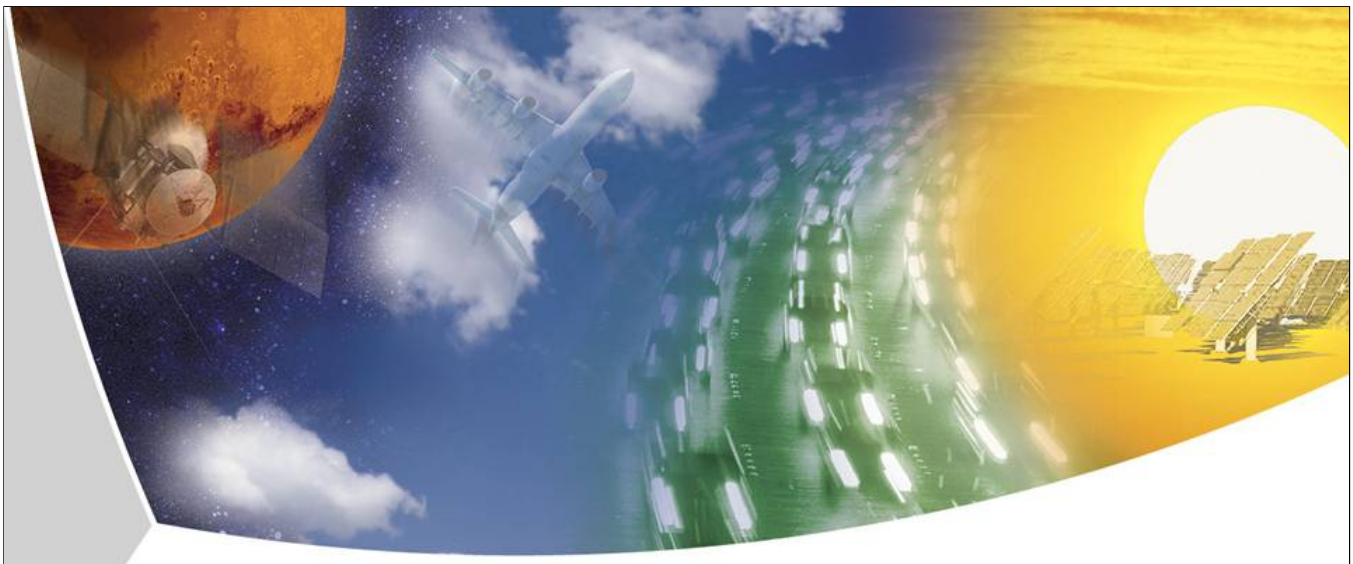


Vergleichende Untersuchung zu Verkehrslärmwirkungen auf den Schlaf

Dr. med. Mathias Basner, M.Sc.

Eva-Maria Elmenhorst, Hartmut Maaß, Uwe Müller, Julia Quehl, Martin Vejvoda und Alexander Samel

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

Ansprechpartner:

Dr. med. Mathias Basner, M.Sc.

DLR Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin

Linder Höhe

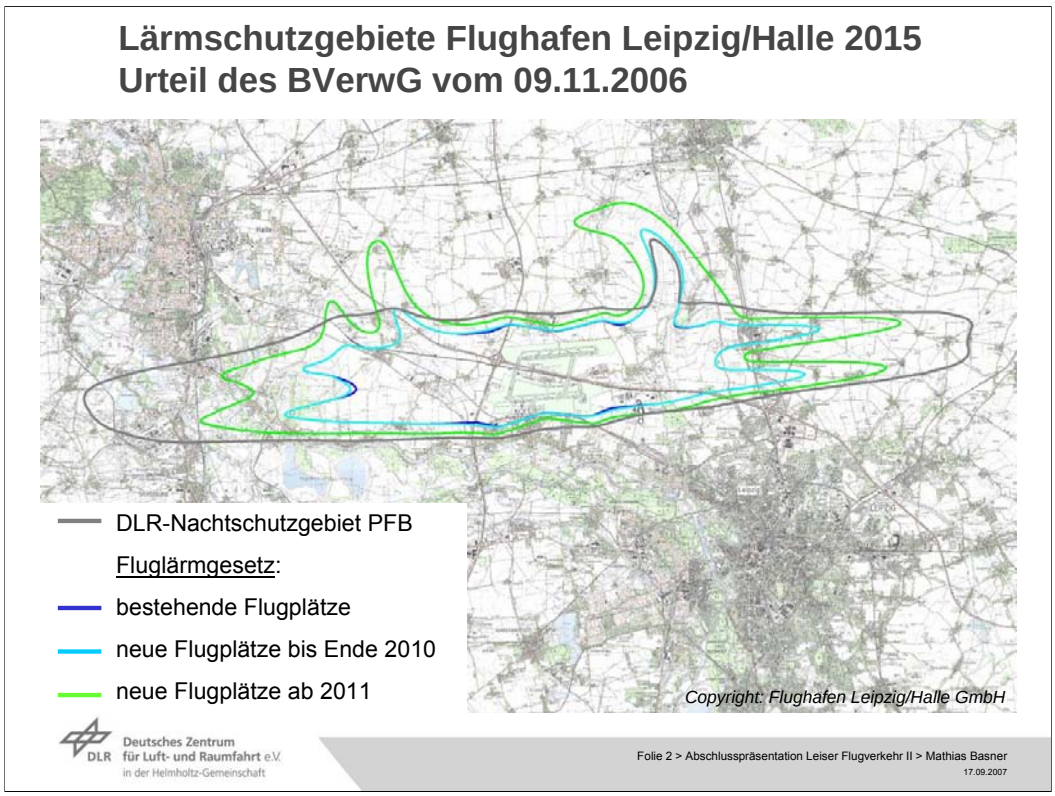
51147 Köln

Tel. 02203 601 3058

Fax. 02203 696372

E-Mail: mathias.basner@dlr.de

www.dlr.de/flugphysiologie



Im HGF/DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr" wurden in umfangreichen Labor- und Feldstudien präzise Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Maximalpegel eines Fluggeräusches und der Wahrscheinlichkeit, zusätzlich zu spontanen Aufwachreaktionen geweckt zu werden, ermittelt.

Basierend auf der in der Feldstudie ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehung wurde, zusammen mit den Göttinger Kollegen der Lärmprognose, ein wirkungsbezogenes Konzept zum Schutz von Anrainern des Flughafens Leipzig/Halle vor fluglärmbedingten Schlafstörungen entwickelt. Der Flughafen Leipzig/Halle wird zu einem internationalen Expressfrachtdrehkreuz ausgebaut. DHL investiert ca. 300 Mill. Euro in den Standort Leipzig/Halle. 3000 bis 10000 direkte und indirekte Arbeitsplätze sollen neu entstehen. Es wird laut Prognoseflugplan jedoch auch mit einem hohen nächtlichen Flugverkehrsaufkommen in der Nacht gerechnet (bis zu 100 Starts und 100 Landungen pro Nacht), das mit einer starken Belastung der Bevölkerung mit Fluglärm einhergehen wird.

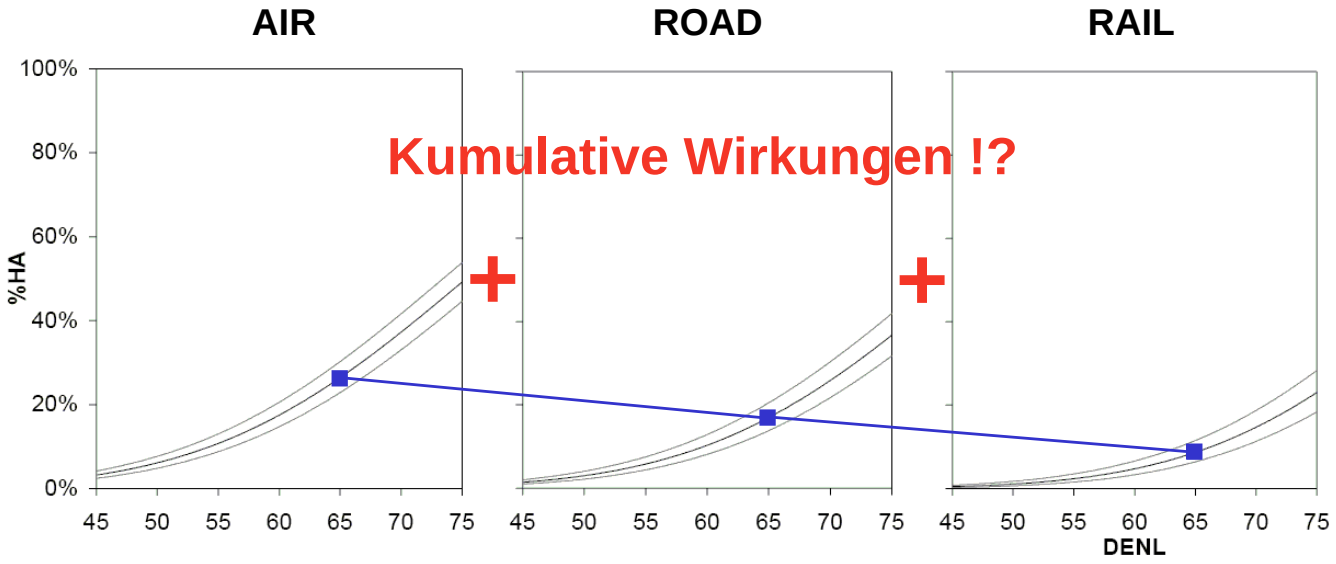
Bisherige Schutzkonzepte begrenzten den Lärm (in Form von Dauerschall- und/oder NAT-Kriterien) in der Hoffnung, den Nachtschlaf implizit ausreichend zu schützen. Im DLR-Schutzkonzept wird die akustische Prognose mit der Dosis-Wirkungsbeziehung verknüpft, um die Wirkungen EXPLIZIT vorherzusagen und zu begrenzen.

