waren verlängert. Bei mehr als einstündiger anfänglicher Lärmbelastung kamen signifikante Verkürzungen des Tiefschlafs im ersten Schlafzyklus hinzu. Bei nachfolgender Ruhe waren aber weder die phy-

siologischen Parameter des Gesamtschlafs noch die Bewertung der Schlafqualität oder die Müdigkeit verändert, was auf eine vollständige Kompensation schließen lässt. Hierfür scheint, wie sich bei den Frühschläfern zeigt, eine 3-stündige Ruhe am Ende der Schlafperiode ausreichend zu sein. Der Effekt der morgendlichen Verkehrsrufe war aber stark abgeschwächt, wenn der morgendlichen Verkehrsrufe, wie bei den Spätschläfern eine – wenn auch nur kurze – Lärmbelastung folgte.

Wie erwartet, profitierten die Normalschläfer, an deren Schlafverhalten sich die Ruhezeiten orientierten, von dieser Regelung am meisten. Frühschläfer, bei denen der abendlichen Verkehrsrufe eine einstündige Lärmbelastung voranging und die morgendliche Verkehrsrufe um eine Stunde verkürzt war, waren nur geringfügig stärker beeinträchtigt. Spätschläfer, bei denen die abendliche Verkehrsrufe um eine Stunde verkürzt war und der morgendlichen Verkehrsrufe eine einstündige Lärmbelastung folgte, waren demgegenüber stark beeinträchtigt.

Um die Frage einer schon von Griefahn [1998] und Maschke [1992] postulierten Kompensation zu klären, wurde hier erstmals eine Feinanalyse vorgenommen, wobei die SSI für jede fortlaufende Stunde errechnet wurden. Bei morgendlicher Verkehrsrufe fiel die Verkehrsdichte ab 3 Uhr stufenweise von 48/30 über 33/20 und 16/10 auf 0/0 Vorbeifahrten von Straßen- bzw. Schienenfahrzeugen ab. Da bei 16/10 Vorbeifahrten ebenso wie bei der nachfolgenden Ruhe kein Unterschied zur Ruhenacht bestand ist anzunehmen, dass die Anzahl von 16/10 Vorbeifahrten gerade noch tolerabel ist. In der anschließenden Ruhe-stunde war der SSI – allerdings nicht signifikant – numerisch deutlich kleiner als in den Ruhenächten, was eine Kompensation nahe legt. Andererseits sind schon während der Lärmperiode Adaptationsmechanismen möglich, zumal im umgekehrten Fall bei initialer Ruhe und nachfolgender stufenweise ansteigender Lärmbelastung der SSI nicht größer wird, sondern allmählich abfällt. Dies zeigt sich sogar bei abruptem Einsetzen einer hohen Verkehrsdichte, wobei der SSI in der ersten Stunde zwar stark anstieg, in der nachfolgenden Stunde aber trotz gleich bleibender akustischer Belastung auf das Niveau der Ruhenacht zurück fiel. Im umgekehrten Fall, einer hohen Verkehrsdichte mit unmittelbar nachfolgender völliger Verkehrsrufe, fiel der SSI weit unter das Niveau der Ruhenächte zurück, wobei wegen der hohen Standardabweichung allerdings keine Signifikanz zu konstatieren war. Insgesamt ist also davon auszugehen, dass die häufig beschriebenen geringen strukturellen Veränderungen des Gesamtschlafs im Wesentlichen auf Adaptationsmechanismen zurückzuführen sind, zu denen, wenn der Lärmperiode eine lärmfreie Zeit folgt, auch Kompensationsmechanismen hinzukommen.

### 2.3.5 Schlussfolgerung

Die hier durchgeführte Untersuchung zeigte

- dass eine temporär begrenzte Verkehrsrufe in den Morgenstunden deutlich mehr entlastet als eine Verkehrsrufe in den Abendstunden, wozu wie die Ergebnisse der Frühschläfer zeigen, eine 3-stündige abschließende Verkehrsrufe ausreicht. Obwohl dies auch für Normalschläfer angenommen werden kann, würde die Einführung einer nur 3-stündigen terminalen Verkehrsrufe bei Frühschläfern zu einer Reduktion auf 2 Stunden führen.



Ob dies für eine vollständige Kompensation vorhergehender Schlafstörungen ausreicht, ist jedoch zu prüfen. Jede an die morgendliche Verkehrsruhe anschließende Lärmbelastung reduziert den Effekt der morgendlichen Verkehrsruhe jedoch erheblich.

- Die zeitliche Verteilung der Lärmbelastung ist bedeutsamer als der äquivalente Pegel. Letzterer erweist sich auch hier als nicht geeignet zur Bewertung von Schlafstörungen.
- Während der Einwirkung von Lärm kommt es zur Ausbildung von Adaptationsmechanismen, wobei die Reaktion auf die einzelnen Geräusche allmählich abgeschwächt wird. Bei nachfolgender Verkehrsruhe kommen darüber hinaus auch Kompensationen hinzu.
- Eine Verlängerung der initialen Verkehrsruhe von 4 auf 6 Stunden, wie sie z. B. bei Flughäfen gefordert ist, wenn im Anschluss daran eine hohe Verkehrsdichte folgt, nicht vorteilhafter als eine 4-stündige Verkehrsruhe.

## 2.4 Ereigniskorrelierte kardiale Reaktionen

### 2.4.1 Einleitung

Verkehrslärm ist eine wesentliche Ursache extrinsischer Schlafstörungen mit Nachwirkungen auf Befinden, Leistung und Gesundheit. Die Reaktion auf einzelne Schallereignisse reicht von einfachen K-Komplexen über Änderungen der Schlaftiefe bis hin zum Aufwachen. Bei wiederholter Einwirkung kumulieren diese akuten Reaktionen zu strukturellen Änderungen des Gesamtschlafs. Darüber hinaus verursacht Lärm Erregungen des autonomen (vegetativen) Nervensystems mit mäßigen Steigerungen der Herzschlagfrequenz, des Gefäßwiderstands und des Blutdrucks, sowie u. U. vermehrter Freisetzung von Stresshormonen.

Die Auslöseschwelle vegetativer Reaktionen liegt am Tage zwischen 65 und 70 dB(A), in der Nacht 10 dB(A) niedriger [Jansen 1967, Muzet et al. 1985]. Die Änderung der Herzschlagfrequenz verläuft typischerweise biphasisch. Sie steigt unmittelbar nach Einsetzen des Reizes bis auf ein Maximum in der 3.-5. Sekunde an, fällt dann unter den Ausgangswert ab, um diesen nach einem langsamen Wiederanstieg etwa eine halbe Minute nach Reizbeginn zu erreichen. Die periphere Durchblutung fällt nach kurzer Verzögerung ab, hat ein Minimum nach ca. 8 Sekunden und kehrt dann langsam zum Ausgangswert zurück [Griefahn 1977 a, b]. Diese Reaktionen sind nicht gewöhnungsfähig und werden daher als potenziell pathogen eingestuft.

Das Ausmaß der autonomen Reaktionen ist am Tage sowohl mit dem Schallpegel als auch mit der Bandbreite der einwirkenden Schalle durch Dosis-Wirkungsbeziehungen verknüpft [z. B. Jansen 1967]. Solche Abhängigkeiten sind bei nächtlicher Schalleinwirkung umstritten. Möglicherweise folgen diese Reaktionen dann dem Alles-oder-Nichts-Gesetz [Ehrenschein et al. 1982, Griefahn & Jansen 1975, Jansen 1970, Muzet et al. 1985, Öhrström & Rylander 1990, Tulen et al. 1986, Vallet et al. 1990, Whitehead & Hume 2001]. Die hier durchgeführte Untersuchung konzentrierte sich auf lärmbedingte Änderungen der Herzschlagfrequenz und ging davon aus, dass das Ausmaß der Reaktion mit dem Schallpegel zunimmt, im Tiefschlaf geringer ausfällt und sich im Laufe der Nacht nicht ändert.

### 2.4.2 Material und Methoden

*Probanden.* 24 gesunde Personen (12 Frauen, 12 Männer, 19-28 Jahre) beteiligten sich an der Untersuchung. Sie wurden ca. 10 Tage vor der Experimentalphase mit dem Ziel und dem Ablauf der Untersuchung vertraut gemacht.

*Design.* Nach einer Gewöhnungsnacht von Sonntag auf Montag schliefen die Probanden in drei aufeinander folgenden Wochen jeweils vier aufeinander folgende Nächte (Montagabend bis Freitag früh) im Labor, in wöchentlich permutiertem Wechsel unter der Einwirkung von Flug-, Schienen- bzw. Straßenverkehrslärm. In den vier Nächten jeder Woche

wurde in randomisierter Folge kein Lärm oder Verkehrslärm mit variierenden Maximalpegeln appliziert.

*Akustische Belastung.* Die Geräusche wurden über Lautsprecher abgestrahlt. Um von der Klimaanlage ausgehende Geräusche zu maskieren, wurde in allen Nächten ein Rosa Rauschen mit 32 dB(A) kontinuierlich eingespielt. In den Lärmnächten wurden Flug-, Schienen- bzw. Straßenverkehrsgeräusche zugemischt, wobei 3 Belastungsstufen entsprechend Tabelle 2.4-1 realisiert wurden. Die äquivalenten Pegel variierten zwischen 38 und 50.3 dB(A), die Maximalpegel zwischen 45 und 77 dB(A). Die Lärmszenarien wurden mit gleichem Pegelzeitverlauf, d. h. von 23 bis 1 Uhr mit abnehmender und von 4 bis 7 Uhr mit wieder ansteigender Verkehrsdichte appliziert. Tabelle 2.4-2 zeigt die Häufigkeit der Schallereignisse für jede fortlaufende Stunde.

Tab. 2.4-1: Äquivalente Pegel und Maximalpegel des Schienen-, Straßen- und Luftverkehrslärms während der Experimentalnächte.

| Verkehrsart     | Ereignisse |          |        | Akustische Belastungen |           |                   |                     |                   |                     |
|-----------------|------------|----------|--------|------------------------|-----------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
|                 |            |          |        | Belastungsstufe 1      |           | Belastungsstufe 2 |                     | Belastungsstufe 3 |                     |
|                 |            |          |        | Anzahl                 | Dauer (s) | Intervall (s)     | $L_{Aeq, 8 h}$ (dB) | $L_{Amax}$ (dB)   | $L_{Aeq, 8 h}$ (dB) |
| Straßenverkehr  | 261        | 3.4-51.4 | 25-419 | 38.0                   | 46.1-59.7 | 43.0              | 51.9-65.9           | 49.6              | 58.3-74.0           |
| Schienenverkehr | 162        | 6.0-92.2 | 5-481  | 39.7                   | 45.3-62.3 | 44.4              | 51.0-67.8           | 50.3              | 57.6-74.1           |
| Flugverkehr     | 195        | 7.6-59.0 | 27-326 | 38.9                   | 46.1-65.4 | 44.2              | 51.9-71.1           | 49.7              | 57.8-77.1           |

Tab. 2.4-2: Verkehrsdichte (Anzahl Vorbeifahrten) für jede fortlaufende Stunde.

| Uhrzeit         | 23-24 | 0-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 | 23-7 |
|-----------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Straßenverkehr  | 38    | 32  | 16  | 16  | 16  | 35  | 54  | 54  | 261  |
| Schienenverkehr | 26    | 22  | 10  | 10  | 10  | 24  | 30  | 30  | 162  |
| Flugverkehr     | 32    | 18  | 16  | 16  | 16  | 25  | 36  | 36  | 195  |

*Versuchsablauf.* Zwei Stunden vor dem Ins-Bett-Gehen wurden die Elektroden zur Registrierung des Polysomnogramms (2 EEG, 2 EOG, 1 EMG) und des Elektrokardiogramms fixiert. Die Probanden schliefen in separaten schallisolierten Räumen, in denen die Lufttemperatur auf 20 °C eingestellt war. Um 23 Uhr wurde das Licht gelöscht und mit der Schallapplikation sowie der Registrierung der physiologischen Daten begonnen. Um 7 Uhr wurden die Probanden geweckt.

Zur Darstellung lärminduzierter Änderungen der Herzschlagfrequenz wurde als Ausgangswert der über die Zeitperiode -10 bis -20 Sekunden vor Geräuschbeginn errechnete Mittelwert gewählt. Dieser wurde von den nachfolgenden Herzschlagfrequenzen im Zeitraum von -10 bis +60 Sekunden vor bzw. nach Einsetzen des Schallreizes subtrahiert. Als Geräuschbeginn wurde der Zeitpunkt gewählt, zu dem das Geräusch den Hintergrundpegel von 32 dB(A) überschritt.

Inferenzstatistische Auswertungen erfolgten für die über 5-s-Intervalle gemittelten Verläufe mit ANOVA für Messwiederholungen, die als lineare Modelle mit gemischten Effekten [Littell et al. 1996] mit unstrukturierter Kovarianzmatrix für die betrachteten Einflussfaktoren sowie mit autoregressiver Struktur für den zeitlichen Verlauf berechnet wurden. Bei signifikanter Interaktion von zeitlichem Verlauf mit dem Einflussfaktor wurden mit nachgeschalteten F-Tests (sog. 'simple effects' [Winer 1970]), Zeitintervalle mit signifikant unterschiedlichen Werten für die Faktorausprägungen identifiziert.

### 2.4.3 Ergebnisse

Tabelle 2.4-7 am Ende dieses Kapitels informiert über die Anzahl der Einzelschallereignisse, die für jede der folgenden Berechnungen genutzt wurden. Der poststimulatorische Verlauf der Herzschlagfrequenz war, wie die Abbildungen 2.4-1 und 2.4-2 zeigen, vor allem dadurch bestimmt, ob der auslösende Stimulus eine Aufwachreaktion bewirkte oder nicht. Wegen dieser hochsignifikanten Unterschiede wurden alle weiteren Analysen für beide Fälle getrennt vorgenommen.

Während einer Aufwachreaktion kam es bei allen Geräuscharten zu einem monophasischen Anstieg der Herzschlagfrequenz (Abb. 2.4-1), der offensichtlich schon vor Geräuschbeginn einsetzte und nach 22-27 Sekunden ein um 10-12 Schläge/Minute über dem Ausgangswert liegendes Maximum erreichte. Wegen des anschließenden flacheren Abfalls war der Ausgangswert eine Minute nach Geräuschbeginn noch nicht wieder erreicht.

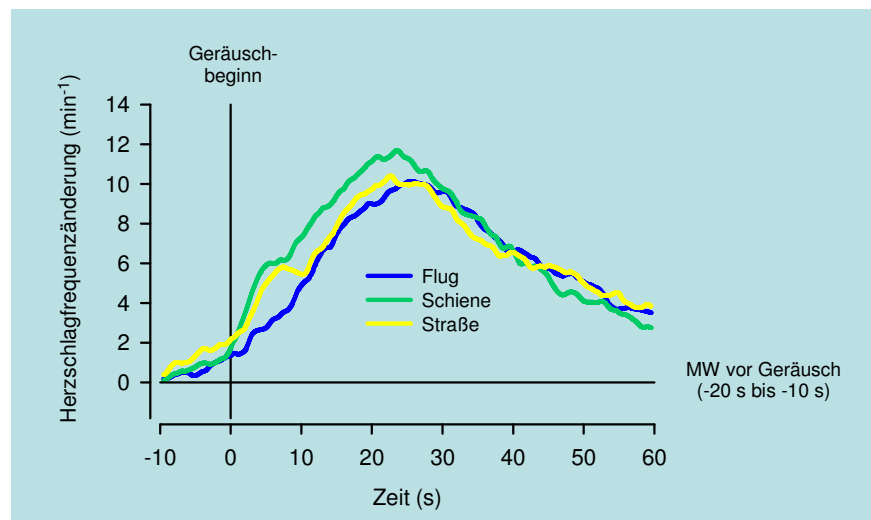


Abb. 2.4-1: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle.

Ohne begleitende Aufwachreaktion lösten alle Geräuscharten biphasische Änderungen aus (Abb. 2.4-1). Die Herzschlagfrequenz stieg unmittelbar nach Reizbeginn an, erreichte nach 4 bis 11 Sekunden das Maximum, das mit durchschnittlich kaum mehr als 1.7 Schläge/Minute deutlich niedriger als während einer Aufwachreaktion war. Die Herzschlagfrequenz fiel danach auf ein unter dem Ausgangswert gelegenes Minimum in der 12.-23. Sekunde ab. Nach einem langsamen Wiederanstieg war die Reaktion nach 30 bis 40 Sekunden beendet.

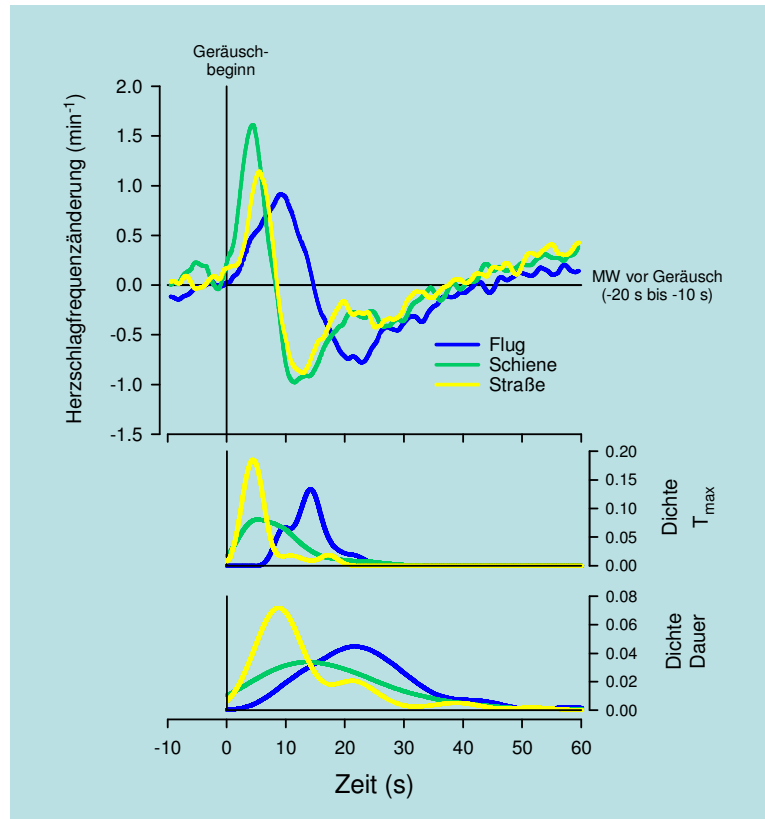


Abb. 2.4-2: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle. Die unteren Bilder zeigen die Wahrscheinlichkeitsdichten von Geräuschdauer bzw. Zeitpunkt des maximalen Geräuschpegels ( $T_{max}$ ).

## Verkehrslärmart

Tabelle 2.4-3 gibt die Ergebnisse einer ANOVA wieder, bei der der Effekt der Geräuschart für Schallereignisse mit und ohne Aufwachreaktion (AWR, Abbn 2.4-1, 2.4-2) sowie für Schallereignisse ohne WAR mit ähnlichem Maximalpegel, ähnlicher Dauer und ähnlicher Pegelanstiegszeit geprüft wurde (Abb. 2.4-3).

Demnach konzentrierten sich die Unterschiede zwischen den Geräuscharten bei begleitender Aufwachreaktion (Abb 2.4-1) im Wesentlichen auf den Anstieg der Herzschlagfrequenzen. Bei Schienenverkehrslärm war dieser Anstieg am steilsten und führte zu den höchsten Werten, bei Fluglärm stieg die Herzschlagfrequenz am langsamsten und auf den geringsten Höchstwert an. Die Unterschiede waren numerisch jedoch unbedeutend.