Im Urteil des Bundesverwaltungsgericht vom 09.11.2006 wurde jegliche von klägerischer Seite vorgebrachte Kritik gegen die DLR-Studie und das DLR-Schutzkonzept zurückgewiesen, und die Anwohnerfreundlichkeit im Vergleich zu anderen Schutzkonzepten einschließlich dem novellierten Fluglärmgesetz (s. Abb.) betont.

Hintergrund und Motivation

Belästigungsunterschiede zwischen den Verkehrsarten

(Miedema et al. 2004)



→ 5 dB Schienenbonus nach 16. BImSchV

Aus Belästigungsstudien ist bekannt, dass (bei gleichem Lautstärkepegel, hier L_{DEN}) Fluglärm stärker belästigt als Straßenverkehrslärm, und dieser wiederum stärker belästigt als Schienenverkehrslärm. Hierdurch resultiert ein sogenannter Schienenbonus von 5 dB in der Bundesimmissionsschutzverordnung.

Weitaus weniger ist über Unterschiede in der Wirkung der drei Verkehrslärmarten auf physiologische Funktionen, insbesondere auf den Schlaf, bekannt. Ein Hauptziel der Studie war es demnach, Unterschiede in der Wirkung der drei Verkehrsträger auf den Schlaf systematisch zu untersuchen. Das ist nur in Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen möglich.

Des weiteren ist offensichtlich, dass viele Menschen nicht nur durch eine, sondern durch zwei oder sogar alle drei Verkehrslärmarten gleichzeitig belastet werden. Dennoch werden die Verkehrsträger in gesetzlichen Regelwerken einzeln behandelt, obwohl es wahrscheinlich ist, dass es zu kumulativen Wirkungen der drei Verkehrslärmarten kommt. Ein zweites Ziel der Studie war es demnach, zu überprüfen, ob kumulative Wirkungen auftreten, und wenn ja, ob diese unteradditiv, additiv oder überadditiv ausfallen.

Studiendesign und Methodik

Studiendesign

- 3 Laborstudien (November 2004 bis Februar 2006)
- 9 Studienphasen mit je 8 Probanden, die in 11 aufeinanderfolgenden Nächten untersucht wurden
- 72 Versuchspersonen
  - 40 ± 13 Jahre (Bereich: 18-71 Jahre)
  - 32 männlich, 40 weiblich
  - schlafgesund und altersentsprechend normales Hörvermögen
- Belästigung bezüglich drei Verkehrslärmarten gleichverteilt

Physiologische Messungen

- Hirnstrombild, Augenbewegungen, Muskelspannung (Polysomnographie)
- EKG, Atembewegungen, Atemfluss, Körperbewegungen
- Ausscheidung von Cortisol und Noradrenalin im nächtlichen Sammelurin

Akustik

- Geräuschaufnahme und –auswahl von Verkehrsgeräuschen
- Lautsprechereinspielungen von insgesamt 40.320 Verkehrsgeräuschen

Die Verkehrsgeräusche wurden in Schlafräumen von Menschen aufgezeichnet, die in der Nähe des Flughafens Köln/Bonn, in der Nähe einer Straße oder in der Nähe eines Schienenweges wohnten.

Es wurden typische Geräusche für jeden Verkehrsträger ausgesucht. Maximalpegel wurden um maximal 2 dB abgesenkt oder angehoben, um Werte von 45, 50, 55, 60 oder 65 dB zu erhalten (s. nächste Folie).

Ablaufplan

Abend

bis 19:00 Uhr:	Eintreffen im Labor Fragebögen
ab 19:10 Uhr:	Abendessen
ab 20:00 Uhr:	Anlegen der Elektroden
ab 21:00 Uhr:	Leistungstests
ab 21:30 Uhr:	Anlegen der Sensoren Wortpaare lernen
ab 22:50 Uhr:	Blase entleeren Kurzfragebogen
23:00 Uhr:	Bettruhe

Erste Nacht lärmfrei!

Morgen

ca. 07:00 Uhr:	Wecken Ablegen der Sensoren Nacht-Sammelurin Kurzfragebögen Abfrage Wortpaare
ab 07:10 Uhr:	Leistungstests
ab 07:30 Uhr:	Körperpflege
ab 08:00 Uhr:	Verlassen des AMSAN Frühstück (optional)

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

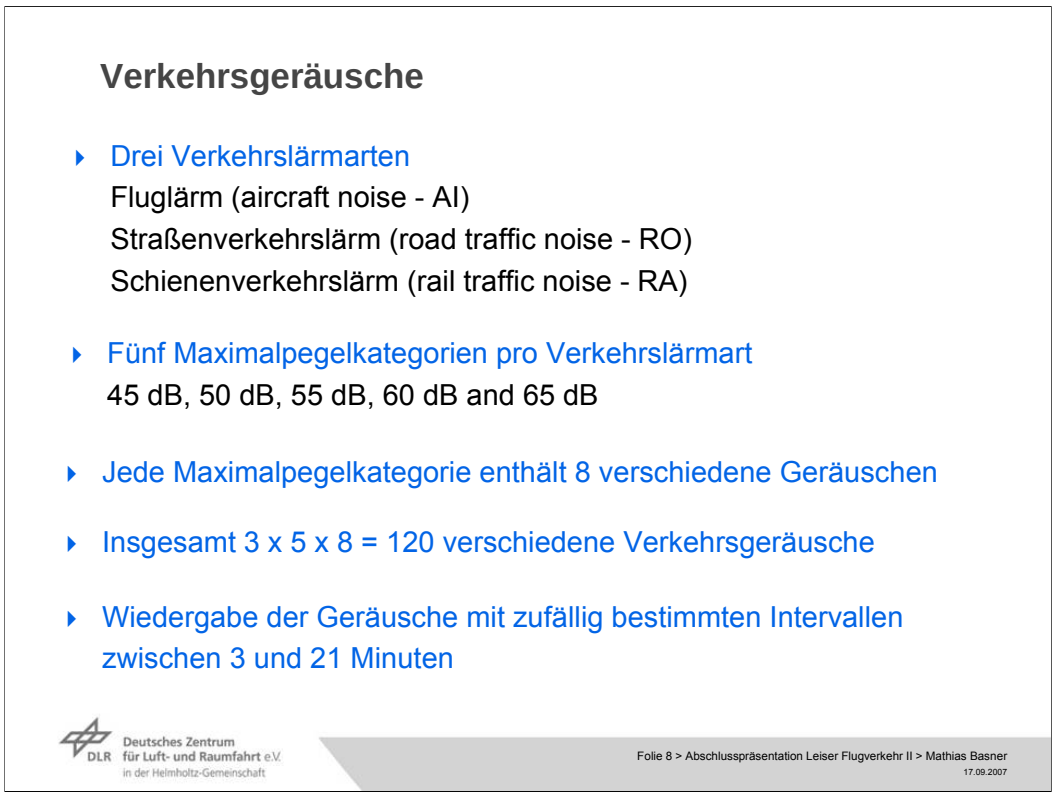
Folie 7 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner

17.09.2007

Die Studie fand in der Arbeitsmedizinischen Simulationsanlage des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln statt. Hierbei handelt es sich um ein Wohnraumlabor mit acht separaten Schlaflaborzimmern.

Die Studie startete am Montagabend und endete am Freitagmorgen der darauffolgenden Woche. Auch am Wochenende wurde gemessen.

Tagsüber gingen die Versuchspersonen ihrem normalen Lebensalltag nach. Nickerchen waren nicht erlaubt.



Vor der Wiedergabe der Geräusche wurde jeder Schlafraum akustisch eingemessen, um zu garantieren, dass sich die wiedergegebenen Geräusche von den aufgezeichneten möglichst nicht unterschieden.

Geräuschkombinationen

	Szenario	Anzahl Geräusche: Air	Road	Rail	Total	Slow: $L_{AS,eq}$
	AI	40	0	0	40	39.7
Einzel	RO	0	40	0	40	36.9
	RA	0	0	40	40	39.7
L_{eq} Road	RORO	0	80	0	80	39.7
	AIRO	40	40	0	80	41.2
Doppel	AIRA	40	0	40	80	42.5
	RORA	0	40	40	80	41.2
Dreifach	AIRORA	40	40	40	120	43.3
Kontrolle	NO	0	0	0	0	30.0

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

Folie 9 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner
17.09.2007

Insgesamt wurden 9 Geräuschszenarien verwendet: Einzelexpositionsnächte bestanden aus jeweils 40 Geräuschen eines Verkehrsträgers (AI, RO, RA).

In Doppelexpositionsnächten wurden jeweils 40 Geräusche von 2 Verkehrsträgern kombiniert (AIRO, AIRA, RORA), so dass insgesamt 80 Geräusche pro Nacht eingespielt wurden.

In der Dreifachexpositionsnacht (AIRORA) wurden jeweils 40 Geräusche von allen 3 Verkehrsträgern kombiniert, so dass hier 120 Geräusche pro Nacht wiedergegeben wurden.

In der Kontroll- oder Vergleichsnacht (NO) wurden keine Geräusche wiedergegeben. Der Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$ betrug hier ca. 30,0 dB, hervorgerufen durch die Klimaanlage des Labors.

Der $L_{AS,eq}$ in Einzelexpositionsnächten konnte für die Verkehrsträger Luft und Schiene (AI, RA) durch geeignete Geräuschauswahl angeglichen werden (39,7 dB). Die Straßenverkehrgeräusche waren jedoch zu kurz. Hier betrug der $L_{AS,eq}$ nur 36,9 dB. Deshalb wurde eine Doppelexpositionsnacht nur mit Straßenverkehrsgeräuschen eingeführt, die ebenfalls einen $L_{AS,eq}$ von 39,7 dB aufwies, jedoch aus 80 Straßenverkehrgeräuschen bestand.

Fluglärm wird in der Regel mit der Zeitkonstanten SLOW gemessen, Straßen- und Schienenverkehr hingegen mit der Zeitkonstanten FAST. Wir entschieden uns bei der Auswahl der Geräusche zunächst dafür, alle Geräusche mit SLOW zu bewerten, u.a. um eine Vergleichbarkeit mit der Fluglärmstudie STRAIN zu gewährleisten. Die Auswertung erfolgte jedoch sowohl mit der Zeitkonstanten SLOW als auch mit der Zeitkonstanten FAST.

Versuchsplan

	Study Night								
Period	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AI	AIRA	AIRORA	RO	RORO	RA	AIRO	RORA	NO
2	AIRA	NO	RORA	AIRO	RO	AIRORA	RA	RORO	AI
3	AIRO	RORO	AI	NO	AIRA	RO	RORA	RA	AIRORA
4	AIRORA	AIRO	NO	AI	RA	RORA	AIRA	RO	RORO
5	RORA	AI	RO	AIRA	AIRORA	NO	RORO	AIRO	RA
6	RA	RO	AIRO	RORO	AI	AIRA	AIRORA	NO	RORA
7	RORO	RARO	RA	AIRORA	AIRO	AI	NO	AIRA	RO
8	RO	RA	RORO	RORA	NO	AIRO	AI	AIRORA	AIRA
9	NO	AIRORA	AIRA	RA	RORA	RORO	RO	AI	AIRO

- **Jede Versuchsperson erhält jedes Expositionsmuster.**
- **Jedes Expositionsmuster genau einmal in jeder Studiennacht**
- **Maximal zwei aufeinanderfolgende Nächte mit 80 oder 120 Geräuschen**
- **Kontrollnacht gleichberechtigt**

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

Folie 10 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner
17.09.2007

Hier ist der Versuchsplan dargestellt. Die erste Nacht war jeweils lärmfrei und diente zur Anpassung der Probanden an die ungewohnte Umgebung und die Elektroden.

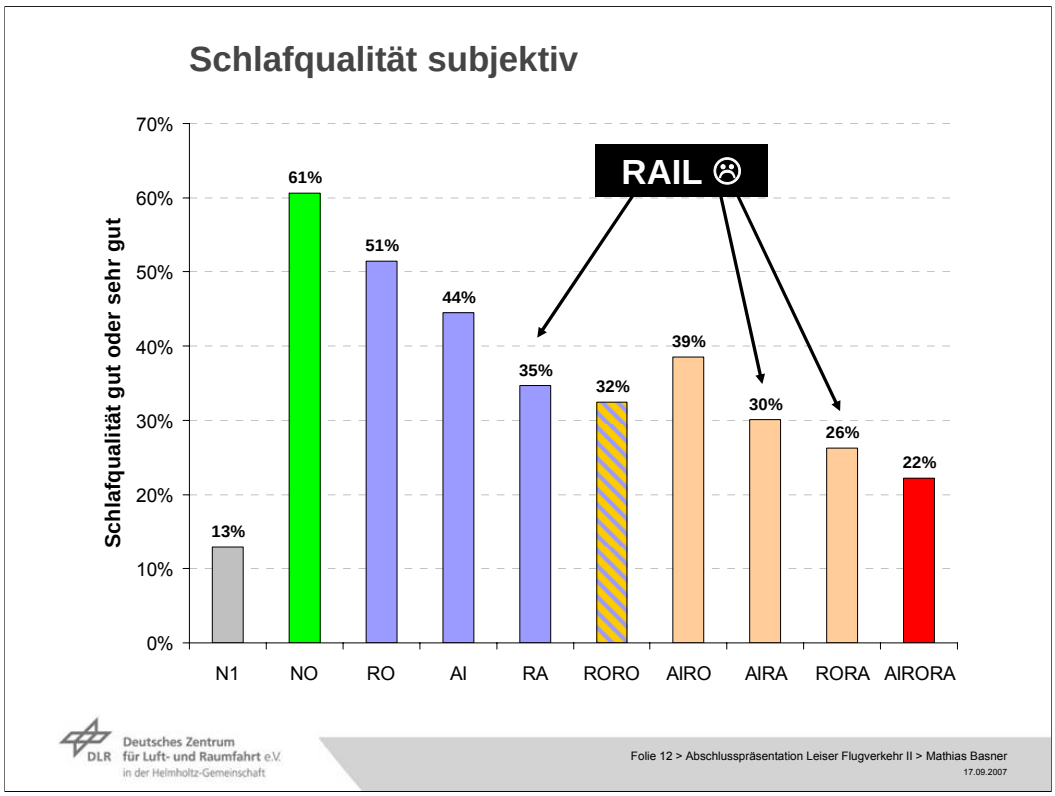
Die letzte Nacht war ebenfalls meist lärmfrei und diente als Erholungsnacht. Manchmal wurde die letzte Nacht genutzt, um Expositionsmuster aus vergangenen Nächten, die aufgrund von Elektrodenausfällen nicht ausgewertet werden konnten, nachzuholen.

Jede Versuchsperson erhielt alle Expositionsmuster, wodurch Vergleiche innerhalb einer Versuchsperson möglich wurden und die statistische Power erhöht wurde. Jedes Expositionsmuster kam an jeder Stelle (Study Night) genau einmal vor (s. beispielhaft rot markierte Kontrollnacht NO). Eine weitere Bedingung war, dass maximal zwei Hochexpositionsnächte (80 oder 120 Geräusche) aufeinander folgten, um die Probanden nicht zu hoch zu belasten und keine Studienabbrüche zu provozieren.

Im Gegensatz zur STRAIN Studie (Kontrollnacht immer Nacht 2) tauchten die Kontrollnächte in dieser Studie „gleichberechtigt“ zu den Expositionsnächten an jeder Stelle (Study Night) im Versuchsplan auf, wodurch die Vergleichbarkeit erhöht wurde.

Ziel des Versuchsdesigns war es, die Bedingungen für alle drei Verkehrsträger möglichst gleich zu halten (gleiche Maximalpegel, gleiche Anzahl Geräusche pro Nacht), damit evtl. Unterschiede in der Wirkung tatsächlich nur auf die Geräuschart mit ihren typischen akustischen Charakteristika zurückzuführen sind.

Ergebnisse



Hier ist, in Abhängigkeit vom Verkehrsmuster, der Anteil der Versuchspersonen dargestellt, die Ihre Schlafqualität als gut oder sehr gut einschätzten.