Ohne gleichzeitiges Aufwachen fiel die Reaktion auf Schienen- und Straßenverkehrsgeräusche ähnlich aus. Der Anstieg war beim Schienenverkehrslärm jedoch steiler und führte zu höheren Maximalwerten in der 5.-6. poststimulatorischen Sekunde. Das konsekutive Minimum war bei beiden Geräuscharten gleich. Als Reaktion auf Überflugeräusche stieg die Herzschlagfrequenz hingegen relativ langsam auf ein erst in der 12. Sekunde gelegenes und deutlich geringeres Maximum an. Nach dem gegenüber den anderen Geräuscharten etwas langsameren Abfall war das Minimum nach ca. 22 Sekunden erreicht.

Tab. 2.4-3: ANOVA-Resultate zum Einfluss der Geräuschart auf den Verlauf der Herzschlagfrequenz mit und ohne Aufwachreaktion (WAR) sowie ohne WAR für Geräusche mit ähnlicher Dauer sowie ähnlichem Zeitpunkt und ähnlicher Höhe des Maximalpegels (matched). \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$ .

| WAR           | Lärmart<br>F(2,46) | Zeit<br>F(13,299) | Lärmart*Zeit<br>F(26,598) | Zeit-Intervalle (s)<br>mit Quellen-Effekt |
|---------------|--------------------|-------------------|---------------------------|---|
| Ja            | 0.28               | 54.32 ***         | 54.32 ***                 | 5-15                                      |
| Nein          | 0.22               | 16.37 ***         | 16.37 ***                 | 0-15; 20-25                               |
| Nein, matched | 4.10 *             | 14.70 ***         | 14.70 ***                 | 5-10; 25-30; 50-60                        |

Abbildung 2.4-2 zeigt als ersten Erklärungsansatz die zeitliche Verteilung der Maxima, die bei Straßen- und bei Schienenverkehrsgeräuschen im Wesentlichen deutlich früher als beim Fluglärm lagen. Die Geräuschkdauer war beim Straßenverkehr am kürzesten, beim Schienen- und beim Flugverkehr breit verteilt, bei letzterem im Mittel aber etwas länger.

Schließlich wurden, basierend auf einer Cluster-Analyse für die Darstellung in Abbildung 2.4-3 nur diejenigen Geräusche ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer Dauer, des Zeitpunkts und der Höhe des Maximalpegels entsprechen. Trotz der durch die geringe Anzahl von Schallereignissen bedingten stark oszillierenden Kurvenverläufe stieg die Herzschlagfrequenz bei Schienenverkehrsgeräuschen auch hier am schnellsten und auf die höchsten Werte an und fiel am steilsten ab. Fluglärm verursachte einen ähnlichen Verlauf mit etwas langsamerem Anstieg und etwas geringerem Maximum. Bei Straßenverkehrsgeräuschen stieg die Herzschlagfrequenz deutlich langsamer auf niedrigere Werte an. Das Minimum war ähnlich aber später erreicht. Die Signifikanz der Unterschiede konzentrierte sich auf die 5. bis 10., die 25. bis 30. sowie die 50. bis 60. poststimulatorische Sekunde.

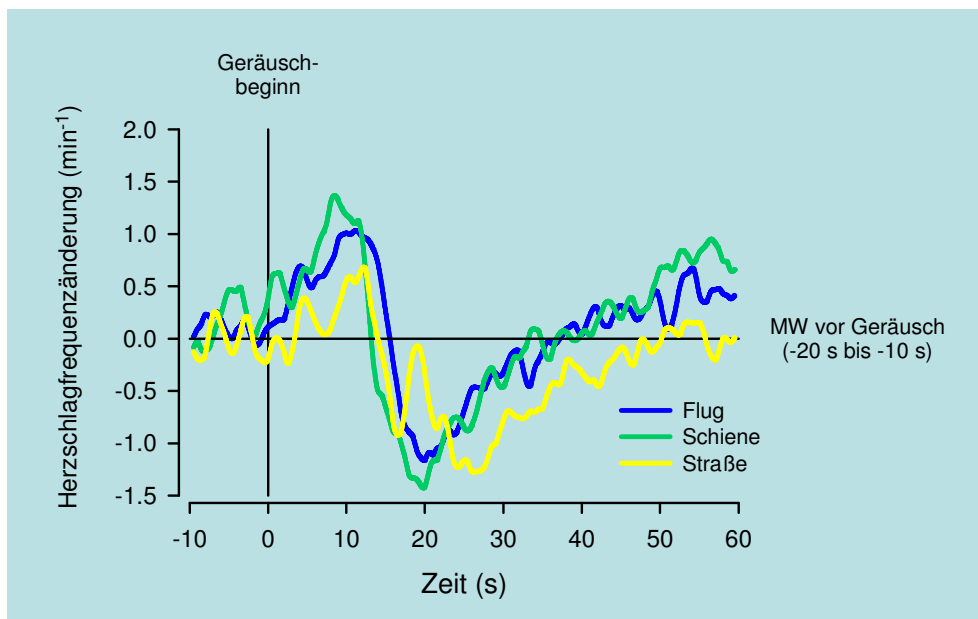


Abb. 2.4-3: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für Geräusche mit ähnlicher Dauer sowie Zeitpunkt und Höhe des maximalen Geräuschpegels.

## Geräuschpegel

Um die Wirkung der Maximalpegel zu bestimmen, wurden diese in 3 Klassen unterteilt ( $L_{Amax} < 50, 50-60, > 60$  dB). Die Änderung der Herzschlagfrequenzen ist in den Abbildungen 2.4-4 und 2.4-5 dargestellt, die statistische Analyse in Tabelle 2.4-4.

Tab. 2.4-4: ANOVA-Resultate zum Einfluss des Maximalpegels auf die Verläufe der Herzschlagfrequenz bei Geräuschen mit/ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$ .

| WAR  | Quelle  | Pegel<br>$F(2,46)$ | Zeit<br>$F(13,299)$ |     | Pegel*Zeit<br>$F(26,598)$ |     | Zeit-Intervalle (s)<br>mit Pegel-Effekt |
|------|---------|--------------------|---------------------|-----|---------------------------|-----|---|
| Ja   | Luft    | 0.02               | 20.02               | *** | 1.88                      | **  | 40-55                                   |
| Ja   | Schiene | 0.97               | 20.95               | *** | 3.01                      | *** | 5-10; 30-45                             |
| Ja   | Straße  | 0.30               | 17.31               | *** | 2.33                      | *** | 15-35                                   |
| Nein | Luft    | 0.42               | 18.75               | *** | 13.57                     | *** | 10-35; 40-45                            |
| Nein | Schiene | 0.23               | 13.19               | *** | 3.30                      | *** | 0-5; 10-20                              |
| Nein | Straße  | 2.85               | 11.91               | *** | 3.50                      | *** | 0-10; 25-40                             |

Bei begleitender Aufwachreaktion (Abb. 2.4-4) war die Änderung der Herzschlagfrequenz weder beim Flug- noch beim Schienenverkehrslärm systematisch mit dem Maximalpegel verknüpft. Beim Straßenverkehrslärm fiel die Zunahme der Herzschlagfrequenz zwischen der 20. und 40. poststimulatorischen Sekunde mit zunehmendem Maximalpegel höher aus.

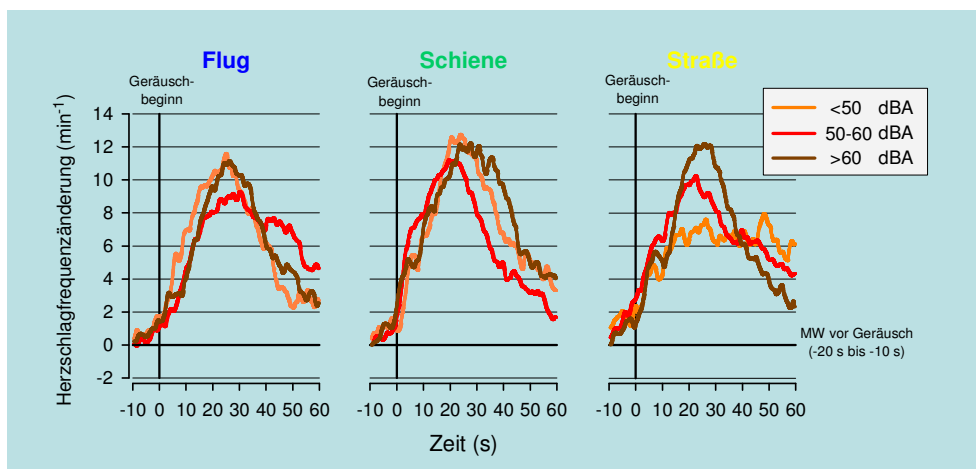


Abb. 2.4-4: Herzschlagfrequenzänderung bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem maximalen Geräuschpegel.

Ohne begleitendes Aufwachen (Abb. 2.4-5) ergab sich eine Interaktion zwischen Pegel und Zeit. Beim Fluglärm stieg die Herzschlagfrequenz bei allen Pegelklassen gleichartig an. Der Anstieg war jedoch umso später beendet, je höher der Maximalpegel war (je später dieser erreicht wurde). Beim Straßenverkehrslärm wurden zunehmend höhere Werte nach einem zunehmend steileren Anstieg der Herzschlagfrequenzen erreicht. Schienenverkehrslärm lösten einen sofortigen und sehr steilen Anstieg der Herzschlagfrequenz aus, der bei allen Pegeln gleich war und zu einem nahezu gleichen Höchstwert führte.

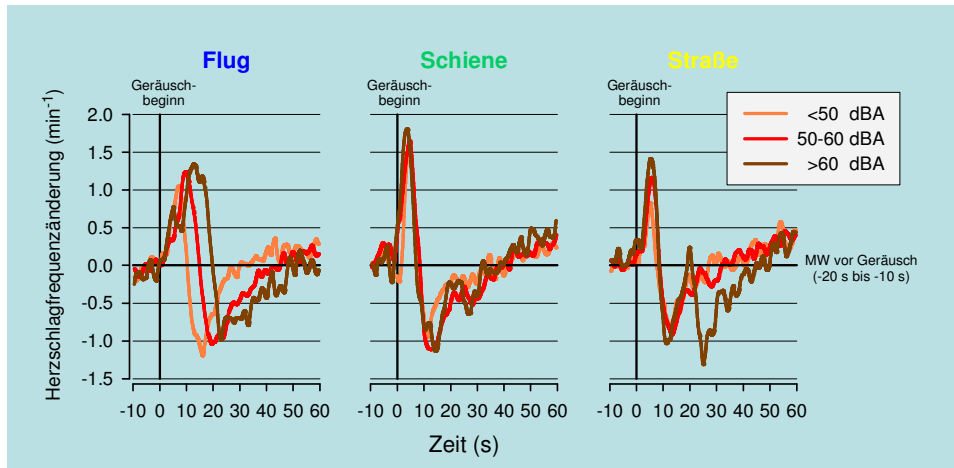


Abb 2.4-5: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem maximalen Geräuschpegel.

## Schlaf tiefe

Der poststimulatorische Verlauf der Herzschlagfrequenz war, wie die Abbildungen 2.4-6 und 2.4-7 sowie Tabelle 2.4-5 zeigen, durch die Schlaf tiefe zum Zeitpunkt der Stimulation bestimmt. Nach dem Aufwachen aus dem REM-Schlaf war die Zunahme der Herzschlagfrequenz am geringsten und nach dem Aufwachen aus dem Tiefschlaf (SWS) am größten.

Ohne begleitendes Aufwachen nahm die Herzschlagfrequenz bei allen Geräuscharten im REM-Schlaf am stärksten und im Tiefschlaf am wenigsten zu. Der konsekutive Abfall war im Tiefschlaf am geringsten und am ausgeprägtesten im Stadium 2. Beim Schienen- und beim Straßenverkehrslärm war das Minimum im REM-Schlaf ähnlich wie im Tiefschlaf, beim Fluglärm hingegen wie im Stadium 2 und von einem langsamen Anstieg bis zum Ausgangswert in der 60. Sekunde gefolgt.

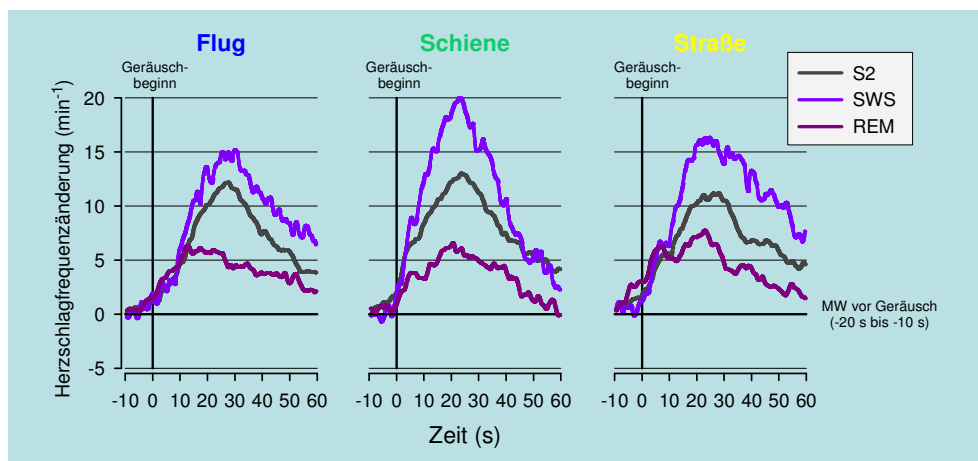


Abb. 2.4-6: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem Schlafstadium vor Geräuschbeginn.



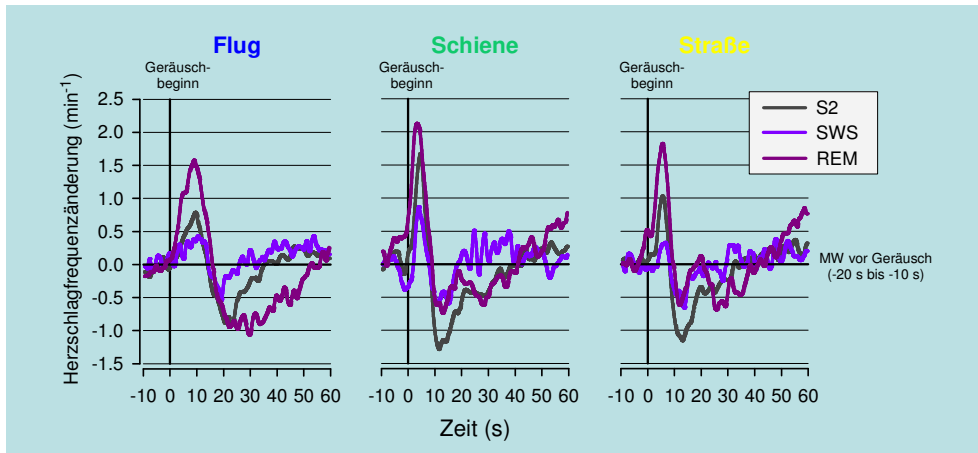


Abb. 2.4-7: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle und dem Schlafstadium vor Geräuschbeginn.

Tab. 2.4-5: Einfluss des Schlafstadiums vor Geräuschbeginn auf den Verlauf der Herzschlagfrequenz mit und ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$ .

| WAR | Quelle  | Stadium<br>$F(2,46)$ | Zeit<br>$F(13,299)$ | Stadium*Zeit<br>$F(26,598)$ | Zeit-Intervalle (s)<br>mit Pegel-Effekt |
|-----|---------|----------------------|---------------------|-----------------------------|---|
| Ja  | Luft    | 7.55 **              | 10.24 ***           | 2.99 ***                    | 15-50; 55-60                            |
| Ja  | Schiene | 15.10 ***            | 15.28 ***           | 2.19 ***                    | 5-60                                    |
| Ja  | Straße  | 9.79 ***             | 12.42 ***           | 3.53 ***                    | 15-60                                   |
| Ja  | Luft    | 2.41                 | 20.08 ***           | 5.18 ***                    | 0-15; 20-50                             |
| Ja  | Schiene | 4.13 *               | 11.79 ***           | 4.28 ***                    | -5-40; 55-60                            |
| Ja  | Straße  | 6.88 **              | 10.98 ***           | 4.57 ***                    | 0-20; 25-35; 50-60                      |

### Verstrichene Schlafzeit

Die Abbildungen 2.4-8 und 2.4-9 zeigen die Änderungen der Herzschlagfrequenz für die drei Geräuschmodalitäten gemittelt über die Schallreize der ersten 5 sowie der nachfolgenden 3 Stunden (gleiche Anzahl von Schallereignissen), Tabelle 2.4-6 zeigt die Ergebnisse der statistischen Analyse.

Tab. 2.4-6: ANOVA-Resultate zum Einfluss der Versuchsdauer auf die HSF-Verläufe bei Geräuschen mit und ohne WAR für die verschiedenen Geräuschquellen. \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$ .

| AWR  | Quelle  | Versuchszeit<br>$F(1,23)$ | Zeit<br>$F(13,299)$ | Versuchszeit*Zeit<br>$F(13,598)$ | Zeit-Intervalle (s)<br>mit Versuchszeit-Effekt |
|------|---------|---------------------------|---------------------|----------------------------------|--|
| Ja   | Luft    | 1.42                      | 18.70 ***           | 1.84 *                           | 20-25; 30-35                                   |
| Ja   | Schiene | 2.19                      | 23.22 ***           | 1.60                             | -  |
| Ja   | Straße  | 0.78                      | 20.42 ***           | 1.60                             | -  |
| Nein | Luft    | 0.19                      | 23.05 ***           | 4.48 ***                         | 10-20  |
| Nein | Schiene | 5.32 ***                  | 12.79 ***           | 3.09 ***                         | 5-10; 50-60                                    |
| Nein | Straße  | 0.17                      | 11.31 ***           | 4.17 ***                         | 5-10; 30-40; 50-60                             |

Bei begleitender ebenso wie bei ausbleibender Aufwachreaktion war die Reizantwort beim Fluglärm gegen Ende der Nacht etwas stärker, bei den anderen beiden Geräuscharten bestanden jedoch keine Unterschiede.

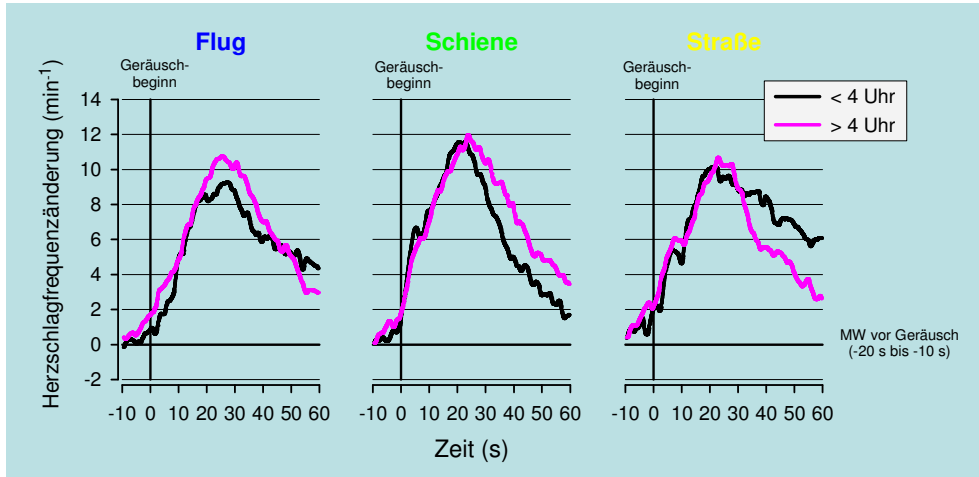


Abb. 2.4-8: Änderung der Herzschlagfrequenz bei lärminduzierter Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für den ersten und zweiten Teil der Nacht.