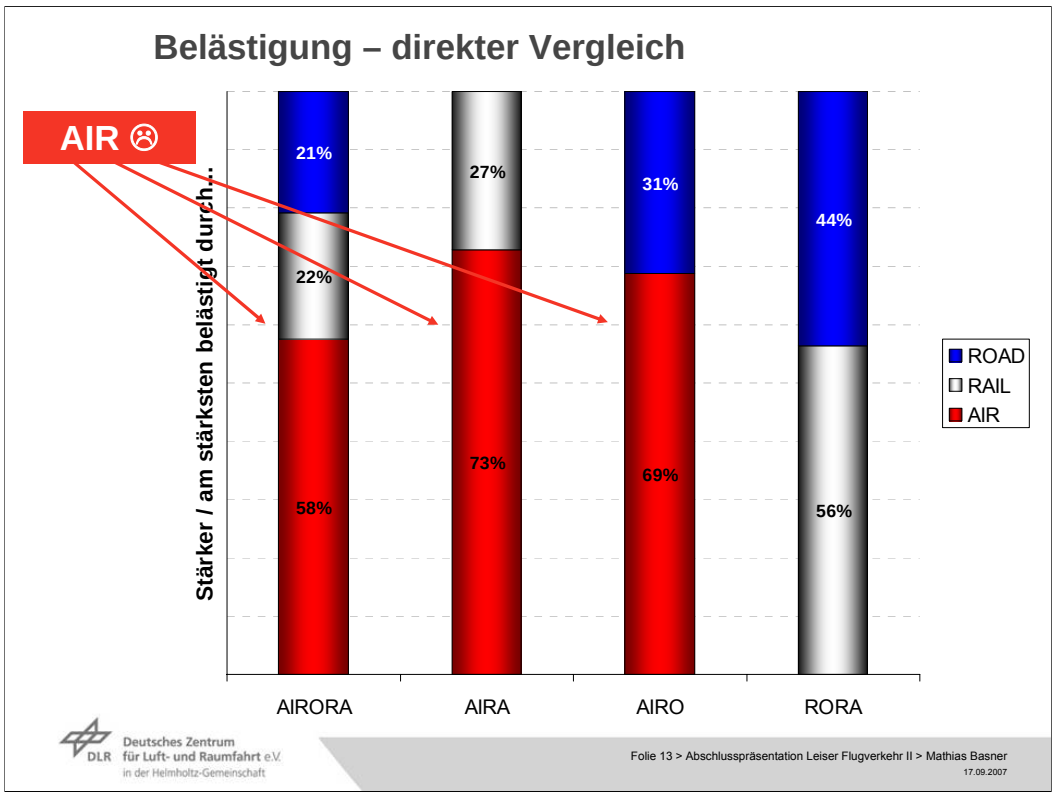
In der Anpassungsnacht (N1) schätzten nur 13% ihren Schlaf als gut oder sehr gut ein. In der lärmfreien Kontrollnacht waren es immerhin 61%.

In den Einzelexpositionsnächten schnitt am schlechtesten der Schienenverkehr (RA, 35%) ab, gefolgt vom Flugverkehr (AI, 44%) und Straßenverkehr (RO, 51%).

Die Straßenverkehrs-Doppelexpositionsnacht RORO (32%) schnitt schlechter ab als alle Einzelexpositionsnächte, obwohl sie den gleichen $L_{AS,eq}$ hatte wie die Einzelexpositionsnächte AI und RA.

Nur 22% der Versuchspersonen schätzten ihren Schlaf in der Dreifachexpositionsnacht (AIRORA) gut oder sehr gut ein.

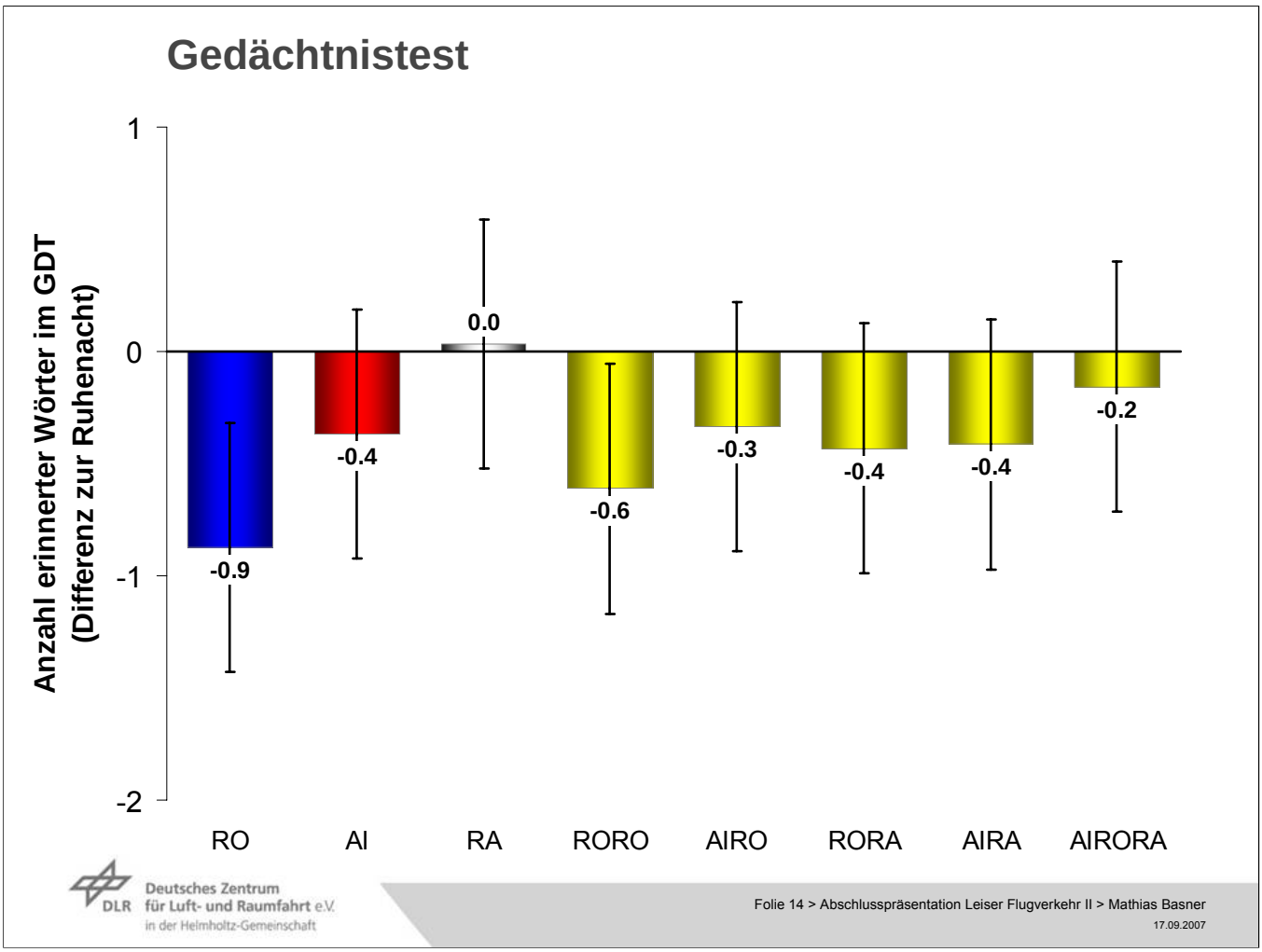
Von den drei Verkehrsträgern schnitt hinsichtlich der subjektiven Einschätzung der Schlafqualität der Schienenverkehrslärm insgesamt am schlechtesten ab.



Die Versuchpersonen wurden befragt, welche Verkehrslärmarten sie in der Nacht wahrnahmen. Wenn sie Geräusche von zwei oder drei Verkehrslärmarten wahrgenommen hatten, wurden Sie gefragt, durch welche der Verkehrslärmarten sie sich stärker oder am stärksten belästigt fühlten.

Die höchste Belästigung wurde offensichtlich durch Fluglärm hervorgerufen, während Schienenverkehrslärm nur geringfügig stärker belästigte als Straßenverkehrslärm.

Eine mögliche Ursache für die hohe Belästigungswirkung des Fluglärms wird z.T. in der langen Geräuschdauer (s.u.) begründet sein. Im Schlaf ist der Mensch sich selbst und seiner Umgebung nicht bewusst. Nur Geräusche, die in längeren Wachphasen, in denen der Mensch das Wachbewusstsein wiedererlangt, auftreten, können somit wahrgenommen werden und zu Belästigungen führen. Bei Schienen- und Straßenverkehrslärm war es vermutlich häufig so, dass selbst bei längeren Weckreaktionen das Geräusch zum Zeitpunkt der Rückkehr des Wachbewusstseins schon wieder abgeklungen war, so dass diese Geräusche seltener wahrgenommen wurden.

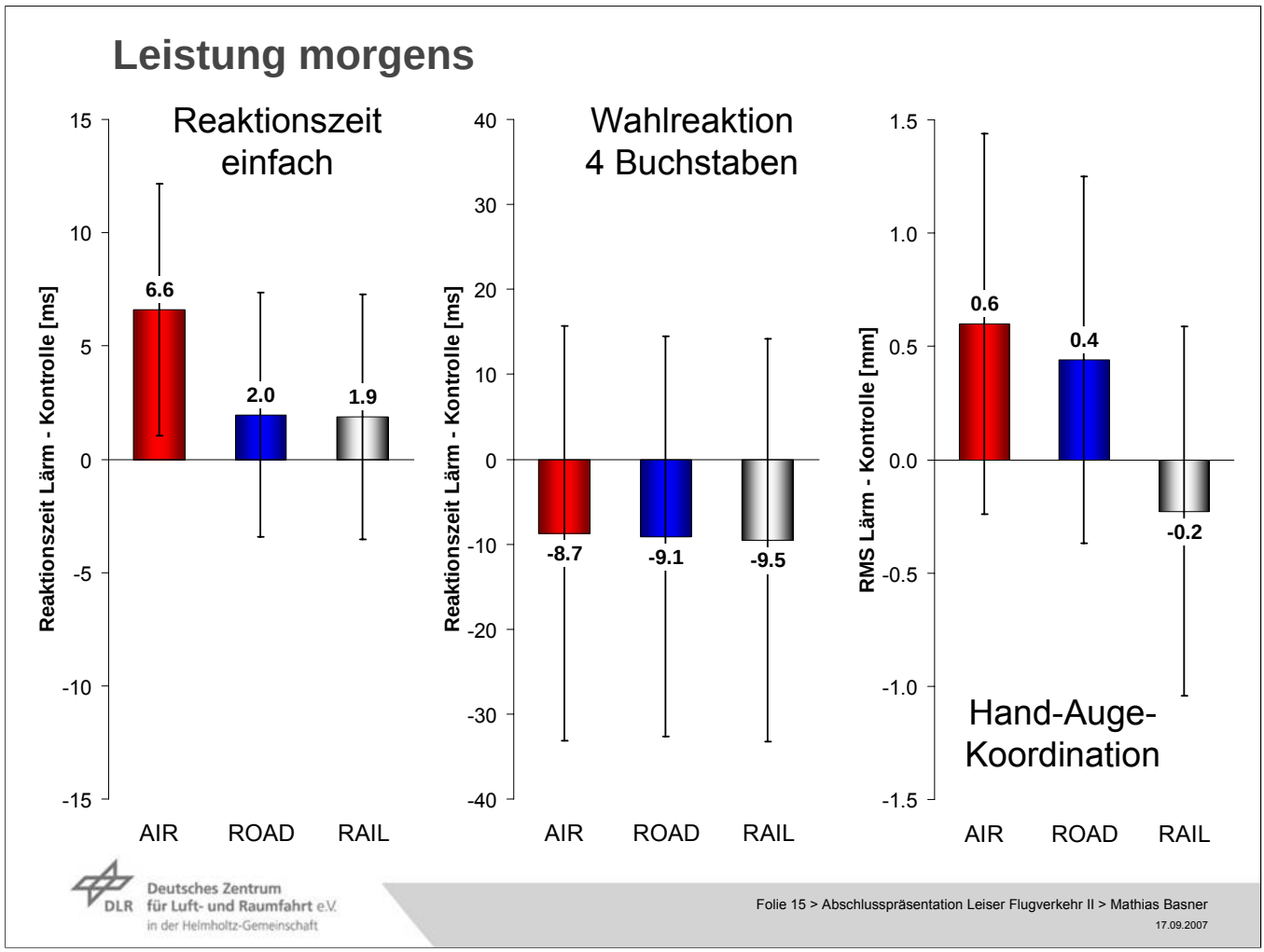


In dieser Studie wurde erstmalig ein Gedächtnistest eingesetzt. Am Abend wurden 24 Wortpaare (z.B. Fahrrad/Klingel) solange gelernt, bis bei der Abfrage (Fahrrad/?) mindestens 16 Wörter erinnert wurden.

Am nächsten Morgen wurden die Wortpaare erneut abgefragt. Es war unsere Hypothese, dass Verkehrslärm im Schlaf stattfindende Gedächtnisprozesse stört.

Tatsächlich war die mittlere Anzahl erinnerter Wortpaare in allen Expositionsnächten (Ausnahme: Einzelexpositionsnacht Schienenverkehr) im Vergleich zur lärmfreien Kontrollnacht reduziert, für den Straßenverkehr (RO und RORO) sogar statistisch signifikant.

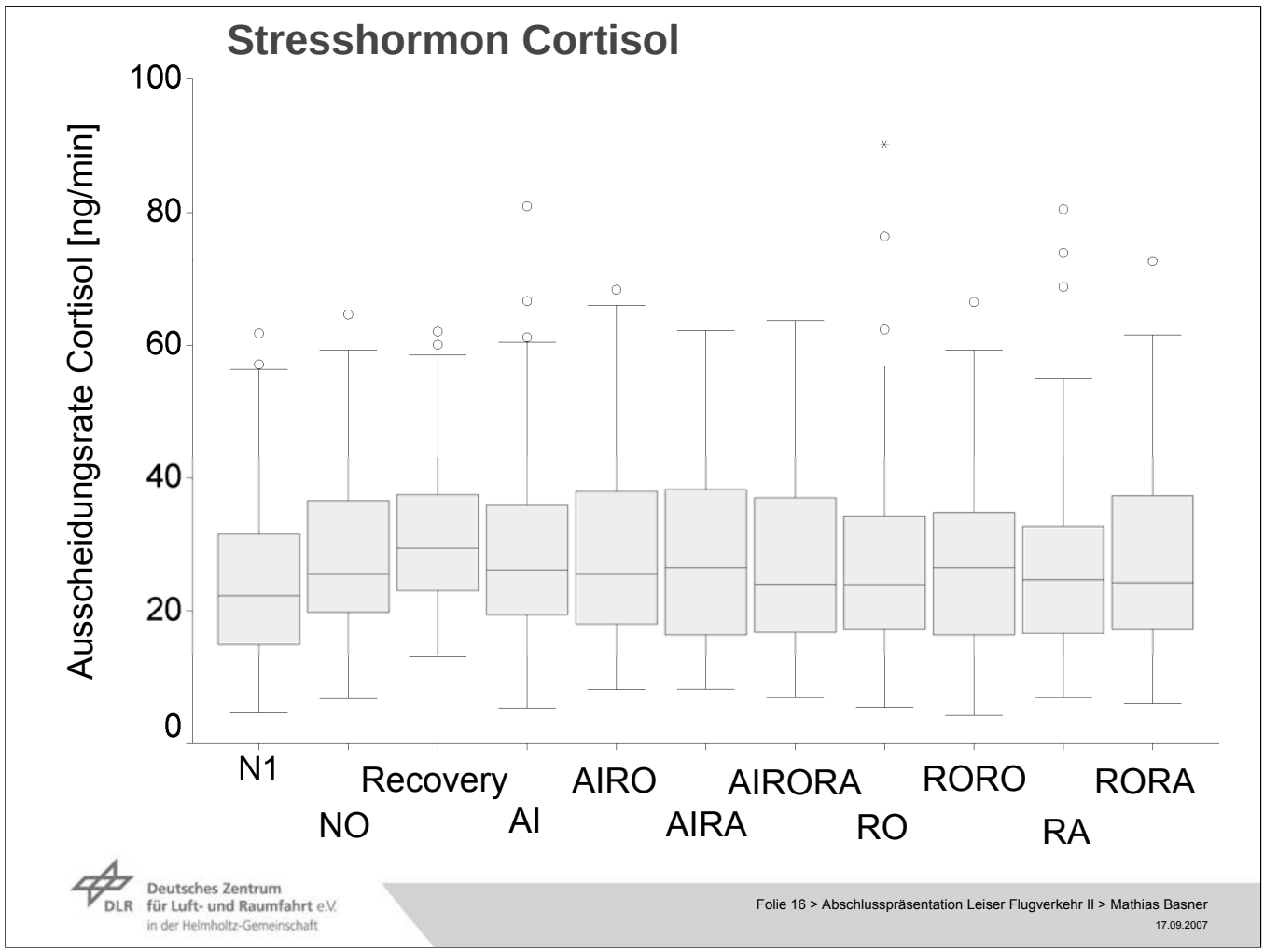
Es handelt sich hierbei um unadjustierte Modelle, so dass die Ergebnisse als vorläufig einzustufen sind.



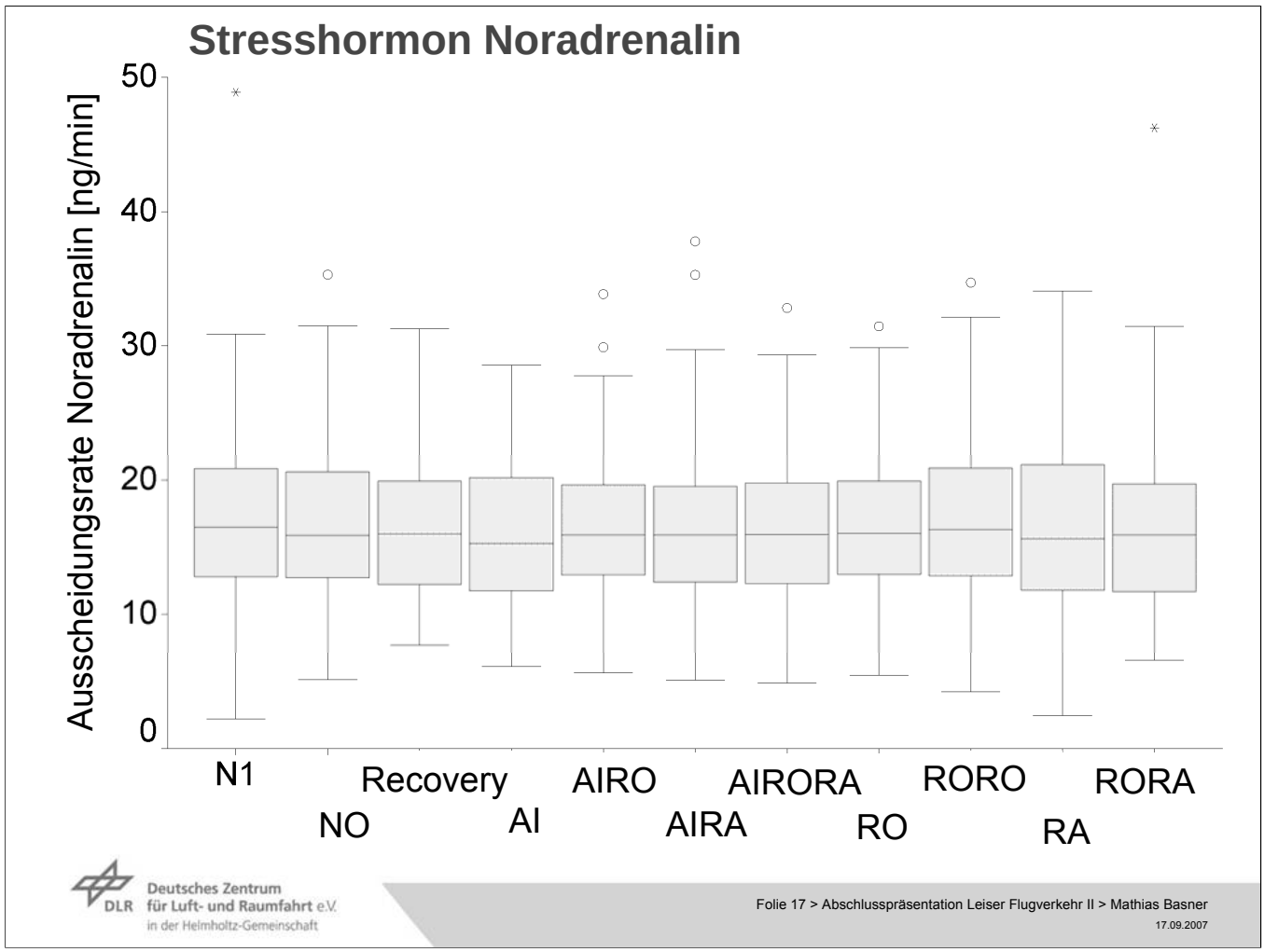
Die morgens unmittelbar nach dem Aufstehen durchgeführten Leistungstests waren durch den Verkehrslärm nur wenig beeinflusst.