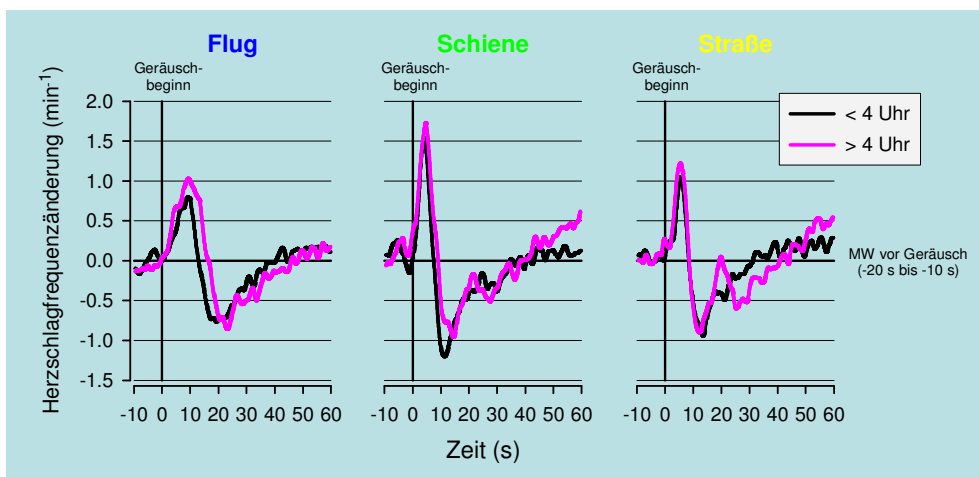


Abb. 2.4-9: Änderung der Herzschlagfrequenz ohne nachfolgende Aufwachreaktion in Abhängigkeit von der Geräuschquelle für den ersten und zweiten Teil der Nacht.

## 2.4.4 Diskussion

Stimuli, die gleichzeitig eine Aufwachreaktion bewirkten, verursachten monophasische, mehr als eine Minute anhaltende Anstiege der Herzschlagfrequenz mit einem Maximum von 10-12 Schlägen/Minute in der 22.-27. poststimulatorischen Sekunde. Der starke Anstieg der Herzschlagfrequenz entspricht den Beobachtungen, wonach Aufwachen mit sympathischer Erregung und einem Anstieg der Cortisolproduktion einhergeht [z. B. Hucklebridge et al. 2000]. Der schon vor dem Einsetzen der Schallreize beginnende Anstieg könnte darauf hindeuten, dass Aufwachreaktionen vorzugsweise nur dann verursacht werden, wenn zum Zeitpunkt der Reizung eine sympathische Erregung (autonomes Arousal) vorliegt.

Das Ausmaß dieser Reaktion war durch Maximalpegel und Geräuschart nur wenig beeinflusst. Einen hoch signifikanten Einfluss hat hingegen die Schlaftiefe, aus der heraus das Aufwachen erfolgte. Die stärkste Zunahme der Herzschlagfrequenz fand sich beim Aufwachen aus dem Tiefschlaf, die geringste beim Aufwachen aus dem REM-Schlaf. Dies entspricht dem Ausmaß der Erregungszunahme, die beim Aufwachen aus dem Tiefschlaf am größten ist.

Schallreize, die nicht zum Aufwachen führten, lösten biphasische Änderungen der Herzschlagfrequenz aus, wobei die initiale Beschleunigung von einem Abfall unter den Ausgangswert und einem langsamen Wiederanstieg zu den prästimulatorischen Werten gefolgt war. Die initiale Beschleunigung ist die Folge einer vagalen Hemmung, die konsekutive Verlangsamung Ausdruck einer Gegenregulation und wird durch Zunahme der vagalen, bei gleichzeitiger Hemmung der sympathischen Innervation bewirkt [Griefahn 1975, 1977, 1989].

Die Bedeutung dieser Reaktion ist heute allerdings ebenso wenig bekannt wie zu Beginn der 80er Jahre als Muzet [1983] schrieb, dass 'cardiovascular responses are particularly dangerous as they do not habituate, they are purely reflexes and they do not correspond to any energetic need of the sleeping body.' Da diese Reaktionen, wie sich auch hier bestätigte, nicht gewöhnungsfähig sind, wird ihnen ein pathogenes Potenzial zugeschrieben.

Die Zunahme der Herzschlagfrequenz war mit durchschnittlich weniger als 2 Schlägen/min allerdings sehr gering, ebenso der konsekutive Abfall um durchschnittlich 2-3 Schläge je Minute. In der Literatur variieren die Angaben über das Ausmaß dieser Reaktionen erheblich, was vor allem durch unterschiedliche Auswerteverfahren begründet ist. So bestimmten Muzet et al. [1980] z. B. die Differenz zwischen den poststimulatorischen, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls auftretenden Maxima und Minima. Sie errechneten einen Mittelwert von 2 bis 5 Schlägen pro Minute, was der hier beobachteten Reaktion mit einer durchschnittlichen Differenz von 2.5 bis 3 Schlägen pro Minute nahe kommt. In späteren Arbeiten wurden nur Differenzen von mindestens 8-10 Schlägen als Reaktion gewertet [z. B. Di Nisi 1987, Muzet et al. 1985, Whitehead & Hume 2001]. In dieser Untersuchung wurde hingegen jeder poststimulatorische Verlauf unabhängig von dessen Abweichung gegenüber der prästimulatorischen Phase berücksichtigt und es wurden zeitsynchrone Mittelwerte gebildet. Darüber hinaus wurde hier erstmals der unterschiedliche Verlauf bei begleitender und ausbleibender Aufwachreaktion durch getrennte Analysen berücksichtigt.

Auch diese Untersuchung zeigte keine Gewöhnungseffekte. Das Ausmaß der Reaktion nahm beim Fluglärm im Laufe der Nacht sogar – wenn auch minimal – zu. Dies ist im Wesentlichen mit der Schlaftiefe zum Zeitpunkt der Stimulation zu erklären. Wie in anderen einschlägigen Untersuchungen war die Reaktion im Tiefschlaf deutlich geringer als im REM-Schlaf und im Stadium S2. Da die beiden letztgenannten Stadien aber vermehrt in der zweiten Nachthälfte auftreten, muss die Reaktion dann entsprechend stärker ausfallen [Griefahn 1975, 1977, 1989; Hume & Whitehead 2004, Muzet et al. 1980, 1985].

## **Einfluss der Geräuschart**

In der vorliegenden Untersuchung bewirkten Schienenverkehrsgeräusche deutlich stärkere Änderungen der Herzschlagfrequenz als Flug- und Straßenverkehrsgeräusche. Schienenverkehrsgeräusche provozierten unmittelbar nach dem Einsetzen des Schalls den steilsten Anstieg der Herzschlagfrequenz auf die höchsten Werte, die im Mittel allerdings weniger als 2 Schläge/Minute betragen. Diese Reaktion war vom Maximalpegel kaum beeinflusst.

Bestätigt werden diese Ergebnisse durch wenige Experimentalstudien, in denen die vegetative Reaktion auf Schienenverkehrsgeräusche ebenfalls stärker ausfiel als auf Überfluggeräusche und Straßenverkehrsgeräusche [Di Nisi 1987, Hofman et al. 1993, Muzet et al. 1985].

Die unterschiedliche Reaktion auf die einzelnen Verkehrslärmarten ist im Wesentlichen auf deren physikalische Parameter zurückzuführen, wobei die Pegelanstiegszeit und die Dauer den wohl stärksten Einfluss haben. Die schon in früheren Untersuchungen beschriebene inverse Beziehung zwischen der Pegelanstiegszeit und dem Ausmaß der Reaktion [Griefahn 1975, 1977, 1989; Vetter & Horvath 1962] bestätigte sich hier sehr deutlich. Die Geräusche mit kürzerer Pegelanstiegszeit (Schienen- und Straßenverkehrsgeräusche) verursachten die steilsten Anstiege der Herzschlagfrequenz auf die höchsten Werte, wohingegen Fluglärm mit der längsten Pegelanstiegszeit einen länger dauernden Anstieg auf geringere Höchstwerte verursachte. Die inverse Beziehung zwischen Pegelanstiegszeit und Reaktionsausmaß deutet auf unmittelbar nach Reizbeginn einsetzende Adaptationsprozesse hin, die bei langsam ansteigendem Schalldruck die maximal mögliche Reaktion verhindern und bei extrem kurzer Anstiegszeit nicht zum Tragen kommen [Griefahn 1976], wobei in letzterem Fall eine Alles-oder-Nichts-Reaktion, wie sie vor allem beim Schienenverkehrslärm vorzuliegen scheint, erwartet werden kann.

## **Einfluss des Maximalpegels**

Insgesamt war der Einfluss des Maximalpegels auf den Anstieg der Herzschlagfrequenz sehr gering. Der Unterschied der Zunahme zwischen niedrigster und höchster Pegelstufe betrug bei Schienenverkehrsgeräuschen 0.2, bei Fluglärm 0.3 und bei Straßenverkehrsgeräuschen 0.6 Schläge/Minute. Die Signifikanz dieser Unterschiede ist im Wesentlichen wohl nur durch die hohe Anzahl der beobachteten Ereignisse (1 591 – 6 015) erzielt worden, weshalb die hier erhaltenen Ergebnisse keineswegs im Widerspruch zu früheren Untersuchungen stehen, in denen keine mit dem Maximalpegel assoziierten Unterschiede ermittelt wurden [Griefahn & Jansen 1975, Hume & Whitehead 2004, Tulen et al. 1986]. Lediglich Muzet et al. [1980, 1985] berichteten über mit dem Pegel zunehmende autonome Reaktionen.

Die geringsten Unterschiede ergaben sich bezüglich des Schienenverkehrslärms. Die Ursache hierfür ist in erster Linie wohl wiederum die Pegelanstiegszeit, auf die der Organismus am ehesten nach dem Alles-oder-Nichts-Gesetz reagiert [Griefahn 1975, 1977, 1989].

Beim Fluglärm stiegen die Pegel relativ langsam an, wobei höhere Maximalpegel längere Anstiegszeiten hatten und damit zu höheren Herzschlagfrequenzen führten.

## 2.4.5 Schlussfolgerung

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden die Wirkungen der vom Schienen-, Straßen- und Flugverkehr emittierten Geräusche, die mit Maximalpegeln zwischen 45 und 77 dB(A) während der Nacht appliziert worden waren, bezüglich ereigniskorrelierter Änderungen der Herzschlagfrequenz untersucht.

Ausmaß und Verlauf der kardialen Reaktion waren im Wesentlichen dadurch bestimmt, ob der auslösende Stimulus gleichzeitig eine Aufwachreaktion verursachte oder nicht. Bei begleitender Aufwachreaktion resultierte ein monophasischer Verlauf mit einer mehr als eine Minute anhaltenden Zunahme der Herzschlagfrequenz um bis zu 12 Schläge/Minute. Die Reaktion war nur sehr mäßig durch die Art und die physikalischen Parameter der Geräusche bestimmt. Die Schlaftiefe zum Zeitpunkt der Stimulation war hingegen entscheidend, Aufwachen aus dem Tiefschlaf führte zur stärksten, Aufwachen aus dem REM-Schlaf zur geringsten Zunahme der Herzschlagfrequenz.

Ohne begleitendes Aufwachen zeigte sich ein biphasischer Verlauf. Die Herzschlagfrequenz stieg unmittelbar nach Einsetzen der Geräusche an, erreichte nach 4-11 Sekunden das Maximum, an das sich eine Verlangsamung bis unter den prästimulatorischen Ausgangswert mit einem Minimum nach 12-20 Sekunden und ein langsamer Wiederanstieg anschloss. Sowohl die Zu- als auch die Abnahme waren mit durchschnittlich +1.5 bzw. -1 Schlag/Minute numerisch sehr gering. Das Ausmaß der Reaktion ist in erster Linie durch die Geräuschart bestimmt, wobei Schienenverkehrslärm die größte und Flugverkehrslärm die geringste Änderung verursachte. Der Maximalpegel hatte einen nur mäßigen, die Schlafstufe zum Zeitpunkt der Reizung einen signifikanten Einfluss; im REM-Schlaf war die Reaktion deutlich am stärksten und im Tiefschlaf nur schwach ausgeprägt.

Für keine dieser beiden Reaktionsformen ließ sich, in Übereinstimmung mit der Literatur, eine Gewöhnungstendenz sichern. Ob die daraus abgeleitete Einschätzung, dass diese Reaktionen letztlich pathogen wirken, zutrifft, ist in künftigen Studien zu klären. Trifft diese Annahme zu, so gilt dies primär für die monophasische, bei gleichzeitigem Aufwachen beobachtete Reaktion als stärksten Ausdruck zerebraler und sympatotoner Erregung und bestätigt die Autoren, die ihre Konzepte zum Schutz der Anwohner gegen den Lärm auf lärmbedingte Aufwachreaktionen gründen (z. B. Basner et al. 2004, 2005, Griefahn et al. 2004).

Tab. 2.4-7: Anzahl von Einzelschallereignissen für die einzelnen Berechnungen.

|   | Fluglärm |          |        | Schienenverkehr |          |        | Straßenverkehr |          |        |
|---|----------|----------|--------|-----------------|----------|--------|----------------|----------|--------|
| Anzahl der Schallereignisse bei gleichzeitigem Aufwachen                              |          |          |        |                 |          |        |                |          |        |
| $L_{Amax}$  | < 50 dB  | 50-60 dB | >60 dB | < 50 dB         | 50-60 dB | >60 dB | < 50 dB        | 50-60 dB | >60 dB |
|   | 183      | 466      | 361    | 198             | 445      | 294    | 172            | 452      | 411    |
| Stadium   | S2       | SWS      | REM    | S2              | SWS      | REM    | S2             | SWS      | REM    |
|   | 596      | 84       | 310    | 585             | 85       | 267    | 594            | 98       | 343    |
| Uhrzeit   | < 4 Uhr  | > 4 Uhr  |        | < 4 Uhr         | > 4 Uhr  |        | < 4 Uhr        | > 4 Uhr  |        |
|   | 391      | 600      |        | 363             | 574      |        | 361            | 674      |        |
| Anzahl der Schallereignisse ohne begleitendes Aufwachen                               |          |          |        |                 |          |        |                |          |        |
| $L_{Amax}$  | < 50 dB  | 50-60 dB | >60 dB | < 50 dB         | 50-60 dB | >60 dB | < 50 dB        | 50-60 dB | >60 dB |
|   | 2791     | 5280     | 2136   | 2746            | 3588     | 1591   | 2572           | 6015     | 2846   |
| Stadium   | S2       | SWS      | REM    | S2              | SWS      | REM    | S2             | SWS      | REM    |
|   | 5760     | 1719     | 2728   | 4493            | 1318     | 2114   | 6287           | 1859     | 3287   |
| Uhrzeit   | < 4 Uhr  | > 4 Uhr  |        | < 4 Uhr         | > 4 Uhr  |        | < 4 Uhr        | > 4 Uhr  |        |
|   | 5095     | 5112     |        | 3769            | 3768     |        | 5248           | 6186     |        |
| Geräusche mit ähnlicher Dauer, ähnlicher Höhe und Lage (Anstiegssteilheit) der Maxima |          |          |        |                 |          |        |                |          |        |
| gesamt  | 1378     |          |        | 904             |          |        | 1350           |          |        |

## 2.5 Leistung und ereigniskorrelierte Hirnpotentiale

### 2.5.1 Einleitung

Nächtlicher Verkehrslärm kann zu Schlafstörungen und in deren Folge zur Beeinträchtigung von Befinden und Leistung führen. Da Untersuchungen des Leistungsverhaltens nach lärmbedingten Schlafstörungen inkonsistente Ergebnisse erbrachten, fokussierte die hier durchgeführte Untersuchung, die im Frontalhirn lokalisierten exekutiven Funktionen (Abb. 2.5-1), die nicht nur nach vollständiger, sondern bereits partieller Schlafdeprivation beeinträchtigt sind [Muzur et al. 2002, Jones & Harrison 2001].

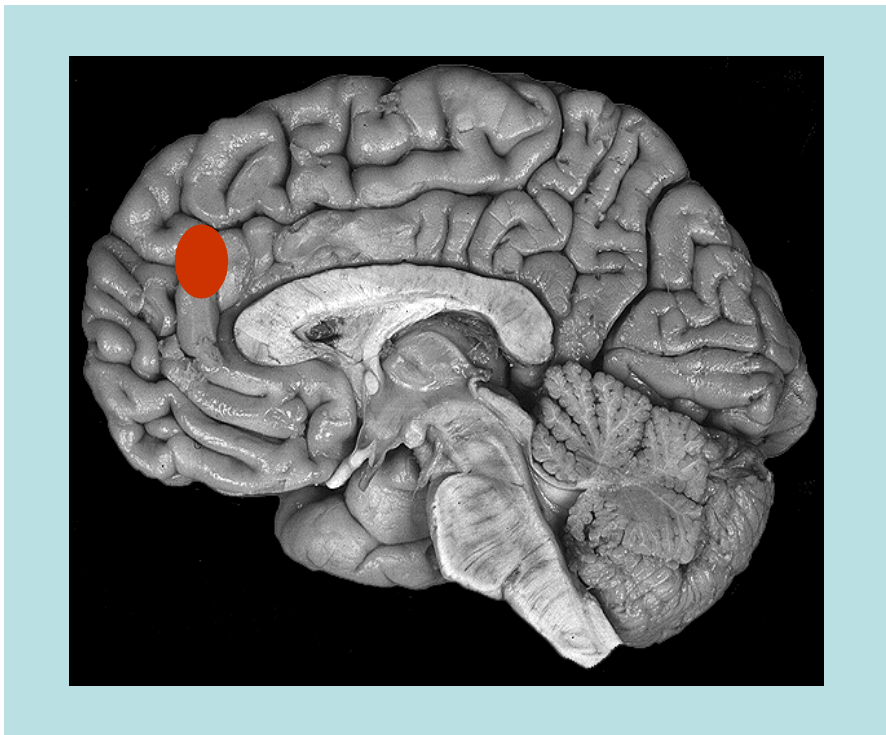


Abb. 2.5-1: Ursprung exekutiver Funktionen im Frontalhirn.

Die Beeinträchtigung exekutiver Funktionen lässt sich mit ereigniskorrelierten Potentialen nachweisen. Dies sind durch äußere oder innere Stimuli provozierte Veränderungen im Hirnstrombild, die durch bestimmte, in Abbildung 2.5-2 gezeigte Wellenformationen charakterisiert sind. Für die vorliegende Untersuchung bedeutsam ist die negative Komponente N2 und die nachfolgende positive Komponente P3, die das *elektrophysiologische Korrelat eines psychischen Vorgangs* widerspiegeln [Seifert 2005]. Am intensivsten untersucht ist die P3 (auch P3b, P300), die nach Verleger [1997] die antwortbezogene Erkennung aufgabenrelevanter Reize widerspiegelt. Diese Komponenten ändern sich nach fragmentiertem Schlaf sowie nach kurzzeitiger Schlafdeprivation in typischer Weise, wobei die Amplitude abnimmt und/oder die Latenz verlängert ist [Morris et al. 1992, Kingshott et al. 2000]. Mittels der so bestimmten ereigniskorrelierten Potentiale (EKPs) lassen sich Leistungsbeeinträchtigungen bereits auf neuronaler Ebene erfassen, ohne dass diese tatsächlich zu realen Leistungsbeeinträchtigungen führen müssen.

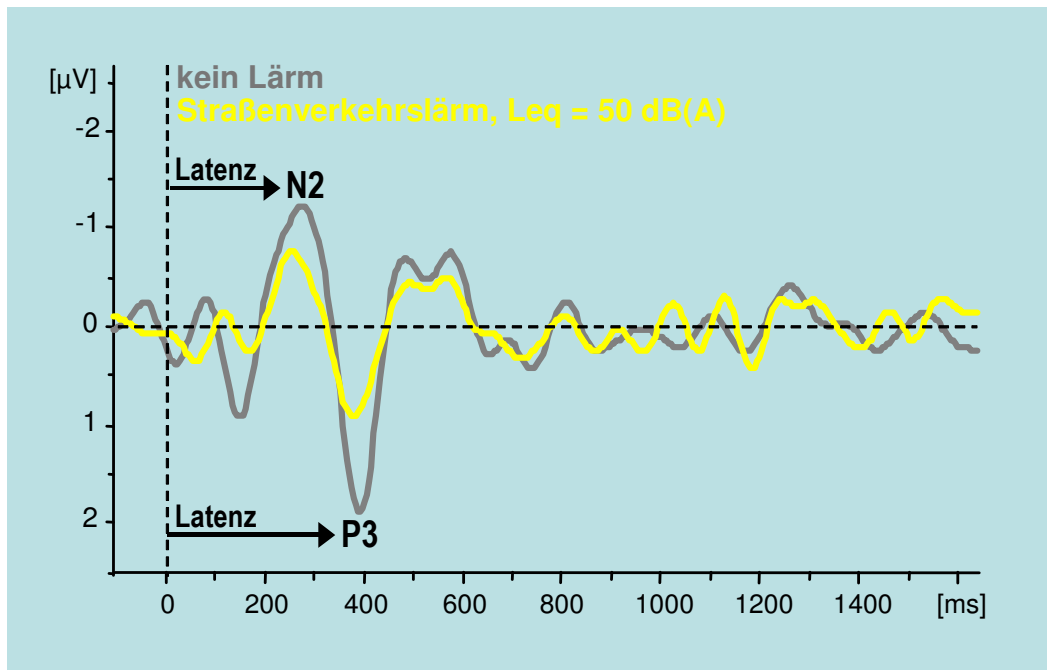


Abb. 2.5-2: Ereigniskorrelierte Potenziale

Für die hier analysierte Untersuchung stellt sich die Frage, ob die durch nächtlichen Lärm verursachten, eher moderaten Schlafstörungen bereits auf das exekutive System und dabei vor allem auf inhibitorische Funktionen wirken. Um dies zu untersuchen, wurde eine Go-/Nogo Aufgabe durchgeführt, bei der auf einen bestimmten visuellen Reiz hin eine motorische Reaktion ausgeführt (Go) oder unterdrückt (Nogo) werden muss. Von den während der Ausübung dieser Aufgabe abgeleiteten Hirnströmen wurden sowohl die N2 als auch die P3 Komponente untersucht.

Während die Nogo-N2 eine prämotorische Inhibitionsaktivität widerspiegelt [Kok 1999], repräsentiert die Nogo-P3 den eigentlichen motorischen Inhibitionsprozess [Burle et al. 2004]. Die Go-P3 entspricht der antwortbezogenen Registrierung aufgabenrelevanter Reize. Es wurde davon ausgegangen, dass nächtliche Lärmbelastungen vor allem inhibitorische Funktionen insbesondere bei inkompatiblen Reizen (Reiz und Reaktion sind nicht kompatibel) beeinträchtigen und damit zu verlängerter Latenz und reduzierter Amplitude von Nogo-N2 und Nogo-P3 führen. Als weiterer Indikator der mentalen Beanspruchung während der Go-/Nogo-Aufgabe wurde zusätzlich die Lidschlussfrequenz (Blinkrate) registriert [z.B. Richter et al. 1998].

## 2.5.2 Material und Methoden

Um diese Annahmen zu prüfen, wurden alle im Arbeitspaket 1 'Vergleichende Bewertung von Schienen-, Straßen- und Flugverkehr und deren Wirkung auf das Schlafverhalten' (Kap. 2.1) nach nächtlicher Belastung mit Schienenverkehr durchgeführten Go-/Nogo-Aufgaben analysiert. Da die Aufzeichnungen von zwei männlichen Teilnehmern wegen technischer Probleme bei der EEG-Aufzeichnung nicht genutzt werden konnten, standen für diese Auswertung die Daten aus je 4 Go-/Nogo-Tests von 12 Frauen und 10 Männern zur Verfügung. Die 4 Tests waren nach jeweils einer Nacht ohne Schallapplikation sowie nach 3 Nächten durchgeführt



worden, in denen die Probanden einem Schienenverkehrslärm mit äquivalenten Pegeln von 40, 44 bzw. 50 dB(A) ausgesetzt waren.

*Go-/Nogo-Test.* In der einfachen Version dieses Tests werden die Wörter 'drück' und 'stopp' sowohl in Klein- als auch in Großbuchstaben in randomisierter Folge jeweils 60 Mal für 170 ms im Zentrum des Bildschirms präsentiert. Die Probanden hatten die Aufgabe, mit einem Tastendruck auf das Erscheinen des Wortes 'drück' bzw. 'DRÜCK' zu reagieren, nicht jedoch auf 'stopp' und 'STOPP'. In der komplexen Version dieses Tests erschienen die Wörter in wiederum randomisierter Folge nun aber jeweils 50 Mal, wobei die Probanden mit einem Tastendruck auf 'drück' und 'STOPP', nicht jedoch auf 'DRÜCK' und 'stopp' reagieren sollten. Das Interstimulus-Intervall betrug bei beiden Testversionen 1 750 ms.

Tab. 2.5-1: Signal-/Antwortkombination der Go-/Nogo-Aufgabe.

|               | Go-/Nogo<br>einfach           | Go-/Nogo<br>komplex |                     |
|---------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Signal</b> | <b>x: Aktion erforderlich</b> |                     |                     |
| <b>Drück</b>  | <b>x</b>                      | <b>x</b>            | <b>kompatibel</b>   |
| <b>DRÜCK</b>  | <b>x</b>                      | <b>-</b>            | <b>inkompatibel</b> |
| <b>Stopp</b>  | <b>-</b>                      | <b>-</b>            | <b>kompatibel</b>   |
| <b>STOPP</b>  | <b>-</b>                      | <b>x</b>            | <b>inkompatibel</b> |

x – Reaktion erforderlich

*EKP-Registrierung und Auswertung.* Zur Ermittlung der EKPs wurde das EEG von 3 Positionen Fz, C4 und Pz (frontal, zentral und parietal) und 2 EOGs gegen das linke Mastoid abgeleitet. Alle Signale wurden mit einem 0.03 Hz Hochpassfilter und einem 30 Hz Tiefpassfilter bearbeitet. Die Abtastrate betrug 200 Hz.

Alle EKPs wurden im Zeitraum von 100 ms vor bis 1 650 ms nach jeder Reaktion berechnet. Augenartefakte wurden nach den Kriterien von Gratton et al. [1983] korrigiert. Ausgeschlossen wurden alle Amplituden, die  $\pm 100 \mu V$  überschritten.

Die N2- und P3-Komponenten wurden für die weiteren Berechnungen der EKPs visuell bestimmt. Zusätzlich wurden die Differenzen zwischen Nogo minus Go berechnet (N2d bzw. P3d). Die Nogo-N2-Komponente wurde in einem Zeitfenster von 200-350 ms, die Nogo-P3-Komponente im Bereich von 300 bis 450 ms jeweils bei Fz und C4 gemessen. Die P3-Komponente wurde für Go-Aufgaben nur bei Pz in einem Zeitfenster von 250 bis 400 ms berechnet.

*Statistische Bearbeitung.* Für die Auswertung der Leistungsparameter (Fehler, Reaktionszeit) wurden die Unterschiede in der Anzahl der Fehlalarme und der Reaktionszeit für die Faktoren Lärm (Ruhe, 40, 44 und 50 dB(A)), Kompatibilität (kompatibel, inkompatibel) und Aufgabenart (Go, Nogo) mittels Varianzanalysen berechnet.

Um mögliche dosisabhängige Lärmeffekte auf die N2- und P3- Amplitude und Latenz zu berechnen, wurden Varianzanalysen mit den Innersubjekt-Faktoren Lärm (Ruhe, 40, 44 und 50 dB(A)), Elektrode (Fz, C4), Kompatibilität (kompatibel, inkompatibel) und Aufgabenart (Go,

Nogo) durchgeführt. Amplituden und Latenzen für Go-P3 wurden nur für Pz mit den Faktoren Lärm (Ruhe, 40, 44 und 50 dB(A)) und Kompatibilität (kompatibel, inkompatibel) durchgeführt. Um globale Lärmeffekte festzustellen, wurden weitere Varianzanalysen mit einem zwei-stufigen Lärmfaktor (Ruhe vs. Lärm gemittelt) berechnet.

### 2.5.3 Ergebnisse

*Leistungsparameter.* Sowohl die Reaktionszeit (RT) als auch die Anzahl der falschen Alarme (FA) waren bei inkompatiblen Reizen (RT: 380 ms, FA: 6.67 %) länger als bei kompatiblen (RT: 365 ms, FA: 3.28 %) (RT:  $F = 30.98$   $p < .001$ , FA:  $F = 30.76$ ,  $p < .001$ ). Tendenziell stieg die Reaktionszeit für inkompatible Reize nach den Lärm- im Vergleich zu den Ruhenächten an ( $F = 30.76$ ,  $p = .061$ ).

Die Lidschlussfrequenz (Blinkrate) nahm – wie in Abb. 2.4-3 dargestellt – mit zunehmendem äquivalenten Pegel linear ab ( $F = 5.34$ ,  $p = .031$ ).

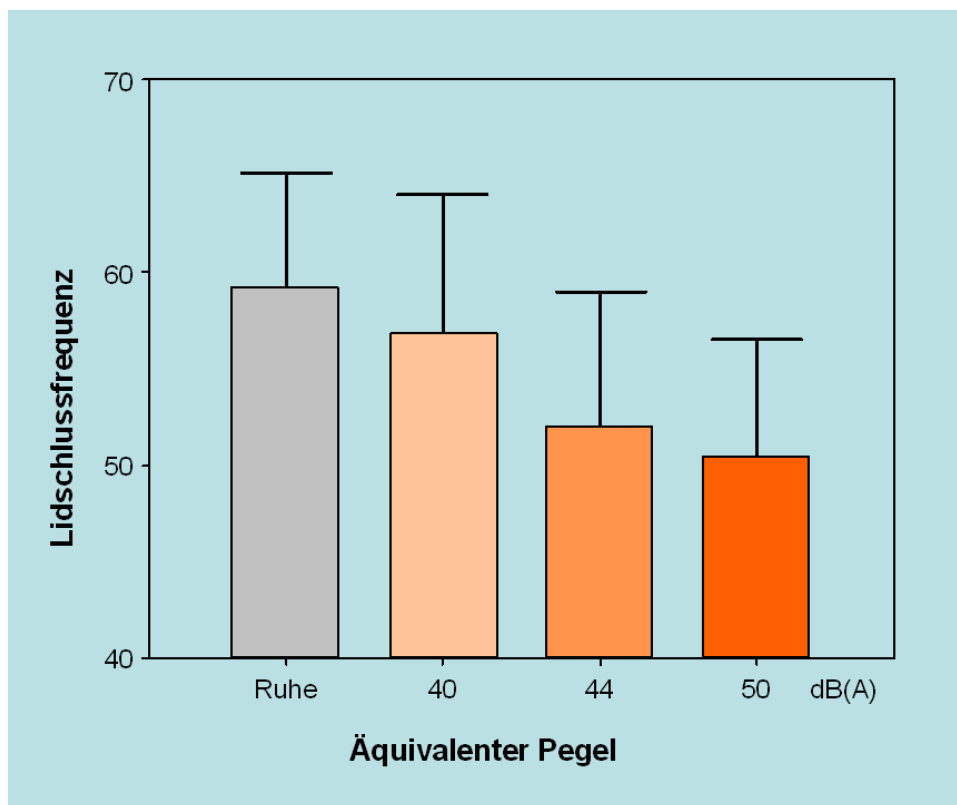


Abb. 2.5-3: Lidschlussfrequenz bei Durchführung der Go-/Nogo-Aufgabe nach einer Ruhenacht und 3 Nächten, in denen Schienenverkehrslärm mit LAeq = 40, 44 bzw. 50 dB(A) dargeboten wurde.

*Analyse der N2.* Da keine Interaktion 'Lärm x Kompatibilität' bestand, konnte dieser Faktor außer Acht gelassen werden. Gemittelt über alle auf Lärmnächte folgenden Tests ergab sich im Vergleich zu den auf Ruhenächte folgenden Tests eine signifikante Verlängerung der N2-Latenz von 293 ms auf 301 ms ( $F = 5.18$ ,  $p = .021$ ) sowie – für Go- und Nogo-Aufgaben – eine signifikante Reduktion der Amplitude von  $-1.28 \mu\text{V}$  auf  $-0.83 \mu\text{V}$  ( $F = 6.23$ ,  $p = .021$ ). Die Amplitudenreduktion fiel mit zunehmendem Pegel größer aus ( $F = 7.89$ ,  $p = .010$ ). Es konnte keine Interaktion 'Lärm x Aufgabenart' beobachtet werden.

*Analyse der P3.* Auch für die P3-Komponente ergab sich keine Interaktion 'Lärm x Kompatibilität'. Auch hier zeigte sich ein signifikanter Lärmeffekt; die P3-Amplitude nahm von 2.55  $\mu\text{V}$  nach Ruhenächten auf 2.33  $\mu\text{V}$  nach Lärnnächten ab ( $F = 5.35$ ,  $p = .031$ ). Dieser Lärmeffekt war für die Nogo-Aufgaben hochsignifikant ( $F = 12.73$ ,  $p = .002$ ), während für die Go-Aufgaben kein Unterschied zwischen Lärm (2.11  $\mu\text{V}$ ) und Ruhe (2.14  $\mu\text{V}$ ) bestand ( $F = 0.03$ ,  $p = .863$ ). Die P3-Amplitude war also nur bei der Nogo-Aufgabe vermindert.

## 2.5.4 Diskussion

Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Hypothese, dass die Leistung im Gefolge lärmbedingter Schlafstörungen sowohl qualitativ (Fehleranzahl) als auch quantitativ (Reaktionszeit) vor allem bei inkompatiblen Go-/Nogo-Reizen beeinträchtigt ist. Die bei den 22 Probanden registrierten Daten ergaben jedoch eine lediglich bei inkompatiblen Reizen nur tendenziell verlängerte Reaktionszeit. Da die Schlafqualität nach Lärnnächten schlechter beurteilt worden war, könnte die Abnahme der Schlafqualität die Ursache der Leistungseinbußen bei inkompatiblen Reizen sein. Das Ausbleiben der erwarteten Leistungsbeeinträchtigung könnte die Folge einer erhöhten Konzentration bzw. verbesserter Arbeitsstrategien sein. Diese Annahme stützt sich auf die mit zunehmender akustischer Belastung in der Nacht zunehmend reduzierte Lidschlussfrequenz (Blinkrate), die einen sensitiven Indikator für die mentale Belastung darstellt [Richter et al. 1998, Veltman and Gaillard 1998]. Die Verminderung der Blinkrate war jedoch keiner spezifischen Aufgabenart (Go/Nogo) zuzuordnen.

Für die N2-Amplitude ergab sich eine Verlängerung der Latenz und eine mit zunehmender nächtlicher Schallbelastung stärkere Abnahme der Amplitude. Eine Interaktion 'Lärm x Aufgabenart' konnte nicht festgestellt werden. Dies weist darauf hin, dass nicht nur die praemotorische Inhibitionsaktivierung (Nogo-N2), sondern generell Prozesse einer unspezifischen Vorbereitung auf eine motorische Antwort durch nächtlichen Lärm negativ beeinflusst werden.

Die P3-Amplitude war nach nächtlicher Schallbelastung insbesondere bei Nogo-Aufgaben reduziert. Dies deutet auf eine negative Auswirkung von nächtlichem Schienenverkehr auf kortikale Prozesse hin, die für die Inhibition von motorischen Reaktionen zuständig sind. Dagegen ergab sich keine erhöhte Vulnerabilität der Go-P3 gegenüber nächtlicher Lärmexposition.

Die hier präsentierten Befunde zeigen insgesamt, dass nächtlicher Lärm inhibitorische Funktionen am nächsten Tage, wenn auch in eher geringem Umfang, beeinflussen kann. Sie weisen darauf hin, dass im Vorfeld der motorischen Antwortabgabe auf neuronaler Ebene Veränderungen entstehen, die offensichtlich noch kompensiert werden können.

## 2.6 Persönlichkeitsmerkmale

Das Ausmaß lärmbedingter Schlafstörungen und deren Folgereaktionen werden durch zahlreiche nichtakustische Einflussfaktoren moderiert [z.B. Griefahn 2002]. Im Folgenden wird exemplarisch für das Arbeitspaket 1 an den 24 Probanden der Experimentalgruppe der Einfluss der individuellen Moderatorvariablen Lärmempfindlichkeit, Extraversion und Neurotizismus dargestellt.

Da die Probanden 13 Nächte in 3 aufeinander folgenden Wochen im Labor verbringen mussten, wurden sie sorgfältig ausgesucht, um möglichst vorzeitigen Versuchsabbrüchen entgegen zu wirken. Daher füllten alle potentiell in Frage kommenden Probanden verschiedene Fragebögen zur Messung von Persönlichkeitsmerkmalen aus. Probanden, die auf mindestens zwei der Skalen Neurotizismus, Ängstlichkeit, Fokussierung auf den Schlaf und Grübeln erhöhte Werte aufwiesen, wurden von der Untersuchung ausgeschlossen. Das hatte zur Folge, dass keine emotional instabilen Personen an der Untersuchung teilnahmen. Auch die Anzahl an lärmempfindlichen Personen wurde durch diese Vorselektion reduziert, da die Lärmempfindlichkeit mit den o. g. Persönlichkeitsmerkmalen hoch korreliert [z. B. Belojevic et al. 1997, Stansfeld 1992, Zimmer & Ellermeier 1999].

### 2.6.1 Lärmempfindlichkeit

#### 2.6.1.1 Einleitung

Lärmempfindlichkeit ist ein Persönlichkeitsmerkmal, das die individuelle Einstellung gegenüber Lärm im Allgemeinen beschreibt [Anderson 1971, Job 1999, Ohrström et al. 2006, Quehl 2005, Stansfeld 1992]. Die Zusammenhänge von Lärmempfindlichkeit mit der Lästigkeit, der subjektiven Bewertung des Schlafes, der Leistung sowie physiologischen Reaktionen wurden in vielen Feld- und Laborstudien untersucht. Ein kurzer Literaturüberblick skizziert die bisherigen Befunde.

#### Lärmempfindlichkeit und Lästigkeit

Personen, die sich häufig durch Lärm in unterschiedlichen Situationen belästigt fühlen, beschreiben sich selbst als lärmempfindlich [Ohrström et al. 1988]. Diese Lärmempfindlichkeit deutet auf die Vulnerabilität gegenüber unterschiedlichen Geräuschen hin, die wiederum das Ausmaß der Belästigung moderieren und einen Teil der interindividuellen Varianz bezüglich der Reaktionen auf Geräusche erklären [Stansfeld 1992]. Labor- und Feldstudien, welche die Effekte von Verkehrslärm untersuchen, zeigen, dass sich sensitive Personen durch die Lärmexposition deutlich mehr belästigt fühlen als nicht sensitive Personen. Durch dieses Persönlichkeitsmerkmal kann bis zu ein Viertel der Varianz hinsichtlich der Lästigkeit erklärt werden [Kjellberg 1996, Bullen et al. 1986, van Kamp 2004].