In den hier dargestellten Einzelexpositionsnächten verlängerte sich die Reaktionszeit im Vergleich zur Kontrollnacht in der Einfachreaktionszeitaufgabe um 1.9 bis 6.6 ms (letztere statistisch signifikant), sie verkürzte sich in der Wahlreaktionsaufgabe mit 4 Buchstaben nicht signifikant um 8.7 bis 9.5 ms. Signifikante Unterschiede zur Kontrollnacht waren in der Hand-Auge-Koordinationsaufgabe nicht auszumachen.

Diese Ergebnisse sind kongruent mit den in der Laborstudie STRAIN gefundenen Ergebnissen.



In der nächtlichen Ausscheidungsrate des Stresshormons Cortisol fanden sich keinerlei statistisch signifikante Unterschiede zwischen Expositions-, Kontroll-, Anpassungs- und Erholungsnächten. Alle Werte bewegten sich im Normbereich.

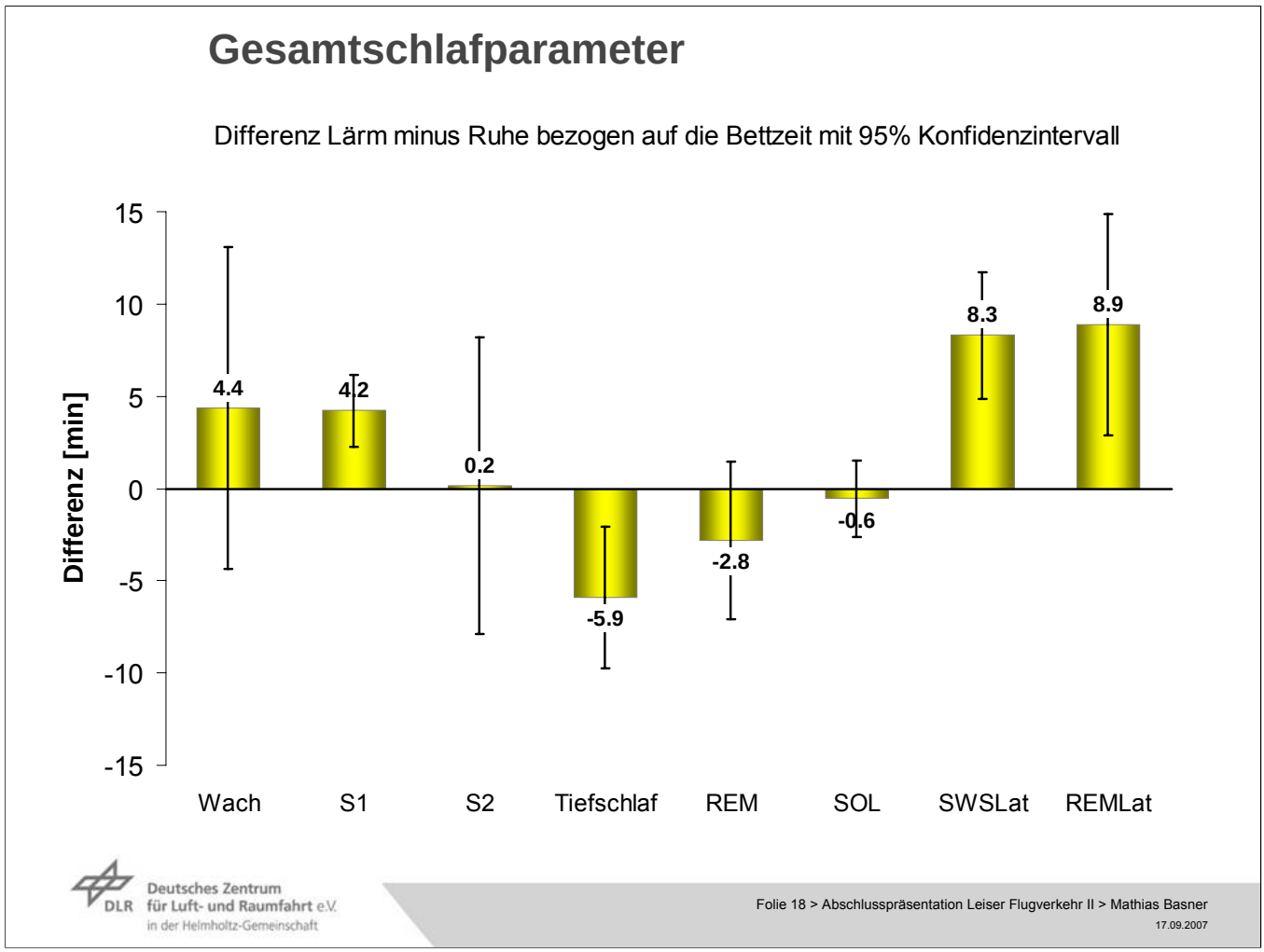


Auch in der nächtlichen Ausscheidungsrate des Stresshormons Noradrenalin fanden sich keinerlei statistisch signifikante Unterschiede zwischen Expositions-, Kontroll-, Anpassungs- und Erholungsnächten. Alle Werte bewegten sich im Normbereich.

Diese Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse der Labor- und Feldstudien STRAIN. Auch dort wurden keinerlei signifikante Einflüsse von Fluglärm auf die Ausscheidungsraten von Cortisol, Noradrenalin und Adrenalin im nächtlichen Sammelurin gefunden.

Die Methode scheint zu wenig sensitiv, um die zweifelsohne mit Aufwachreaktionen assoziierten kurzfristigen Ausscheidungen der Stresshormone abzubilden. Dennoch handelt es sich hier um wichtige Ergebnisse, die in der Vergangenheit durchgeführte Studien, in denen erhöhte Stresshormonausscheidungen an deutlich kleineren Probandenkollektiven gefunden wurden, relativiert.