#### Lärmempfindlichkeit und subjektive Schlafbewertung

Bezogen auf die nächtliche Belästigung finden viele Autoren bedeutsame negative Korrelationen zwischen der Lärmempfindlichkeit und der subjektiv bewerteten Schlafqualität sowie der Anzahl an erinnerten Aufwachreaktionen bei Personen, die nachts Verkehrslärm ausge-

setzt sind [Belojevic et al. 1997, Brink et al. 2005, Griefahn 1985, Jakovlevic et al. 2006, Nivison & Endresen 1993].

Öhrström und Rylander [1990] sowie Öhrström und Björkman [1988] bestätigen diese Befunde in ihren Laborstudien, in denen die subjektive Schlafqualität nach Lärmnächten bei den unempfindlichen Personen um 12% und bei den empfindlichen Personen um 25,4% reduziert war. Die Autoren beschreiben die Lärmempfindlichkeit nach der Anzahl der Geräusche als zweitwichtigsten Faktor zur Erklärung der subjektiv bewerteten Schlafqualität.

### **Lärmempfindlichkeit und Leistung**

In der Regel wird die Bedeutung der Lärmempfindlichkeit auf die Leistung unter dem direkten Einfluss von Lärm (irrelevante Sprache, Straßenlärm, Lüftungsgeräusche) im Labor untersucht. Die meisten Autoren [Persson Waye et al. 2002, Zimmer & Ellermeier 1999] fanden zwar Beeinträchtigungen der Leistung bei hoch empfindlichen Personen im Vergleich zu gering empfindlichen Personen, allerdings waren diese nur von einem geringen Ausmaß und auch nicht bei allen durchgeführten Aufgaben zu finden. In Feldstudien zeigten sich ähnliche Befunde [Belojevic et al. 1992, Smith & Stansfeld 1986].

Studien, die sich mit der Beziehung zwischen Lärmempfindlichkeit und Leistung nach lärmexponierten Nächten beschäftigen, sind rar und kamen zu inkonsistenten Ergebnissen. Während Öhrström und Rylander [1990] keine Verbindung zwischen Lärmempfindlichkeit und Leistungsbeeinträchtigungen nach nächtlicher Lärmexposition feststellen konnten, fanden Öhrström und Björkman [1988] verlängerte Reaktionszeiten bei nicht lärmempfindlichen Personen im Vergleich zu lärmempfindlichen Personen.

### **Lärmempfindlichkeit und physiologische Funktionen**

Nur sehr wenige Studien untersuchten den Einfluss der Lärmempfindlichkeit auf physiologische Reaktionen. Bezüglich der Lärmexposition am Tage fanden Stansfeld et al. [1985], abgesehen von verlangsamten Herzraten bei Frauen, keine physiologischen Unterschiede zwischen lärmempfindlichen und unempfindlichen Personen hinsichtlich des Blutdruckes, der Hautleitfähigkeit und der Hörschwelle. Auch Persson Waye et al. [2002] konnten unter der Exposition von Lüftungsgeräuschen keinen bedeutsamen Einfluss von Lärmempfindlichkeit auf die Cortisolausschüttung bei unterschiedlichen Leistungstests nachweisen. Der Cortisolrückgang war jedoch unter Lüftungslärm mit vorwiegend tiefen Frequenzen bei Lärmempfindlichen im Vergleich zu unempfindlichen Personen verzögert. Griefahn und Di Nisi [1992] fanden bei lärmempfindlichen im Vergleich zu eher robusten Personen eine stärkere Drosselung der peripheren Durchblutung sowie eine stärkere Beschleunigung der Herzschlagfrequenz.

Die Befunde bezüglich physiologischer Effekte während der Nacht sind erneut widersprüchlich. Während Öhrström et al. [1988] über größere ereignisbezogene Anstiege der Herzrate bei Lärmempfindlichen berichten, fanden Di Nisi et al. [1990] sowie Brink et al. [2005] die gleichen induzierten vegetativen Veränderungen bei lärmempfindlichen wie bei lärmunempfindlichen Personen.

Öhrström und Björkman [1988], Öhrström und Rylander [1990] sowie Brink et al. [2005], die Körperbewegungen zur Ermittlung von Schlafstörungen aufzeichneten, beobachteten bei Lärmempfindlichen nicht mehr Bewegungen als bei nicht Lärmempfindlichen.

Basner et al. [2004] und Griefahn [1985] zeichneten Polysomnogramme auf, die als einzige Methode eine eindeutige Unterscheidung zwischen Wachen und Schlafen sowie Informationen über die Schlaftiefe ermöglicht. Basner et al. [2004] untersuchten in großen Labor- und Feldstudien die Effekte von nächtlichem Fluglärm und fanden nur im Labor bei Lärmempfindlichen mehr Aufwachreaktionen verglichen mit nicht Sensitiven, während Griefahn [1985], die im Labor die Effekte von Straßenlärm prüfte, keine Unterschiede zwischen den Sensitiven und nicht Sensitiven nachweisen konnte.

## Hypothesen

Unter Berücksichtigung der Literatur wurde erwartet, dass die Lärmempfindlichkeit die subjektive Bewertung der Schlafqualität und die Lästigkeit beeinflusst, nicht aber die physiologischen Schlafparameter und die Leistung am nachfolgenden Morgen.

### 2.6.1.2 Methoden

#### Messung der Lärmempfindlichkeit

Die Lärmempfindlichkeit wurde mit dem 'Noise-Sensitivity-Questionnaire' (NoiSeQ [Schütte & Marks 2004]) gemessen, der die globale Lärmempfindlichkeit in 5 Bereichen (Schlaf, Arbeit, Kommunikation, Wohnumgebung und Freizeit) mit jeweils 7 Items erhebt. Jedes Item beinhaltet eine Aussage, die von den Befragten auf einer 4-stufigen Ratingskala danach einzuschätzen sind, in welchem Maß sie die eigene Einstellung zutreffend charakterisieren (von „stimmt genau“ bis „stimmt gar nicht“). Die Werte jedes Items (von 0 bis 3) werden aufsummiert und durch die Anzahl der Items geteilt, wobei 0 für eine geringe und 3 für eine hohe Lärmempfindlichkeit steht.

#### Statistische Analysen

Pearson-Korrelationen wurden zwischen der Lärmempfindlichkeit und den Mittelwerten der physiologischen Schlafparameter, der subjektiven Schlafbewertung, der Lästigkeit sowie der Leistung ermittelt, die aus den 9 Lärmnächten berechnet wurden.

### 2.6.1.3 Ergebnisse

Die aus 24 Probanden bestehende Stichprobe zeigte Lärmempfindlichkeits-Werte zwischen 0.37 und 1.77 (Mittelwert von 1.08). Diese Werte wurden mit den aus den Lärmnächten gemittelten Schlaf-, Lästigkeits- und Leistungsdaten korreliert, die nach Lärmnächten signifikant verändert waren. Bei den physiologischen Schlafparametern, bei der Lästigkeit sowie bei den Leistungsdaten wurden keine signifikanten Korrelationen festgestellt. Die Korrelationen mit den subjektiven Schlafdaten sind in Tabelle 2.6-1 aufgeführt.

Im Hinblick auf die subjektiven Schlafdaten konnten zwischen der Einschlafschwierigkeit und der Schlaftiefe keine Zusammenhänge mit der Lärmempfindlichkeit gefunden werden. Schlafruhe und Schlaferholung weisen einen Trend auf, während die Korrelationen mit der

Schwierigkeit, nach dem intermittierten Aufwachen wieder einzuschlafen sowie mit den selbst beurteilten motorischen Unruhe ein signifikantes Niveau erreichen. Zudem korreliert auch die Summe aus den 6 Schlafvariablen, die als 'Schlafqualität' zusammengefasst wurden, signifikant mit der Lärmempfindlichkeit, d.h. je höher die Lärmempfindlichkeit desto geringer ist die subjektive Schlafqualität.

Tab. 2.6-1: Korrelationen zwischen der Lärmempfindlichkeit und den subjektiven Schlafdaten nach Lärmnächten; ns = nicht signifikant; + =  $p < 0.1$ ; \* =  $p < 0.05$ ; \*\* =  $p < 0.01$ ; \*\*\* =  $p < 0.001$ .

| <b>Subjektive Schlafqualität</b>                                  | <b>r</b>           |
|---|--------------------|
| Schwierigkeit einzuschlafen (schwer - leicht)                     | ns                 |
| Schwierigkeit nach intermittiertem Aufwachen wieder einzuschlafen | -.352*             |
| Schlafruhe (unruhig - ruhig)                                      | -.324 <sup>+</sup> |
| Schlaftiefe (flach – tief)  | ns                 |
| Schlaferholung (niedrig – hoch)                                   | -.276 <sup>+</sup> |
| Körperbewegungen (motorische Unruhe, viel – wenig)                | -.434*             |
| Schlafqualität (schlecht – gut)                                   | -.356*             |

## 2.6.1.4 Diskussion

### Methodische Aspekte

Aufgrund des schon beschriebenen Zusammenhangs der Lärmempfindlichkeit mit den anderen Selektionsskalen, nahmen an der Untersuchung keine hoch lärmempfindlichen Personen teil. Zudem kam möglicherweise der Effekt der Selbstselektion zum Tragen. Bei der Rekrutierung wurde den Probanden auf einem Informationsblatt angekündigt, dass die Teilnehmer mit großer Wahrscheinlichkeit nächtlichem Verkehrslärm ausgesetzt werden. Lärmempfindliche haben möglicherweise aufgrund erwarteter Schlafstörungen von der Teilnahme an der Studie abgesehen.

Ungeachtet der geringen Spannweite der gemessenen NoiSeQ-Werte wurde die hier präsentierte Analyse vorgenommen, um die Anwendbarkeit des neu entwickelten Fragebogens NoiSeQ zu überprüfen. Es ist davon auszugehen, dass eine größere Varianz der NoiSeQ-Werte deutlichere Ergebnisse in der hier ermittelten Richtung erbringen werden.

### Zum Einfluss der Lärmempfindlichkeit

Die ermittelten interindividuellen Differenzen während der Lärmnächte bei den physiologischen Schlafparametern, bei den nachfolgenden subjektiven Schlafbewertungen und bei der Leistung werden durch zahlreiche individuelle und situative Faktoren determiniert. Lärmempfindlichkeit leistet bei dem Ausmaß an Lärmreaktionen einen großen Beitrag. Dennoch konnten weder die physiologischen Schlafparameter noch die nachfolgende Leistung bedeutsam mit diesem Persönlichkeitsmerkmal in Verbindung gebracht werden. Einzig die subjektiven Schlafparameter korrelieren mit der Lärmempfindlichkeit.

Diese Diskrepanz zwischen den physiologischen Reaktionen und der Leistung auf der einen Seite und der subjektiven Bewertung auf der anderen Seite ist auch in der Literatur zu finden. Lärminduzierte Veränderungen physiologischer Funktionen mit Bezug zur Lärmempfindlich-

keit wurden nur gelegentlich gefunden. Stansfeld et al. [1985] als auch Smith und Rich [2002] untersuchten die Hautleitfähigkeit und kardiovaskuläre Effekte und fanden keine Beziehungen zur Lärmempfindlichkeit. Andererseits berichten Griefahn und Di Nisi [1992] von erhöhten kardiovaskulären und emotionalen Reaktionen auf Gewehrschüsse, Verkehrslärm und Rosa Rauschen bei Lärmempfindlichen im Vergleich zu Unempfindlichen.

Ähnliche Resultate wie bei den physiologischen Reaktionen am Tage konnten für den Schlaf nicht beobachtet werden. Weder Di Nisi et al. [1990] noch Brink et al. [2005] fanden vermehrte kardiovaskuläre Reaktionen bei Sensitiven im Vergleich zu nicht sensitiven Personen. Dasselbe gilt für nächtliche Körperbewegungen [Brink et al. 2005, Öhrström & Björkman 1988, Öhrström & Rylander 1990] und für Schlafstörungen, die mit Hilfe von Polysomnogrammen festgestellt wurden [Griefahn 1986, Griefahn & Gros 1986]. Nur Basner et al. [2004], die ereigniskorrelierte Aufwachreaktionen in großen Labor- und Feldstudien mit dem Polysomnogramm gemessen haben, berichteten über mehr Aufwachreaktionen bei Lärmsensitiven verglichen mit nicht Sensitiven. Dieser Effekt zeigte sich allerdings nur im Labor, nicht aber in einer anschließend durchgeführten Feldstudie dieser Autorengruppe.

Ähnlich wie bei den lärminduzierten physiologischen Veränderungen konnten auch Verlängerungen der Reaktionszeiten nicht mit der Lärmempfindlichkeit in Verbindung gebracht werden. Dieses Ergebnis wird sowohl durch eine experimentelle Studie von Öhrström und Rylander [1990] als auch durch eine Feldstudie unterstützt, die von Smith und Stansfeld [1986] durchgeführt wurde.

Lärmempfindlichkeit spielt jedoch eine wichtige Rolle bei der subjektiven Bewertung des Schlafs. Die subjektiv empfundene Schwierigkeit, nach intermittiertem Aufwachen wieder einzuschlafen, die Schlafruhe, die Schlaftiefe, die Körperbewegungen und die Schlafqualität wurden durch die Lärmempfindlichkeit beeinflusst. Diese Befunde werden durch andere Studien bestätigt [e.g. Belojevic et al. 1997, Brink et al. 2005, Nivison & Endresen 1993, Öhrström & Rylander 1990, Öhrström & Björkman 1988].

Groß angelegte Umfragen und sorgfältig durchgeführte Metaanalysen haben den Einfluss der Lärmempfindlichkeit auf das Lästigkeitsurteil gezeigt [z.B. Job 1988, Miedema & Vos 2003, Öhrström et al. 2006]. Bezogen das Lästigkeitsurteil für die Nacht sind die kausalen Zusammenhänge deutlich komplexer und damit schwieriger zu beurteilen. Zum einen resultiert das Gefühl der Lästigkeit aus den Lärmerfahrungen während des Wachseins (z.B. während der Dauer des Einschlafens oder der intermittierten Wachphasen) und zum anderen wirkt sich auch die subjektiv empfundene Schlafqualität auf das Lästigkeitsurteil aus. Die Beurteilung der Schlafqualität ist ihrerseits ein komplexer Vorgang, da hier ein der Vergangenheit angehörender und in einem anderen Bewusstsein verbrachter Zustand zu beurteilen ist [Griefahn et al. 1999]. Die Zeit bis zum Einschlafen als auch die intermittierten Wachphasen waren in Lärmnächten nur moderat verlängert (2 bzw. 8 Minuten), was dazu führte, dass die Lästigkeit verglichen mit den Ruhenächten auf einer Skala von 0 bis 10 mit 4.8 statt mit 1.1 moderat höher angegeben wurde. Die geringe Spannweite sowohl beim NoiSeQ als auch bei der Lästigkeit haben die erwarteten Beziehungen zwischen Lärmempfindlichkeit und Lästigkeit möglicherweise maskiert. Zudem geht der in anderen Studien berichtete Einfluss der Lärmemp-



findlichkeit auf die Lästigkeit in der Nacht aus größeren Stichproben und ausgeprägteren Variationen der Lärmempfindlichkeit hervor [Brink et al. 2005, Bullen et al. 1986, Kjellberg et al. 1996, Miedema & Vos 2003, Öhrström et al. 2006, Quehl 2005, Stansfeld et al. 1993].

Bestätigung erhalten die gefundenen Ergebnisse bezüglich der Lästigkeit durch die Studie von Heinonen-Guzejev et al. [2000], die 1495 Fragebögen von finnischen Erwachsenen analysierten. Nach der Erhebung wurde eine Faktorenanalyse mit 10 Lästigkeits-Items, 3 Items zum Ausgesetztsein von Lärm und einem Lärmempfindlichkeits-Item durchgeführt. Die Faktorenanalyse ergab 3 Faktoren, wovon der erste 'Lästigkeit in der Nacht' Items beinhaltete, die Schlafprobleme und Störungen der Erholung beschreiben, der zweite 'Lästigkeit am Tage' Items über Störungen bei der Kommunikation sowie beim Fernsehen und Radio hören enthielt während der dritte Faktor Selbstauskünfte über das Ausgesetztsein von Verkehrslärm aufwies. Es konnte gezeigt werden, dass das Lärmempfindlichkeits-Item auf keinem der drei Faktoren bedeutsam hoch lud.

Angesichts der berichteten Diskrepanzen zwischen den physiologischen Daten und der Leistung auf der einen Seite und der subjektiven Bewertung auf der anderen Seite [Hoeger et al. 2002] kann die Lärmempfindlichkeit als eine unabhängige Variable betrachtet werden, welche direkt die subjektive Bewertung des Schlafes beeinflusst ohne einen Umweg über die Lästigkeit in der Nacht zu nehmen [Smith 2003]. Dies ist außerdem abhängig von der Definition und dem Messinstrument, mit dem die Lärmempfindlichkeit erhoben wird. Die bislang entwickelten Instrumente können individuelle Unterschiede unter Lärmeinwirkung nur bei subjektiven, emotionalen Ergebnissen vorhersagen. Ein anderes Problem mit den Messinstrumenten besteht darin, dass diese nur eine generelle Sensitivität gegenüber Geräuschen reflektieren und keine gegenüber speziellen Lärmquellen [Miedema & Vos 2003, Smith 2003]. Wenn dem so ist, kann angenommen werden, dass die ungewohnte Schlafumgebung im Labor einen größeren Einfluss auf den Schlaf hat und deshalb die Wirkung des Verkehrslärms maskiert.

## **2.6.2 Extraversion**

### **2.6.2.1 Einleitung**

Extraversion als Persönlichkeitsmerkmal enthält die beiden Extremausprägungen Introversion und Extraversion. Während Introvertierte als ruhig, zurückhaltend, schüchtern und in sich gekehrt beschrieben werden, zeigen Extravertierte ein eher lebhaftes Verhalten, sie sind kontaktfreudig, fröhlich, aktiv und gern in Gesellschaft [z.B. Amelang & Bartussek 2001]. Der Einfluss dieses Persönlichkeitsmerkmals auf den Schlaf und auf die Leistung wird im Folgenden kurz skizziert.

#### **Extraversion und Schlaf**

Studien über den Zusammenhang von Extraversion und Schlaf sind sehr selten und offenbaren eine Diskrepanz zwischen den physiologischen und den subjektiv gemessenen Schlafdaten. Während die zwei Studien, die den Schlaf mit Hilfe des Polysomnogramm bewertet haben, keine Unterschiede zwischen Extravertierten und Introvertierten fanden [Spiegel & Nüesch, 1976 Webb & Friel 1971], berichten Gray und Watson [2002] von positiven Zusammenhängen zwischen subjektiver Schlafqualität und Extraversion. Letztgenannter Befund

wird von den Ergebnissen von Tune [1969] gestützt, der Schlaftagebücher von 240 Personen zwischen 20 und 79 Jahren analysierte. Tune fand einen geringfügig besseren Schlaf bei Extravertierten. Laut den Tagebuchaufzeichnungen schlafen Extravertierte eher ein und schlafen länger als Introvertierte.

Bezogen auf lärminduzierte Veränderungen des Schlafes existieren bislang nur Daten zur subjektiven Schlafqualität und diese weisen eine konträre Befundlage auf. Belojevic et al. [1997] überprüften die Effekte von nächtlichem Verkehrslärm bei 413 Bewohnern Belgrads und fanden bei den 253 Teilnehmern, die in Gebieten mit einer hohen Lärmbelastung wohnten ( $L_{Aeq} > 65$  dB) keine Zusammenhänge zwischen Extraversion und subjektiver Schlafqualität. Öhrström and Björkman [1988] hingegen fanden im Labor bei Extravertierten stärkere subjektive Veränderungen des Schlafes verglichen mit Introvertierten.

### **Extraversion und Leistung**

Die Metaanalyse von Koelega [1992] mit 53 Studien aus den Jahren 1960 bis 1990, die den Zusammenhang zwischen Extraversion und Vigilanzleistung untersuchte, zeigt eine bessere Leistung von Introvertierten im Vergleich zu Extravertierten. Obwohl dieser Unterschied relativ klein war, konnten diese Unterschiede für die Anzahl der Treffer als auch für die Reaktionszeit nachgewiesen werden. Diese Tendenz wird auch von neueren Studien im Hinblick auf komplexere Aufmerksamkeitsaufgaben bestätigt [Taylor & McFatter 2003, Blagrove & Akehust 2001].

Nach Schlafdeprivation über eine gesamte Nacht zeigten die meisten Studien bei Introvertierten geringere Leistungseinbußen verglichen mit Extravertierten [Taylor & McFatter 2003, Smith & Maben 1993].

### **Hypothesen**

Während keine lärminduzierten Unterschiede zwischen Extravertierten und Introvertierten bei den physiologischen Schlafparametern erwartet werden, wird davon ausgegangen, dass Extravertierte ihren Schlaf nach Lärmnächten schlechter beurteilen und nach Lärmnächten eine geringere Leistung zeigen als Introvertierte.

## **2.6.2.2 Methoden**

### **Messung der Extraversion**

Sowohl Extraversion als auch der unter 2.5.3 abgehandelte Neurotizismus wurden mit dem "Freiburger Persönlichkeitsinventar" (FPI-R) von Fahrenberg et al. [1989] erhoben, das die beiden Persönlichkeitsmerkmale mit jeweils 14 Items misst. Pro Zustimmung des entsprechenden Items wird ein Punkt vergeben, so dass beide Skalen von 0 bis 14 variieren können, wobei größere Werte eine höhere Ausprägung der Extraversion bzw. des Neurotizismus beinhalten.

### **Statistische Analysen**

Varianzanalysen mit Messwiederholungen wurden benutzt, um die Unterschiede zwischen den Persönlichkeitsgruppen (Extravertierte vs. Introvertierte und emotional Stabile vs. emoti-

onal Instabile) zu messen, die auf der Basis eines Median-Splits gebildet wurden. Die statistischen Analysen basierten auf den Mittelwerten der 3 Ruhenächte und der 9 Lärmnächte.

### 2.6.2.3 Ergebnisse

Die Extraversionswerte variierten zwischen 3 und 14, so dass die Probanden am Median von 11 in zwei Gruppen geteilt wurden. Die Stichprobe bestand demnach aus 11 Introvertierten (mit den Werten 0-10) und aus 13 Extravertierten (mit den Werten 11-14).

In Tabelle 2.6-2 werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für Extravertierte und Introvertierte getrennt präsentiert. Bei keinem der physiologischen Schlafparameter konnten signifikante Haupteffekte oder Wechselwirkungen festgestellt werden. Hinsichtlich der subjektiven Schlafqualität wurde eine signifikante Wechselwirkung gefunden. Bewerteten Extravertierte und Introvertierte nach Ruhenächten ihre Schlafqualität noch ähnlich, so beurteilten Extravertierte ihren Schlaf nach Lärmnächten schlechter als Introvertierte.

Bezogen auf die Leistung zeigte sich ein Trend, dass Introvertierte sowohl nach Ruhe- als auch nach Lärmnächten verglichen mit Extravertierten schnellere Reaktionszeiten aufwiesen. Dies gilt sowohl für die switch- als auch für die non-switch Aufgaben.

Tab. 2.6-2: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) für physiologische Schlafparameter, subjektive Schlafqualität und Leistung bei Extravertierten und Introvertierten. P-Werte wurden mit dem F-Test ermittelt.

|   | Introvertierte<br>(n = 11) |                         | Extravertierte<br>(n = 13) |                         | Haupt-<br>effekt<br>p-Wert | Inter-<br>aktion<br>p-Wert |
|---|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|   | Ruhenächte<br>(AM ± SD)    | Lärmnächte<br>(AM ± SD) | Ruhenächte<br>(AM ± SD)    | Lärmnächte<br>(AM ± SD) |                            |                            |
| <b>Schlafparameter</b>                                      |                            |                         |                            |                         |                            |                            |
| SOL [min]   | 23.0 ±14.4                 | 22.6 ± 8.8              | 20.8 ±11.5                 | 24.4 ±12.2              | 0.965                      | 0.204                      |
| SPT [min]   | 451.2 ±26.3                | 454.6 ±8.6              | 458.8 ±11.5                | 454.6 ±12.0             | 0.494                      | 0.264                      |
| WASO [min]  | 28.8 ±9.4                  | 41.6 ±14.3              | 30.9 ±16.4                 | 36.6 ±18.7              | 0.805                      | 0.142                      |
| TST [min]   | 422.3 ±31.6                | 413.0 ±18.1             | 427.9 ±14.4                | 418.1 ±25.6             | 0.556                      | 0.933                      |
| SEI (TST/SPT)   | 0.94 ±0.02                 | 0.91 ±0.03              | 0.93 ±0.04                 | 0.92 ±0.04              | 0.749                      | 0.217                      |
| Zeit in S1 [min]  | 18.1 ±7.3                  | 22.1 ±7.0               | 20.2 ±7.3                  | 24.7 ±11.4              | 0.476                      | 0.848                      |
| Zeit in SWS [min]   | 70.9 ±20.0                 | 65.9 ±21.6              | 75.2 ±30.2                 | 69.8 ±30.7              | 0.704                      | 0.918                      |
| Zeit in REM [min]   | 104.5 ±16.8                | 94.1 ±13.7              | 109.1 ±11.8                | 106.2 ±15.4             | 0.138                      | 0.121                      |
| Schlafqualität  | 38.5 ±4.6                  | 34.4 ±5.7               | 38.2 ±5.1                  | 29.8 ±4.3               | 0.183                      | 0.032                      |
| <b>Leistung im Switch-test RT: Reaktionszeit, F: Fehler</b> |                            |                         |                            |                         |                            |                            |
| RT switch   | 350.1 ±43.2                | 354.0 ±42.3             | 387.9 ±48.4                | 391.7 ±51.7             | 0.061                      | 0.967                      |
| RT non-switch   | 346.5 ±42.4                | 350.8 ±40.1             | 381.4 ±47.0                | 385.3 ±49.4             | 0.072                      | 0.943                      |
| F switch  | 19.1 ±12.7                 | 18.8 ±11.7              | 18.1 ±13.7                 | 18.1 ±14.3              | 0.868                      | 0.857                      |
| F non-switch  | 16.4 ±10.4                 | 16.7 ±10.9              | 15.1 ±11.2                 | 14.1 ±12.6              | 0.677                      | 0.417                      |

### 2.6.2.4 Diskussion

#### Extraversion und Schlaf

Die physiologischen Schlafparameter waren weder in Ruhe- noch in Lärmnächten durch das Persönlichkeitsmerkmal Extraversion beeinflusst. Dies bestätigt die Befunde der älteren und kleineren Studien von Spiegel und Nüesch [1976] sowie von Webb und Friel [1971].

Während die subjektive Schlafbeurteilung nach Ruhenächten bei Extravertierten und Introvertierten noch annähernd gleich war, verschlechterte sich diese nach Lärmnächten bei den Ex-

travertierten in einem größeren Ausmaß. Dies könnte darin begründet sein, dass sich Extravertierte zum Zeitpunkt des Ausfüllens der Fragebögen durch die aktuelle Situation nicht ausreichend stimuliert fühlen. Nach Eysencks 'Arousal Activation' Theorie [1967] benötigen Extravertierte eine größere Stimulation als Introvertierte, um zu einem optimalen Erregungslevel zu gelangen. Die morgendlichen Versuchsbedingungen nach dem Aufstehen könnten möglicherweise diese Anforderung nicht erfüllen, so dass ein herabgesetztes Befinden dazu führt, dass die zurückliegende Nacht schlechter beurteilt wird.

### **Extraversion und Leistung**

Sowohl nach Ruhe- als auch nach Lärnächten waren Extravertierte bei gleich bleibender Fehlerrate ca. 40 ms langsamer als Introvertierte. Dieser Befund unterstützt die Ergebnisse mehrerer früherer Laborstudien zu unterschiedlichen Vigilanz- und Aufmerksamkeitsaufgaben [Taylor & McFatter 2003, Blagrove & Akehust 2001, Koelega 1992].

Diese generell geringere Leistung bei Extravertierten verglichen mit Introvertierten könnten in den unterschiedlichen Aufmerksamkeitsprozessen der beiden Eigenschaftsgruppen begründet sein. Introvertierte können besser auf eine Aufgabe fokussieren und lassen sich zudem nicht so leicht von dem Aufgabenstimulus ablenken wie Extravertierte. Diese Aufmerksamkeitsunterschiede werden z.B. von Blumenthal [2001] in einem Laborexperiment mit Hilfe der Blinzelrate demonstriert. Bei einer visuellen Aufgabe reduzierte sich bei Introvertierten die Blinzelrate auf einen akustischen Reiz, wenn die Aufmerksamkeit auf die visuelle Aufgabe gerichtet war. Blumenthal begründet diesen Befund mit einer vermehrten und effizienteren Aufmerksamkeitsfokussierung bei Introvertierten.

## **2.6.3 Neurotizismus**

### **2.6.3.1 Einleitung**

Neurotizismus als Persönlichkeitsmerkmal beinhaltet die beiden Pole emotionale Stabilität und emotionale Instabilität. Emotional Instabile gelten als äußerst sensibel, besorgt, angespannt und leicht reizbar. Im Gegensatz dazu gelten die emotional Stablen als selbstsicher, gelassen und stressstabil.

#### **Neurotizismus und Schlaf**

Ebenso wie bei der Extraversion gibt es kaum Studien, die anhand von Polysomnogrammdaten die Unterschiede im Schlafverhalten von emotional Stablen und Instablen untersuchen. Die beiden Studien von Spiegel und Nüesch [1976] sowie von Webb und Friel [1971] fanden keine Zusammenhänge zwischen Neurotizismus und physiologischen Schlafparametern.

Im Gegensatz zu den physiologischen Schlafdaten konnten in einer Vielzahl von Studien bedeutsame Zusammenhänge zwischen hohen Neurotizismus-Werten und schlechter Schlafqualität gefunden werden [z.B. Beullens 1999, Gray & Watson 2002, Jensen et al. 1998].

Lärmbedingte Veränderungen des Schlafes bei emotional Instablen fanden Belojevic et al. [1997] sowie Jankovljevic et al. [2006] bei den Anwohnern lauter Straßen in Belgrad. Die Autoren berichteten über positive Korrelationen zwischen Neurotizismus und Schlafbeeinträchtigungen. Diesen Befunden stehen die Ergebnisse von Öhrström und Björkman [1988]

gegenüber, die keinen Zusammenhang zwischen Neurotizismus und subjektiv beeinträchtigter Schlafqualität unter Lärm nachweisen konnten.

### **Neurotizismus und Leistung**

Emotional stabile Personen zeigen generell bei den meisten Reaktionsaufgaben in kontrollierten Laborbedingungen im Vergleich zu emotional instabilen Personen bessere Leistungen [z. B. Cox-Fuenzalida et al. 2004, Newton et al. 1992, Socan & Bucik 1998].

Ein Leistungsvergleich zwischen Personen mit hohen und niedrigen Neurotizismus-Werten nach lärmgestörten Nächten wurde bislang nicht beschrieben. Betrachtet man lärmbedingte Schlafstörungen als partielle und moderate Deprivation des Schlafes, sollten ähnliche – wenn auch kleinere – Effekte auf die Leistung beobachtet werden wie bei ausgedehnten Schlafdeprivationen. In diesen Studien, in denen die Probanden die ganze Nacht wach blieben, zeigten sich in Leistungstests allerdings keine Unterschiede zwischen emotional Stablen und emotional Instablen [Taylor & McFatter 2003, Blagrove & Akehust 2001].

### **Hypothesen**

Während keine lärminduzierten Unterschiede zwischen emotional Stablen und Instablen bei den physiologischen Schlafparametern erwartet werden, wird davon ausgegangen, dass emotional Instabile ihren Schlaf sowohl nach Ruhe- als auch nach Lärmnächten schlechter einschätzen und eine schlechtere Leistung zeigen als emotional stabile Personen.

#### **2.6.3.2 Methoden**

Zur Messung des Persönlichkeitsmerkmals Neurotizismus wird auch der FPI-R [Fahrenberg et al. 1989] eingesetzt. Ebenso wie bei der Extraversion wurden auch beim Neurotizismus Varianzanalysen mit Messwiederholungen gerechnet.

#### **2.6.3.3 Ergebnisse**

Die Neurotizismuswerte variierten zwischen 0 und 8. Die Mediandichotomisierung der Stichprobe erfolgte am Median von 3.5 Probanden mit Werten von 0 bis 3 werden der Gruppe der 'emotional Stablen' (n = 12) zugeordnet, während Probanden mit Werten zwischen 4 und 8 der Gruppe der 'emotional Instablen' (n = 12) zugeteilt wurden.

Die Varianzanalyse brachte keine signifikanten Haupteffekte des Faktors Neurotizismus hervor. Über alle Nächte gemittelt unterschieden sich emotional Stabile von den emotional Instablen weder in den physiologischen Schlafparametern, noch in der subjektiven Beurteilung des Schlafes als auch in der Leistung.

Bei vier abhängigen Variablen konnten Wechselwirkungen festgestellt werden. Die intermittierte Wachzeit und die Zeit in Stadium 1 waren in den Lärmnächten bei den emotional Stablen signifikant erhöht und die Schlafeffizienz verglichen mit den emotional Instablen reduziert. Bezüglich der Leistung machten die emotional Stablen nach Lärmnächten in der non-switch Bedingung mehr Fehler als emotional Instabile.

Tab. 2.6-3: Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) für physiologische Schlafparameter, subjektive Schlafqualität und Leistung getrennt für emotional Stabile und Instabile. P-Werte wurden mit dem F-Test ermittelt.

|   | Introvertierte<br>(n = 11) |                         | Extravertierte<br>(n = 13) |                         | Haupt-<br>effekt<br>p-Wert | Inter-<br>aktion<br>p-Wert |
|---|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|   | Ruhenächte<br>(AM ± SD)    | Lärnnächte<br>(AM ± SD) | Ruhenächte<br>(AM ± SD)    | Lärnnächte<br>(AM ± SD) |                            |                            |
| <b>Schlafparameter</b>                                      |                            |                         |                            |                         |                            |                            |
| SOL [min]   | 25.0 ±14.4                 | 24.5 ±12.2              | 18.6 ±10.3                 | 22.6 ±9.2               | 0.364                      | 0.150                      |
| SPT [min]   | 450.7 ±24.4                | 454.2 ±11.7             | 459.9 ±12.6                | 455.0 ±9.2              | 0.365                      | 0.218                      |
| WASO [min]  | 28.4 ±15.6                 | 42.2 ±19.5              | 31.5 ±11.3                 | 35.5 ±13.2              | 0.755                      | 0.038                      |
| TST [min]   | 422.2 ±30.0                | 411.9 ±26.5             | 428.4 ±15.3                | 419.6 ±17.1             | 0.445                      | 0.825                      |
| SEI (TST/SPT)   | 0.94 ±0.03                 | 0.91 ±0.05              | 0.93 ±0.03                 | 0.92 ±0.03              | 0.718                      | 0.037                      |
| Zeit in S1 [min]  | 20.1 ±7.7                  | 26.7 ±10.4              | 18.4 ±6.9                  | 20.4 ±7.8               | 0.223                      | 0.049                      |
| Zeit in SWS [min]   | 72.5 ±29.0                 | 67.4 ±29.4              | 74.0 ±22.9                 | 68.6 ±24.4              | 0.899                      | 0.926                      |
| Zeit in REM [min]   | 106.4 ±16.0                | 98.9 ±16.1              | 107.5 ±12.8                | 102.5 ±15.7             | 0.685                      | 0.615                      |
| Schlafqualität  | 39.5 ±4.5                  | 32.8 ±4.2               | 37.2 ±4.9                  | 31.6 ±6.6               | 0.426                      | 0.429                      |
| <b>Leistung im Switch-test RT: Reaktionszeit, F: Fehler</b> |                            |                         |                            |                         |                            |                            |
| RT switch   | 372.6 ±47.8                | 376.5 ±52.7             | 368.6 ±52.3                | 372.3 ±50.3             | 0.847                      | 0.962                      |
| RT non-switch   | 368.2 ±46.6                | 371.2 ±50.8             | 362.5 ±50.1                | 367.7 ±46.7             | 0.818                      | 0.645                      |
| F switch  | 20.5 ±13.6                 | 21.6 ±15.4              | 16.6 ±12.5                 | 15.3 ±9.3               | 0.341                      | 0.110                      |
| F non-switch  | 16.3 ±11.4                 | 17.9 ±13.6              | 15.1 ±10.3                 | 12.7 ±9.2               | 0.486                      | 0.005                      |

## 2.6.3.4 Diskussion

### Neurotizismus und Schlaf

Es wurde erwartet, dass sich emotional Stabile und emotional Instabile weder in Ruhenächten noch in Lärnnächten hinsichtlich ihres physiologischen Schlafverhaltens unterscheiden. Für die Ruhenächte konnte diese Annahme bestätigt werden und spiegelt die früheren Befunde von Spiegel und Nüesch [1976] sowie von Webb und Friel [1971] wieder. In Lärnnächten zeigte sich jedoch wider Erwarten, dass emotional Stabile verglichen mit Instabilen erhöhte intermittierte Wachphasen, einen höheren Anteil am Übergangsstadium 1 sowie eine geringere Schlaffeffizienz aufwiesen. Aufgrund der hohen interindividuellen Varianz bei den Polysomnographiedaten und der fehlenden Studien in Bezug auf Neurotizismus konnte nur die Nullhypothese aufgestellt werden.

Dieses unerwartete Ergebnis könnte mit der rechtsschiefen Verteilung der Neurotizismuswerte zusammenhängen. Anders als beim Persönlichkeitsmerkmal Extraversion war die Skala Neurotizismus nicht vollständig besetzt. Der höchste Wert, der erreicht wurde, war eine 8, womit der gesamte obere Teil der Neurotizismus-Skala nicht ausgeschöpft war. Die Stichprobe bestand somit nur aus emotional Stabilen und mäßig emotional Instabilen. Diese Problematik beruht größtenteils auf der schon beschriebenen Vorselektion.

Die erwartete schlechtere Beuteilung des Schlafes bei den emotional Instabilen blieb sowohl nach Ruhe- als auch nach Lärnnächten aus. Diese im Kontrast zu der Literatur stehenden Ergebnisse können wieder auf die fehlende Spannweite bei den Neurotizismuswerten zurückgeführt werden. Bei Einbeziehung hoch emotional instabiler Personen sähen die Resultate wahrscheinlich anders aus.

## **Neurotizismus und Leistung**

Entgegen der Annahme konnte nach Ruhenächten kein Einfluss von Neurotizismus auf die Leistung nachgewiesen werden. Erneut kommt bei diesem Resultat wieder die besprochene Stichprobenproblematik zum Tragen.