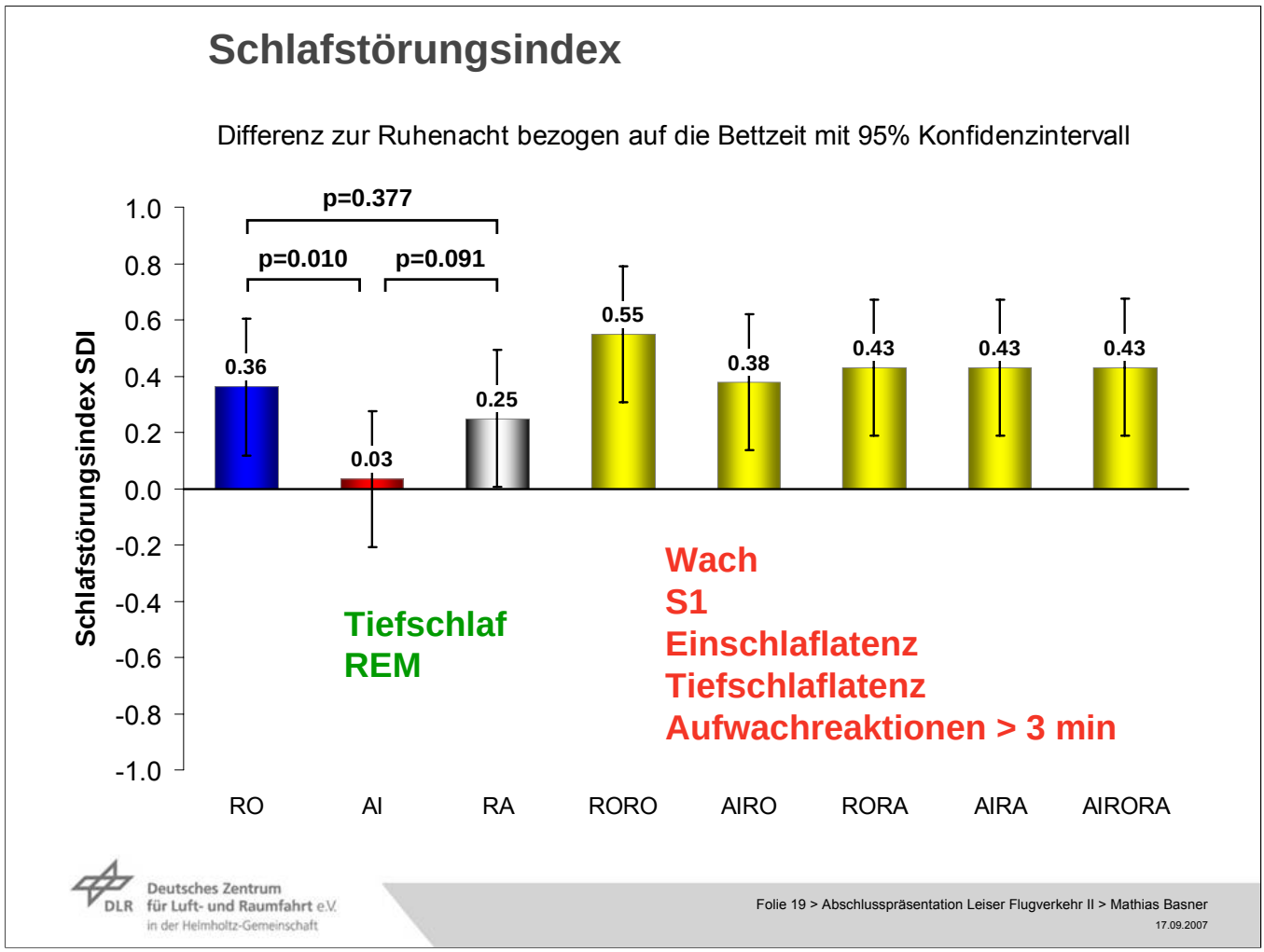
Unser Labor wird diese Methode in Zukunft aufgrund ihrer offensichtlich zu geringen Sensitivität nicht mehr einsetzen.



Hier werden die zusammengefassten Daten von allen Lärmnächten mit der lärmfreien Kontrollnacht verglichen.

Es zeigen sich für lärmbedingte Schlafstörungen typische Befunde: Zunahme von Wach und Schlafstadium S1, Abnahme von Tief- und Traumschlaf (REM) und Zunahme der Tiefschlaf- und REM-Latenzen. Der Anteil von Schlafstadium S2 war ebenso wie die Einschlaflatenz (SOL) unverändert.

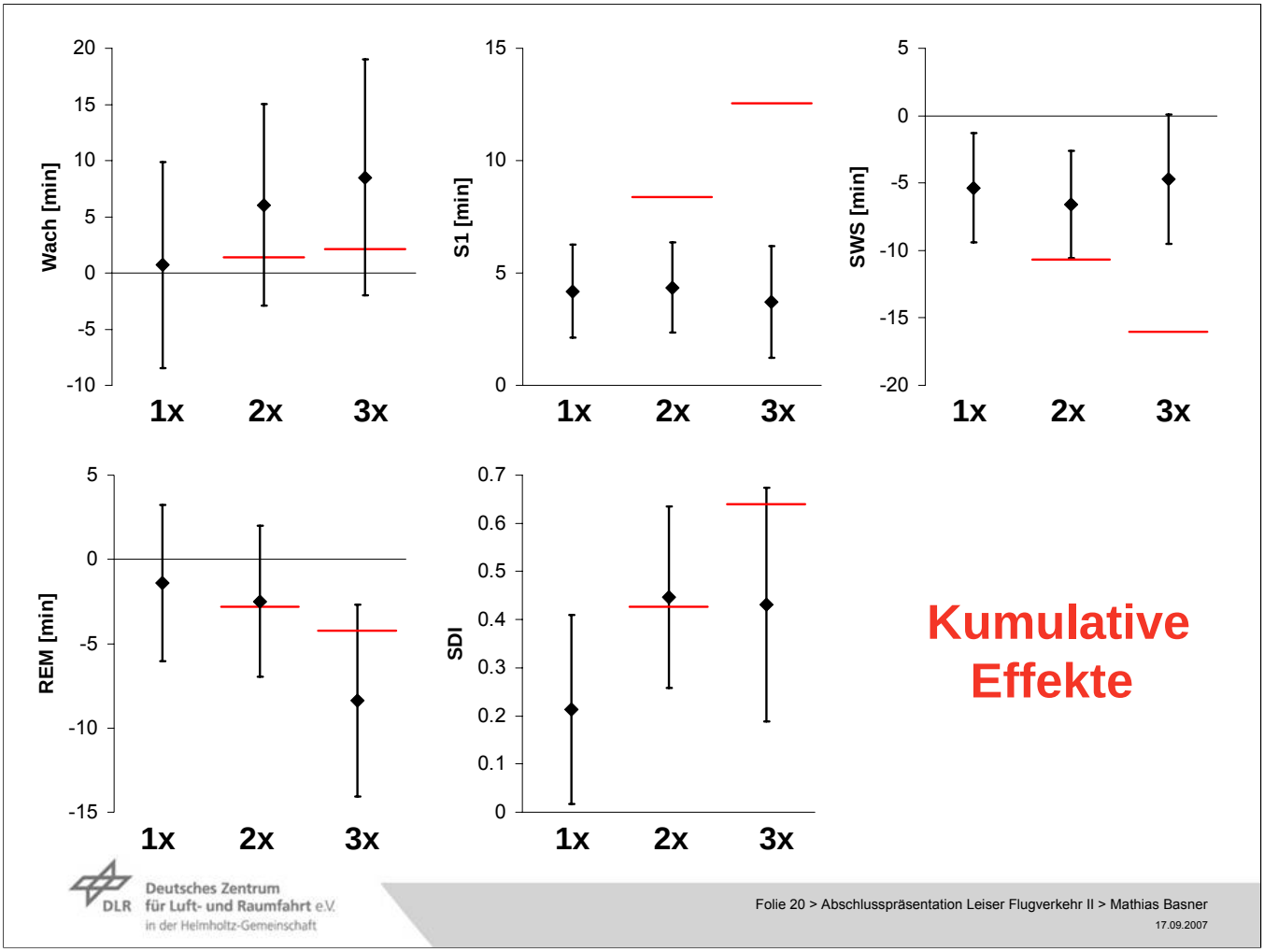
Tief- und Traumschlaf sind besonders wichtig für die regenerative Funktion des Schlafs. Wach und S1 tragen hingegen nicht bzw. kaum zur Regeneration bei. Sie sind zudem klassische Indikatoren für einen fragmentierten Schlaf.



Der Schlafstörungsindex (SDI) fasst mehrere typische lärmbedingte Veränderungen (s.o.) der Schlafstruktur in einem Einzahlwert zusammen. Ein Wert von 0 bezeichnet normalen und ungestörten Schlaf einer jungen Kontrollgruppe. Ein höherer Wert bedeutet stärker gestörten Schlaf.

Alle Expositionsnächte gingen im Vergleich zur lärmfreien Kontrollnacht mit einem höheren SDI einher. Die SDIs waren in den Doppel- und Dreifachexpositionsnächten im Vergleich zu den Einfachexpositionsnächten höher.

In den Einzelexpositionsnächten schnitt der Straßenverkehrslärm mit einem SDI von 0.36 im Vergleich zu Schienenverkehrslärm (0.25) und Fluglärm (0.03) am schlechtesten ab. SDI von Straßenverkehrs- und Fluglärm unterschieden sich statistisch signifikant (p=0.010).



Hier werden Schlafparameter in Einzel- (1x), Doppel- (2x) und Dreifachexpositionsnächten (3x) miteinander verglichen.

Die waagerechten roten Striche markieren jeweils den Wert, den man aufgrund einer Verdoppelung oder Verdreifachung des Wertes der Einzelexpositionsnacht erwarten würde.

ÜBERadditive Effekte zeigen sich für die Anteile von Wach und REM, UNTERadditive Effekte für den Tiefschlaf und das Schlafstadium S1.

Fasst man die Veränderungen des Gesamtschlafs im Schlafstörungsindex SDI zusammen, ergeben sich additive (2x) bzw. UNTERadditive Effekte.

Die ÜBERadditive Wirkung auf Wachanteil und REM-Schlaf lässt sich evtl. dadurch erklären, dass der REM-Schlaf v.a. in der zweiten Nachthälfte stattfindet. Hier hat eine weitgehende Entmüdung stattgefunden. Der Schläfer wird leichter aus dem Schlaf erweckt und findet später in ihn wieder zurück (Wiedereinschlafen), insbesondere bei kurzer zeitlicher Abfolge (2x, 3x) der Verkehrsgeräusche.