Die Befunde nach Lärmnächten, dass emotional Instabile weniger Fehler machen als Stabile, stehen auch im Widerspruch zur Hypothese, sind aber mit den Resultaten bezüglich der physiologischen Schlafparameter vereinbar. Emotional Stabile waren in den Lärmnächten häufiger wach und zeigten eine geringere Schlafeffizienz als emotional Instabile. Da sich emotional Stabile durch eine hohe Leistungsmotivation auszeichnen [Judge & Ilies 2002], liegt es nahe, dass sie durch eine erhöhte Anstrengung versuchen, diese Schlafbeeinträchtigungen auszugleichen. In der Instruktion wurde der Fokus auf die Reaktionszeiten gelegt und daher ist es wahrscheinlich, dass die emotional Stablen bemüht waren, ihre Schnelligkeit auch nach Lärmnächten beizubehalten. Die Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit geht dabei jedoch auf Kosten der Genauigkeit („speed accuracy trade-off“).

## 2.7 Literatur

1. Amelang M, Bartussek D, 2001: Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung (5. erw. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer.
2. Anderson CMB, 1971: The measurement of attitude to noise and noises. Acoustics Report, 52 , Teddington, Middx: National Physical Laboratory.
3. Arnberg PW, O.Bennerhult, J.L.Eberhardt 1990: Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic. Journal of the Acoustical Society of America 88:1486-1493.
4. Basner M, Buess H, Elmenhorst D, Gerlich A, Luks N, Maaß H, Mawet L, Müller E.W, Müller U, Plath G, Quehl J, Samel A, Schulze M, Vejvoda M, Wenzel J, 2004: Nachtflugwirkungen.Band 1, Zusammenfassung. [www.dlr.de/me/institut/abteilungen/flugphysiologie/fluglaerm/fb2004-07-d.pdf](http://www.dlr.de/me/institut/abteilungen/flugphysiologie/fluglaerm/fb2004-07-d.pdf).
5. Basner M, Buess H, Luks N, Maaß H, Mawet L, Müller EW, Müller U, Piehler C, Plath G, Quehl J, Rey E, Samel A, Schulze M, Vejvoda M, Wenzel J, 2001: Nachtfluglärmwirkungen – eine Teilauswertung von 64 Versuchspersonen in 832 Schlaflabornächten. DLR-Forschungsbericht 2001-26, ISSN 1434-8454.
6. Basner M, Isermann U, Samel A, 2005: Die Umsetzung der DLR-Studie in einer nachtmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. Z Lärmbekämpfung 52:109-123
7. Belojevic G, Jakovljevic B, Aleksic O, 1997: Subjective reactions to traffic noise with regard to some personality traits. Environment International, 23, 221-226.
8. Belojevic G, Öhrström E, Rylander R, 1992: Effects of noise on mental performance with regard to subjective noise sensitivity. Int Arch Occup Environ Health 64:293-301.
9. Bengtsson J, Persson Waye K, 2003: Is a 'pleasant' low frequency noise also less annoying? In: de Jong RG, Houtgast T, Franssen EAM, Hofmann WF (eds): Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem. Schiedam: Foundation ICBEN. pp 167-168.
10. Bengtsson J, Persson Waye K, Kjellberg A, 2004: Evaluation of effects of due to low-frequency noise in a low demanding work situation. J Sound Vib 278:83-99.
11. Bengtsson J, Persson Waye K, Kjellberg A, 2004: Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for the perception of pleasantness. Acta Acustica United with Acustica 90:171-180.
12. Benton S, Leventhall HG, 1986: Experiments in to the impact of low level, low frequency noise upon human behaviour. J Low Freq Noise Vibr 5:143-162.
13. Berg WK, Jackson JC, Graham FK, 1975 Tone intensity and rise-decay time. Effects on cardiac responses during sleep. Psychophysiology 12, 254-261
14. Berglund B, Lindvall T, Schwela DH, 1999: Guidelines for Community Noise. Geneva: WHO
15. Beullens J, 1999: Determinants of insomnia in relatively healthy elderly. A literature review. Tijdschr Gerontol Geriatr, 30 (1), 31-8.
16. Bisping R, 2006: Erarbeitung von Geräuschszenarien. Einzelvorhaben 2111. Abschlussbericht. BMBF, Förderkennzeichen 19U2062A
17. Blagrove M, Akehurst L, 2001: Personality and the modulation of effects of sleep loss on mood and cognition. Personality and Individual Differences, 30, 819-828.
18. Blumenthal TD, 2001: Extraversion, attention, and startle response reactivity. Personality and Individual Differences, 30, 495-503.
19. Born J & Plihal W, 2000: Gedächtnisbildung im Schlaf: Die Bedeutung von Schlafstadien und Stresshormonfreisetzung. Psychologische Rundschau, 51(4), 198-208.
20. Brink M, Wirth K, Rometsch R, Schierz Ch, 2005: Lärmstudie 2000 Zusammenfassung. ETH Zürich, Zentrum Organisations- u. Arbeitswiss., <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&n=444>
21. Broner N, Leventhall HG, 1984: The annoyance and inacceptability of lower level low frequency noise. Journal of Low Frequency Noise and Vibration 3: 154-166
22. Bullen RB, Hede AJ, Kyriacos E, 1986: Reaction to aircraft noise in residential areas around Australian airports. Journal of Sound and Vibration, 108, 199-225.
23. Burle B, Vidal F, Bonnet M, 2004: Electroencephalographic Nogo potentials in a no-movement context: the case of motor imagery in humans. Neuroscience Letters 360:77-80.
24. Carter NL, 1998: Cardiovascular response to environmental noise during sleep. In: Carter N, Job RFS (eds): 7th Int Congr on Noise as a Public Health Problem, Noise Effects '98. Sydney, Australia. Vol 2, pp 439-444



25. Collins WE, Iampietro PF, 1972: Simulated sonic booms and sleep: effects of repeated booms of 1.0 psf. Federal Aviation Administration: Report No. FAA-AM-72-35.
26. Conradt R, Brandenburg U, Ploch T, Peter JH, 1997: Aktigraphie: methodische Begrenzungen für die Beurteilung von Schlafstadien und Schlafstruktur gesunder Probanden. *Pneumologie* 51:721-724.
27. Cox-Fuenzalida L, Swickert R, Hittner J.B, 2004: Effects of neuroticism and workload history on performance. *Personality and Individual Differences*, 36, 447-456.
28. Danker-Hopfe H, Kunz D, Gruber G, Klösch G, Lorenzo JL, Himanen SL, Kemp B, Penzel T, Röschke J, Dorn H, Schlögl A, Trenker E, Dorffner G, 2004: Interrater reliability between scorers from eight European sleep laboratories in subjects with different sleep disorders. *J Sleep Res* 13:63-69.
29. Di Nisi J, 1987: Modifications de la fréquence cardiaque et de la vasomotricité digitale provoquées par le bruit. Différences interindividuelles au cours de la veille et du sommeil. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg; 1987
30. Di Nisi J, Muzet A, Ehrhart J, Libert J.P, 1990: Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans. *Sleep*, 13 (2), 108-120.
31. Directive 2002/49/EG of the European Parliament and of the Council. 2002. Brussels, EU/DG Environment.
32. Dorn H, Schlögl A, Trenker E, Dorffner G, 2004: Interrater reliability between scorers from eight European sleep laboratories in subjects with different sleep disorders. *Journal of Sleep Research* 13:63-69.
33. Eberhardt JL, 1987: The influence on sleep of noise and vibrations caused by road traffic. Akademisk avhandling. Lund:Bloms Boktryckeri AB.
34. Eberhardt JL, 1988: The influence of road traffic noise on sleep. *J Sound Vib* 127:449-455
35. Eberhardt JL, 1990: The disturbance by road traffic noise of the sleep of prepubertal children as studied in the home. In: Berglund B, Berglund U, Karlsson J, Lindvall T (eds): 4th Int Congr on Noise as a Public Health Problem. New Advances in Noise Research. Stockholm: Swedish Council for Building Research, Part II, pp 65-79.
36. Eberhardt JL, Akseleson KR, 1987: The disturbances by road traffic noise of the sleep of young male adults as recorded in the home. *J Sound Vib* 114:417-434.
37. Eberhardt JL, Stråle LO, Berlin MHB 1987: The influence of continuous and intermittent traffic noise on sleep. *J Sound Vib* 116:445-464.
38. Ehrenstein W, Müller-Limmroth W, 1981: Experimentelle Untersuchungen über Langzeitwirkungen von Lärm auf den schlafenden und wachen Menschen. Umweltbundesamt.
39. Ehrenstein W, Schuster M, Müller-Limmroth W, 1982: Felduntersuchungen über Wirkungen von Lärm auf schlafende Menschen. Umweltbundesamt.
40. EU Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.
41. European Commission 1997: Green Paper on Future Noise Policy. COM 540 Final (1997)
42. Eysenck HJ, 1967: The biological basis of personality, C.C. Thomas (Hrsg.): Springfield, Illinois.
43. Fahrenberg J, Hampel R, Selg H, 1989: Das Freiburger Persönlichkeitsinventar FPI. Revidierte Fassung FPI-R und teilweise geänderte Fassung FPI-A1. Verlag für Psychologie, Hogrefe, Göttingen.
44. Federal Interagency Committee on Aviation Noise (FICAN), 1997: Effects of Aviation Noise on Awakenings from Sleep. <http://www.fican.org/sleepdisturbance/sleepframe.html>
45. Felscher-Suhr U, Guski R, Hunecke M, Kastka J, Paulsen R, Schuemer R, Vogt J, 1996: Eine methodologische Studie zur aktuellen Erfassung von Alltagstätigkeiten und deren Störungen durch Umweltlärm. *Z Lärmbekämpfung* 43:61-69
46. Fidell S, Pearsons K, Howe R, Tabachnick B, Silvati L, Barber DS, 1994: Noise-induced sleep disturbance in residential settings. Armstrong Laboratory, Air Force Materiel Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433-6573, AL/OE-TR-1994-0131
47. Fidell S, Rowe RR, Tabachnick BG, Pearsons KS, Sneddon MD, 1995: Noise-induced sleep disturbance in residences near two civil airports. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, NASA Contractor Report 198252
48. Gratton G, Coles M, GH, Donchin E, 1983: A new method for off-line removal of ocular artefact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 55:468-484.
49. Gray E.K. & Watson D, 2002: General and specific traits of personality and their relation to sleep and academic performance. *Journal of Personality*, 70 (2), 177-206.

50. Griefahn B, 1976 a Pulsfrequenzänderung durch Überschallknalle während des Schlafes, Eur J Appl Physiol 34, 279 – 289 (1975)
51. Griefahn B, 1976 b Effects of sonic booms on fingerpulse amplitudes during sleep. Int Arch Occup Environ Health 36, 57 – 66 (1975)
52. Griefahn B, 1976: Sleep disturbance by noise - adaptation, habituation, compensation. Proceedings of the Congress of Occupational Health of the Hungarian Society of Occupational Medicine, Oct. 4.-6.1976. Hungaria: Budapest, p 36
53. Griefahn B, 1977: Analyse des Verhaltens von Pulsfrequenz und Volumenpuls bei Applikation von Überschallknallen. Z Arb wiss 31:240-243.
54. Griefahn B, 1977: Long-term exposure to noise - aspects of adaptation, habituation, and compensation. Waking Sleeping 1383-386
55. Griefahn B, 1977: Zur Ermittlung reizbedingter Pulsfrequenzänderungen. Eur J Appl Physiol 37:13-16.
56. Griefahn B, 1978: Die Einwirkung von Schienenverkehrslärm auf den schlafenden Menschen. In: Jansen G, Rehm S, Griefahn B, Gros E: Wirkungen von Lärm auf besondere Personengruppen. Umweltbundesamt Berlin, pp 239-275
57. Griefahn B, 1985: Schlafverhalten und Geräusche. Feld- und Laboruntersuchungen über Straßenverkehr, EEG-Analyse, Literaturlauswertung. Stuttgart: Ferdinand Enke.
58. Griefahn B, 1986: A critical load for nocturnal high-density road traffic noise. American Journal of Industrial Medicine 9:261-269.
59. Griefahn B, 1989: Cardiac responses caused by shots of tanks during sleep. J Sound Vib 128:109-119
60. Griefahn B, 1992: Noise control during the night. Acoust Austral 20:43-47
61. Griefahn B, 2000: Noise-induced extraaural effects. J Acoust Soc Jpn 21:307-317
62. Griefahn B, 2002: Sleep disturbances related to environmental noise, Noise & Health, 4 (15), 57-60.
63. Griefahn B, Di Nisi J, 1992: Mood and cardiovascular functions during noise, related to sensitivity, type of noise and sound pressure level. J Sound Vib 155:111-123
64. Griefahn B, Gros E, 1986: Noise and sleep at home, a field study on primary and after-effects. J Sound Vib 105:373-383
65. Griefahn B, Jansen G, 1975: Disturbances of sleep by sonic booms. Sci Total Environ 4:107-112
66. Griefahn B, Jansen G, 1988: Auswirkungen von Schießgeräuschen auf den Nachtschlaf. Umweltbundesamt 105 01 203/03
67. Griefahn B, Jansen G, Klosterkötter W, 1976: Zur Problematik lärmbedingter Schlafstörungen - eine Auswertung von Schlafliteratur. Berlin UBA-Bericht 4/76.
68. Griefahn B, Künemund C, Bröde P, Mehnert P, 2001: Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. Somnologie 5:71-80
69. Griefahn B, Marks A, Kuenemund C, Basner M, 2005: Awakenings by road-, rail- and airtraffic noise. Forum Acusticum, Budapest
70. Griefahn B, Möhler U, Schuemer R, 1999: Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Straßen- und Schienenverkehr. München: SGS.
71. Griefahn B, Scheuch K, Jansen G, Spreng M, 2004: Protection goals for residents in the vicinity of civil airports. Noise and Health 6 (24):51-62.
72. Griefahn B, Schuemer-Kohrs A, Schuemer R, Moehler U, Mehnert P, 2000: Physiological, subjective, and behavioural responses during sleep to noise from rail and road traffic. Noise and Health 3 (9):59-71.
73. HCN, 1999: Health Council of the Netherlands: Public health impact of large airports. The Hague: HCN. 1999/14E.
74. Heinonen-Guzejev M, Vuorinen HS, Kaprio J, Heikkilä K, Mussalo-Rauhamaa H, Koskenvuo M, 2000: Self-report of transportation noise exposure, annoyance and noise sensitivity in relation to noise map information. Journal of Sound and Vibration, 234 (2), 191-206.
75. Hellbrück J, 2006: Kognitive Leistung und Sprachverständlichkeit. Einzelvorhaben 2221. Abschlussbericht. BMBF, Förderkennzeichen 19U2062D
76. Hellbrück J, 2006: Kognitive Leistung und Sprachverständlichkeit. Einzelvorhaben 2221. Abschlussbericht. BMBF, Förderkennzeichen 19U2062D
77. Heuer H, Spijkers W, Kiesswetter E; Schmidtke V, 1998: Effects of sleep loss, time of day and extended mental work on implicit and explicit learning of sequences. Journal of Experimental Psychology Applied 4:139-162.

78. Hoeger R, Schreckenber D, Felscher-Suhr U, Griefahn B, 2002: Night-time annoyance – state of the art. *Noise & Health* 4:19-25.
79. Hofman W, Kumar A, Eberhardt J, 1993: Comparative evaluation of sleep disturbance due to noises from airplanes, trains and trucks. In: Vallet M (ed): *Noise & Man '93*. 6th International Congress. Bron: IN-RETS, Vol. 2:559-562.
80. Hofman WF, Kumar A, Tulen JHM, 1995: Cardiac Reactivity to traffic noise during sleep in man. *J Sound Vib* 179:577-589
81. Hord 1966 Hord DJ, Lubin A, Johnson LC, 1966: The evoked heart rate response during sleep. *Psychophysiology* 3:46-54.
82. Horne JA, Pankhurst FL, Reyner LA, Hume KI, Diamond I, 1994: A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. *Sleep* 17:146-159
83. Hucklebridge F, Clow A, Rahman H, Evans P, 2000: The cortisol response to normal and nocturnal awakening. *Journal of Psychophysiology* 14:24-28.
84. Hume KI, Whitehead C, 2004: Aircraft noise and measures of sleep arousals. *Internoise 2004*, Prague, 7 pages
85. Hutt T., Von Bernuth A., Lenard H.G., Hutt S.J., Precht H.F.R. 1968: Habituation in relation to state in the human neonate. *Nature* 220: 618-620.
86. Hygge S, 2003: Classroom experiments on the effects of different noise sources and sound levels on long-term recall and recognition in children. *Applied Cognitive Psychology* 17:895-914.
87. Inaba R, Okada A, 1988: Study on the effects of infra and low frequency sound on the sleep by EEG recording. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration* 7:15-19.
88. Ising H, Braun C, 2000: Acute and chronic effects of noise: Review of the research conducted at the Institute for Water, Soil and Air Hygiene. *Noise & Health* 7:7-24.
89. Ising H, Ising M, 2001: Int Symp on Noise Pollution & Health. April 6-8 2001, Cambridge, UK. Programme & Abstract Book, p 39.
90. Ising H, Ising M, 2002: Chronic Cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise. *Noise & Health* 4:13-21.
91. Jakovljevic B, Belojevic G, Paunovic K, Stojanov V, 2006: Road traffic noise and sleep disturbances in an urban population: cross-sectional study. *Croatian Medicine Journal* 47 (1) 125-33.
92. Jansen G, 1967: *Zur nervösen Belastung durch Lärm*. Darmstadt: Steinkopf
93. Jansen G, 1970: *Beeinflussung des natürlichen Nachtschlafes durch Geräusche*. Forschungsberichte des Landes NRW. Westdeutscher Verlag: Köln und Opladen.
94. Jensen E, Dehlin O, Hagberg B, Samuelsson G, Svensson T, 1998: Insomnia in an 80-year old population: relationship to medical, psychological and social factors. *Journal of Sleep Research*, 7, 183-189.
95. Job RFS, 1988: Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 991-1001.
96. Job RFS, 1999: Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise & Health*, 3, 57-68.
97. Jones K, Harrison Y, 2001: Frontal lobe function, sleep loss and fragmented sleep. In: *Sleep Med Rev* 5:463-475
98. Jones K, Harrison Y, 2001: Frontal lobe function, sleep loss and fragmented sleep. *Sleep Medicine Reviews* 5 (6):463-475.
99. Judge T, Ilies R, 2002: Relationship of personality to performance motivation: a meta-analytic review. *Journal of Applied Psychology*, 87 (4), 797-807.
100. Jurriëns AA, Griefahn B, Kumar A, Vallet M, Wilkinson RT, 1983: An essay in European research collaboration: common results from the project on traffic noise and sleep in the home. In: Rossi G (ed): *Noise as a Public Health Problem*. Milano: Edizioni Tecniche a cura del Centro Ricerche e Studi Amplifon. pp 929-937.
101. Kahn A, 2002: Noise exposure from various sources – sleep disturbance dose-effect relationships on children. WHO Technical Meeting on Exposure-response Relationships of Noise on Health. Paper 5038933-2002/7.
102. Kawada T, Suzuki S, Aoki S, Ogawa M, 1993: Relationship between subjective sleep rating and objective sleep parameters: A case study. *Environmental Research* 60:136-144.
103. Keefe FB, Johnson LC, Hunter EJ, 1971: EEG and autonomic response pattern during waking and sleep stages. *Psychophysiology* 8:198-212.

104. Key K, Payne CM, 1981: Effects of noise on performance and annoyance for women and men. *Perceptual Motor Skills* 52:435-441.
105. Kingshott RN, Cosway R., Deary IJ, Douglas NJ, 2000: The effect of sleep fragmentation on cognitive processing using computerized topographic brain mapping. *Journal of Sleep Research* 9:353-357.
106. Kjellberg A, Landström U, Tesarz M, Söderberg L, Akerlund E, 1996: The effects of nonphysical noise characteristics, ongoing task and noise sensitivity on annoyance and distraction due to noise at work. *Journal of Environmental Psychology*, 16, 128-136.
107. Klatte M, Lee N, Hellbrück J (in press). Effects of irrelevant speech and articulatory suppression on serial recall of heard and read materials. *Psychologische Beiträge*.
108. Koelega HS, 1992: Extraversion and vigilance performance: 30 years of inconsistencies. *Psychological Bulletin*. 112 (2), 239-258.
109. Kok A, 1999: Varieties of inhibition: manifestations in cognition event-related potentials and aging. In: *Acta Psychol* 101:129-158
110. Kok A, 2001: On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology* 38:557-577.
111. Kramer et al. 1991 vielleicht 71 ? Kramer M, Roth T, Trinder J, Cohen A, 1971: Noise disturbance and sleep. The relationship of noise disturbed sleep to post-sleep behavior: An exploratory study. FAA Report No. FAA-NO-70-16. Washington: FAA
112. Langdon FJ, Buller IB, 1977: Road traffic noise and disturbance to sleep. *J Sound Vib* 50:13-28
113. Lazarus H, 1998: Noise and communication: Present state. In: Carter N, Job RFS (eds): *Noise Effects '98*. Sydney: Noise Effects '98 Pty. 157-162
114. Lazarus H, Lazarus-Mainka G, Schubeius M, 1985: *Sprachliche Kommunikation unter Lärm*. Ludwigshafen: Kiehl
115. LeVere TE, Bartus RT, Morlock GW, Hart FD, 1973: Arousal from sleep: responsiveness to different auditory frequencies equated for loudness. *Psychophysiology and Behavior* 10:53-57.
116. LeVere TE, Morlock GW, Hart FD, 1975: Waking performance decrements following minimal sleep disruption: the effects of habituation during sleep. *Physiological Psychology* 3:147-154
117. LeVere TE, Morlock GW, Thomas LP, Hart FD, 1974: Arousal from sleep: the differential effect of frequencies equated for loudness. *Psychophysiology and Behavior* 12:573-582.
118. Littell RC, Milliken GA, Stroup WW, Wolfinger RD (1996), *SAS® System for Mixed Models*, SAS® Institute Inc, Cary, NC.
119. Ludlow & Morgan 1972 Ludlow JE, Morgan PA, 1972: Behavioural awakening and subjective reactions to indoor sonic booms. *J Sound Vib* 25:479-495.
120. Lukas et al. 1971 Lukas JS, Dobbs ME, Kryter KD 1971: Disturbance of human sleep by subsonic jet aircraft noise and simulated sonic booms. NASA Rep, CR 1780.
121. Maschke C, 1992: *Der Einfluß von Nachtfluglärm auf den Schlafverlauf und die Katecholaminausscheidung*. Inauguraldiss. TU Berlin
122. Maschke C, Arndt D, Ising H, Lauder G, Thierfelder W, Contzen S, 1995: *Nachtfluglärmwirkungen*. Schreibe Reihe Verein WaBoLu 96 Gustav Fischer Verlag
123. Maschke C, Hecht K, 2001: Stresshormone und Schlafstörungen – elektrophysiologische und hormonelle Aspekte. In: Bartels KH, Ising H (Hrsg) *Nachtfluglärmproblematik*. WaBoLu-Hefte pp 91-97.
124. Maschke C, Hecht K, Wolf U, 2001: Nächtliches Erwachen durch Fluglärm. *Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz* 44:1001-1010.
125. Miedema HME, Oudshoorn GMS, 2001: Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives* 109:409-416.
126. Miedema HME, Vos H, 1998: Exposure-response relationships for transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 104:3432-3445
127. Miedema HME, Vos H, 2003: Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *Journal of Acoustical Society of America*, 113, 1492-1504.
128. Morris AM, So Y, Lee KA, Lash AA, Becker CE, 1992: The P300 Event-Related Potential – The effect of sleep deprivation. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 34 (12):1143-1152.
129. Müller-Limmroth W, 1976: *Experimentelle Untersuchungen über die Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Schlafstadienmuster älterer Menschen*. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen 8680-IV/4a-22814.

130. Muzet A, 1983: 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. pp 883-893
131. Muzet A, Ehrhart J, Eschenlauer R, Lienhard JP, 1980: Modifications vegetatives entrainees par le bruit au cours du sommeil. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Comité Bruit et Vibration. Conventi-on no 76.22.
132. Muzet A, Weber LD, Di Nisi J, Ehrhart J, 1985: Comparaison de la reactivite cardiovasculaire au bruit au cours de la veille et du sommeil. Centre d'etudes bioclimatique du CNRS Strasbourg Convention No 822431
133. Muzur A, Pace-Schott EF, Hobson JA, 2002: The prefrontal cortex in sleep. Trends in Cognitive Sciences 6 (11):475-481.
134. Namba S, Kuwano S, Okamoto T, 2004: Sleep disturbance caused by meaningful sounds and the effect of background noise. Journal of Sound and Vibration 277:445-452.
135. Newton T, Slade P, Butler N, Murphy P, 1992: Personality and performance on a simple visual search task. Personality and Individual Differences, 13 (3), 381-382.
136. Nicolas A, Bach V, Tassi P, Dewasmes G, Ehrhart J, Muzet A, Libert JP, 1993: Electroencephalogram and cardiovascular responses to noise during daytime sleep in shiftworkers. Eur J Appl Physiol 66:76-84.
137. Nivison M. E, Endresen I. M, 1993: An analysis of relationships among environmental noise, annoyance and sensitivity to noise, and the consequence for health and sleep. Journal of Behavioural Medicine, 16, 257-276.
138. Öhrström E, 1995: Effects of low levels from road traffic noise during night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity. Journal of Sound and Vibration 179:603-615.
139. Öhrström E, 1999: Sleep disturbances caused by road traffic noise. J Acoust Soc Am 105:1218.
140. Öhrström E, 2004: Longitudinal surveys on effects of changes in road traffic noise: effects on sleep assessed by general questionnaires and 3-day sleep logs. J Sound Vib 276:713-727.
141. Öhrström E, Agge A, Björkman M, 1998: Sleep disturbances before and after reduction in road traffic noise. In: Carter N, Job RFS (eds): 7th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Noise Effects '98. Sydney, Australia. Vol 2, pp 451-454
142. Öhrström E, Björkman M, 1988: Effects of noise-disturbed sleep - a laboratory study on habituation and subjective noise sensitivity. Journal of Sound and Vibration, 122, 277-290.
143. Öhrström E, Björkman M, Rylander R, 1988: Noise annoyance with regard to neurophysiological sensitivity, subjective noise sensitivity and personality variables. Psychological Medicine, 18, 605-613.
144. Öhrström E, Rylander R, 1982: Sleep disturbance effects of traffic noise – a laboratory study on after effects. J Sound Vib 84:87-103
145. Öhrström E, Rylander R, 1990: Sleep disturbance by road traffic noise - a laboratory study on number of noise events. Journal of Sound and Vibration, 143, 93-101.
146. Öhrström E, Skånberg A, 2004: Sleep disturbance from road traffic and ventilation noise – laboratory and field experiments. Journal of Sound and Vibration 271:279-296.
147. Öhrström E, Skånberg A, Svensson H, Gidlöf-Gunnarsson A, 2006: Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. Journal of Sound and Vibration, 295 (1-2), 40-59.
148. Okada A, Inaba R, 1990: Comparative study on the effects of infra- and low frequency sound and audible sound on sleep. In: Berglund B, Berglund U, Karlsson J, Lindvall T (eds): 4th Int Congr on Noise as a Public Health Problem. New Advances in Noise Research. Stockholm: Swedish Council for Building Research, Part II, pp 31-38.
149. Ollerhead JB, Diamond I, 1993: Social surveys of night-time effects of aircraft noise. In: M. Vallet (ed): 6th Int Congr Noise as a Public Health Problem, Vol 3, pp 373-376.
150. Ollerhead JB, Jones CJ, Cadoux RE, Woodley A, Atkinson B, Horne JA, Pankhurst F, Reyner L, Hume KI, Van F, Watson A, Diamond ID, Egger P, Holmes D, McKean J, 1992: Report of a field study of aircraft noise and sleep disturbance. London: The Department of Transport.
151. Osguthorpe DJ, Mills JH. 1982: Non-auditory effects of low-frequency noise exposure in humans. Otolaryngology – Head and Neck Surgery 90:367-370.
152. Oswald I, Taylor AM, Treisman M, 1960: Discriminative responses to stimulation during human sleep. Brain 83:440-453.
153. Passchier-Vermeer W, Vos H, Steenbekkers JHM, van der Ploeg FD, Groothuis-Oudshoorn K, 2002: Sleep disturbance and aircraft noise exposure. Exposure-effect relationships. TNO-rapport 2002.027. ISBN-number 90-6743-894-4.

154. Pearsons KS, Barber DS, Tabachnick BG, 1989: Analyses of the predictability of noise-induced sleep disturbance. HSD/YA-NSBIT, HSD-TR-89-029.
155. Penzel T, Hajak G, Hoffmann RM, Lund R, Podszus T, Pollmächer T, Schäfer T, Schulz H, Sonnenschein W, Spieweg I, 1993: Empfehlungen zur Durchführung und Auswertung polygraphischer Ableitungen im diagnostischen Schlaflabor. Zeitschrift für Elektroenzephalographie, Elektromyographie und verwandte Gebiete, 2(24):65-70.
156. Persson Waye K, 2006: Health aspects of low frequency noise. In: Institute of noise Control Engineering of the USA (ed): Proceedings of inter noise 2006, Dec 3-6, Honolulu, Hawaii, USA. CD-ROM, 1p.
157. Persson Waye K, Agge A, 2005: 'The importance of the immediate soundscape for annoyance in the urban environment.' Proceedings of the congress and exposition of noise control engineering Internoise 2005
158. Persson Waye K, Agge A, Clow A, Hucklebridge F, 2004: Cortisol response and subjective sleep disturbance after low-frequency noise exposure. J Sound Vib 277:453-457.
159. Persson Waye K, Bengtsson J, Rylander R, Hucklebridge F, Evans P, Clow A, 2002: Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance. Life Science, 70, 745-758.
160. Persson Waye K, Clow A, Edwards S, Hucklebridge F, Rylander R, 2003: Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality. Life Sciences 72:863-875.
161. Persson Waye K, Pedersen CS, Møller H, 2006: Low-frequency noise complaints – a detailed investigation of twenty-two cases. In: Institute of noise Control Engineering of the USA (ed): Proceedings of inter noise 2006, Dec 3-6, Honolulu, Hawaii, USA. CD-ROM 9p.
162. Persson Waye K, Rylander R, 2001: The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. J Sound Vib 240:483-497.
163. Persson Waye K, Rylander R, Benton S, Leventhall HG, 1997: Effects on performance and work quality due to low frequency ventilation noise. J Sound Vib 205:467-474.
164. Peters RW, Moore BCJ, Baer T, 1998: Speech reception thresholds in noise with and without spectral and temporal dips for hearing impaired and normally hearing people. J Acoust Soc Am 103:1,577-587
165. Quehl J, 2005: Effects of Nocturnal Aircraft Noise – Volume 4 – Psychological Effects, Forschungsbericht DLR FB 2004-10/E, ISSN 1334-8454.
166. Rechtschaffen A, Kales A, 1968: A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages in human subjects. US Dept of Health, Education, and Welfare. Public Health Service – National Institutes of Health, National Institute of Neurological Diseases and Blindness, Neurological Information Network, Bethesda, Maryland 20014.
167. Richter P, Wagner T, Heger R, Weise G, 1998: Psychophysiological analysis of mental load during driving on rural roads: a quasi-experimental field study. Ergonomics 41:593-609.
168. Roffwarg HP, Muzio JN, Dement WC, 1966: Ontogenetic development of the human sleep-dream cycle. Science 152:604-619.
169. Rylander R, Sörensen S, Berglund K, 1972: Sonic boom effects on sleep – a field experiment on military and civilian populations. J Sound Vib 24:41-50.
170. Schapkin SA, Falkenstein M, Marks A, Griefahn B, 2006: After effects of noise-induced sleep disturbances on inhibitory functions. Life Sciences 78:1135-1142.
171. Schieber JP, Méry J, Muzet A, 1968: Étude analytique en laboratoire de l'influence du bruit su le sommeil. Centre d'étude bioclimatique du CNRS Strasbourg Convention No 63 FR 138
172. Schreckenberg D, Schümer-Kohrs A, Schümer R, Griefahn B, Möhler U, 1999: An interdisciplinary study on railway and road traffic noise: annoyance differences. Joint Meeting ASA/EAA/DEGA. J Acoust Soc Am 105, No 2:1219
173. Schütte M, Marks A, 2004: Entwicklung des Dortmunder Lärmempfindlichkeits- Fragebogens (DoLe). In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.) Bericht zum 50. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 24.-26.03.2004 an der ETHZ Zürich (S 387-390). Dortmund: GfA-Press.
174. Seifert J, 2005: Ereigniskorrelierte EEG-Aktivität. Berlin: Pabst.
175. Sloven PA (2003). Effects of low frequency noise in humans. In: de Jong R, Houtgast T, Franssen EAM, Hofman WF: Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem. Schiedam, The Netherlands: Foundation ICBEN 2003. pp 108-109.
176. Smith A, 2003: The concept of noise sensitivity: implications for noise control. Noise & Health, 5 (18), 57-59.
177. Smith A, Maben A, 1993: Effects of sleep deprivation, lunch, and personality on performance, mood, and cardiovascular function. Physiology & Behavior, 54, 967-972.

178. Smith A, Stansfeld S, 1986: Aircraft noise exposure, noise sensitivity, and everyday errors. *Environment and Behaviour*, 18, 214-226.
179. Smith A.P, Rich N, 2002: Helicopter noise exposure, noise sensitivity, annoyance and cardiovascular response. *Environment and Behaviour*, 18, 214-226.
180. Socan G, Bucik V, 1998: Relationship between speed of information-processing and two major personality dimensions - extraversion and neuroticism. *Personality and Individual Differences*, 25, 35-48.
181. Spiegel R, Nüesch E, 1976: Correlations between personality characteristics and sleep variables in healthy subjects. 3rd Europ. Congr. Sleep Res, Montpellier 1976, 302-305.
182. Spreng M, 1980: Influence of impulsive and fluctuating noise upon physiological excitations and short-time readaptation. *Scandinavian Audiology* 12(Suppl):299-306.
183. Stansfeld SA, 1992: Noise, noise sensitivity and psychiatric disorder, *Psychological Medicine: Monographs*, Supplement 22.
184. Stansfeld SA, Clark CR, Turpin GL, Jenkins M, Tarnopolsky A, 1985: Sensitivity to noise in a community sample: II. Measurement of psychophysiological indices. *Psychological Medicine*, 15, 255-263.
185. Stansfeld SA, Sharp DS, Gallacher J, Babisch W, 1993: Road traffic noise, noise sensitivity and psychological disorder. *Psychological Medicine*, 23, 977-985.
186. Strauch et al. 1976 Strauch I, Schneider-Düker M, Zayer H, Heine HW, Heine I, Lang R, Müller N, 1976: Der Einfluss sinnvoller akustischer Signale auf das Schlafverhalten. *Archiv für Psychologie* 128:75-95
187. Surprenant A, 1999: The effect of noise on memory for spoken syllables. *Int JPsychol* 34:328-333
188. Taylor DJ, McFatter RM, 2003: Cognitive performance after sleep deprivation: does personality make a difference? *Personality and Individual Differences*, 34 (7), 1179-1193.
189. Thiessen GJ, Lapointe AC, 1983: Effect of continuous traffic noise on percentage of deep sleep, waking, and sleep latency. *J Acoust Soc Am* 73:225-229.
190. Tulen JHM, Kumar A, Jurriëns AA, 1986: Psychophysiological acoustics of indoor sound to traffic noise during sleep. *Journal of Sound and Vibration* 110:129-141
191. Tune GS, 1969: The influence of age and temperament on the adult human sleep-wakefulness pattern. *Br J Psychol* 60:431-441.
192. Vallet M, Gagneux JM, Blanchet V, Favre B, Labiale G, 1983: Long term sleep disturbance due to traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* 90, 173-191
193. Vallet M, Gagneux JM, Simonnet F, 1980: Effects of aircraft noise on sleep: an in situ experience. In: Tobias J, Jansen G, Ward WD (eds): 3rd Int Congr on Noise as a Public Health Hazard. ASHA Reports Nr. 10, Rockville, Maryland, pp 391-396
194. Vallet M, Olivier D, Laurens JF, Clairet JM, 1990: Effects on road traffic noise on pulse rate during sleep. In: Berglund B, Berglund U, Karlsson J, Lindvall T (eds): 4th Int Congr on Noise as a Public Health Problem. *New Advances in Noise Research*. Stockholm: Swedish Council for Building Research, Part II, pp 21-30.
195. van Kamp I, Job R.F, Hatfield J, Haines M, Stellato R.K, Standfeld S.A, 2004: The role of noise sensitivity in the noise-response relation: a comparison of three international airport studies. *Journal of Acoustical Society of America*, 116 (6), 3471-79.
196. Veltman JA, Gaillard AW, 1998: Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics* 41:656-669.
197. Verleger R, 1997: On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology* 34:131-156.
198. Vernet M, 1979: Effect of train noise on sleep for people living in Houses bordering the railway line. *Journal of Sound and Vibration* 66:483-492.
199. Vernet M, 1983: Comparison between train noise and road noise annoyance during sleep. *J Sound Vib* 87:331-335.
200. Verzini AM, Frassoni CA, Skarp AHO, 1999: A field research about effects of low-frequency noises on man. *Acta Acustica* 85:S16.
201. Vetter K, Horvath SM, 1962: Effect of audiometric parameters on K-complex of electroencephalogram. *Psychiat Neurol* 144:103-109.
202. Webb WB, Friel J, 1971: Sleep stage and personality characteristics of 'natural' long and short sleepers. *Science*, 171, 587-588.

203. Whitehead C, Hume K, 2001: A field experiment on the effect of aircraft noise on heart rate during sleep. Int Symp on Noise Pollution & Health. April 6-8 2001, Cambridge, UK. Programme & Abstract Book. p 53.
204. Whitehead C, Hume K, Muzet A, 1998: Cardiovascular responses to aircraft noise in sleeping subjects. In: N. Carter, R. F. S. Job: 7th Internationaler Congress on noise as a public health problem, noise effects 98. Sydney, Australia. Vol 2, pp 471-474
205. WHO 1968: World Health Organization, 1968: Yearbook of International Organizations
206. Williams HL, 1973: Effects of noise on sleep: a review. In: Ward WD: Proceedings of the International Congress on Noise as a Public Health Problem. EPA 550/9-73-008. Washington (D.C.) 20460. pp 501-511
207. Winer B J (1970), Statistical principles in experimental design, McGraw-Hill, London.
208. Wood NL, Cowan N, 1995: The cocktail party phenomenon revisited: Attention and memory in the classic selective listening procedure of Cherry (1953): J Exper Psychol: General 124:243-262
209. Zimmer K, Ellermeier W, 1999: Psychometric properties of four measures of noise sensitivity: a comparison. Journal of Environmental Psychology, 19, 295-302.