Ereigniskorrelierte Auswertung

Ereigniskorrelierte Auswertung

- Stellt einen direkten Zusammenhang zwischen Verkehrsgeräusch und Reaktion des Schläfers her (Wechsel nach Wach oder S1)
- Logistische Regression mit Zufallseffekt mit Variablen
  - Geräuschart (AIR, ROAD, RAIL)
  - Maximalpegel L_{max}
  - Alter
  - Geschlecht
  - Schlafstadium vor Geräusch
  - verstrichene Schlafzeit
- Modelle mit vollständigem und eingeschränktem Datensatz
- Modelle mit $L_{AS,max}$ und $L_{AF,max}$ als unabhängige Variable

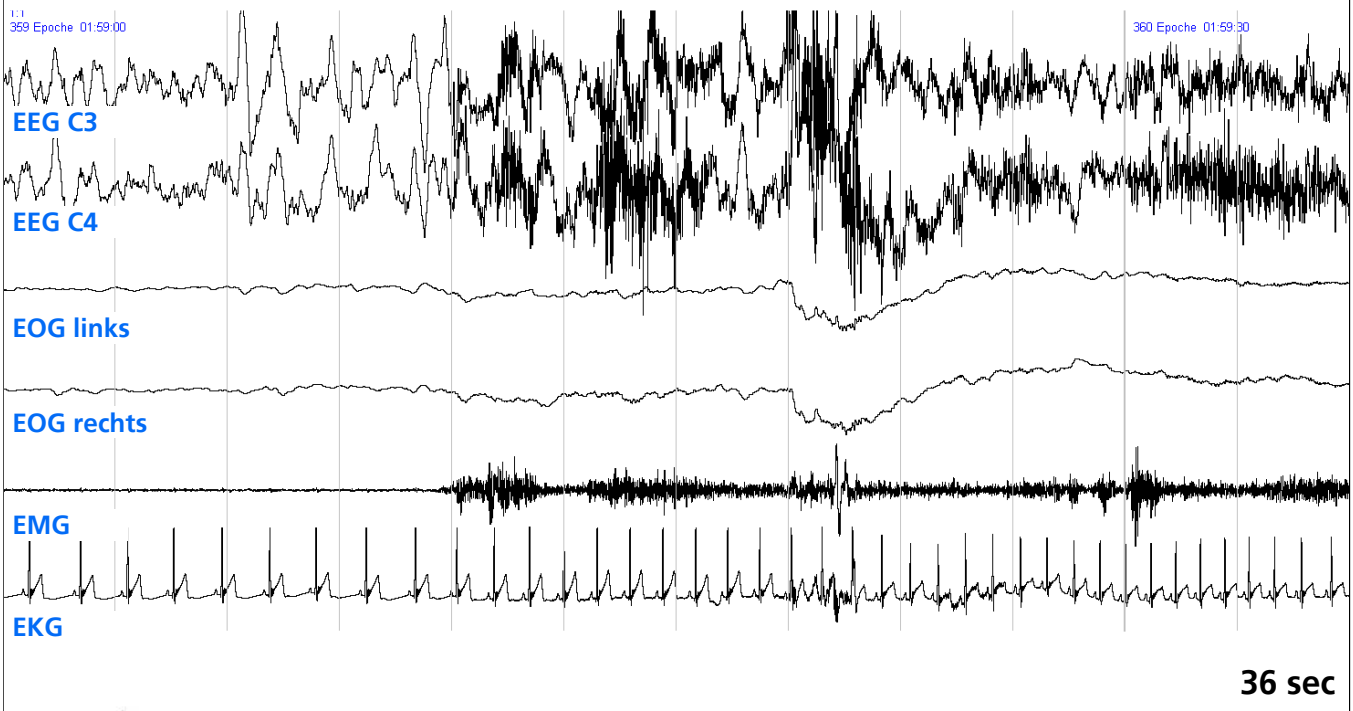
Es wurden Modelle mit vollständigem und eingeschränktem Datensatz (pro Maximalpegel-Verkehrslärmart-Kategorie die gleiche Anzahl von Geräuschen aus Einfach-, Doppel- und Dreifachexpositionsnächten) gerechnet.

Unten sind nur die Modelle mit vollständigem Datensatz dargestellt, da sich keine relevanten Unterschiede zwischen den Modellen ergaben.

Aufwachreaktion

normal: ca. 24 pro Nacht

Dauer: mindestens 15 sec



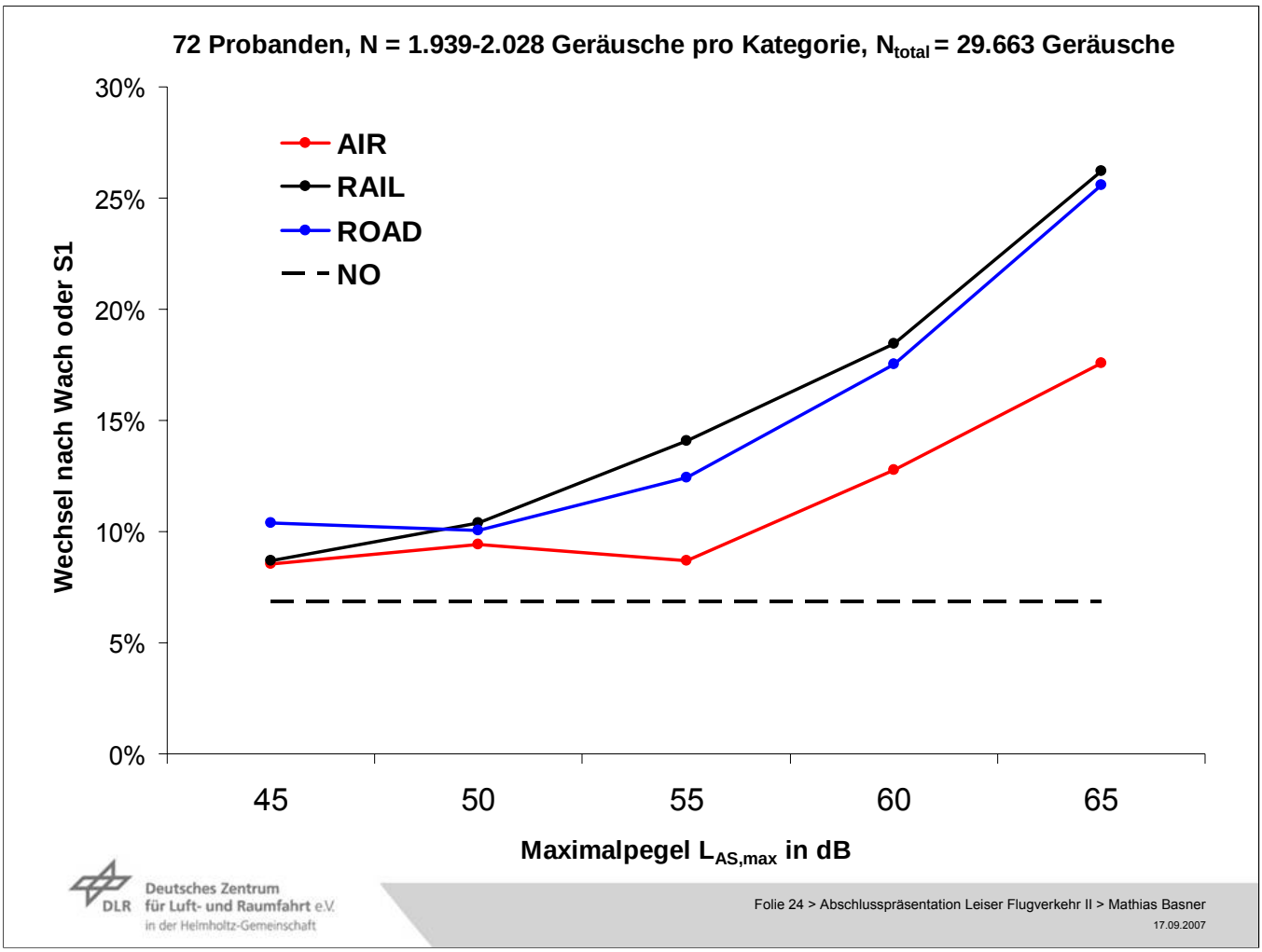
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft

Folie 23 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner

17.09.2007

Das klassische Bild einer Aufwachreaktion ist dargestellt. Sie erfolgt hier aus dem Tiefschlafstadium S4. Es ist eine Erhöhung des Anspannungszustandes der Muskulatur im EMG ersichtlich, die mit entsprechenden Artefakten im Hirnstrombild (EEG) einhergeht. Auch eine Beschleunigung der Herzfrequenz (EKG) ist zu beobachten.

Diese Aufwachreaktionen kann man in einer durch Lärm ungestörten 8stündigen Nacht eines gesunden Schläfers im Mittel ca. 24 Mal beobachten. Die Aufwachreaktionen sind in der Regel jedoch zu kurz, als dass man sich am nächsten Tag daran erinnern würde (keine Erlangung des Wachbewusstseins).



Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Maximalpegel eines Geräusches und der Wahrscheinlichkeit eines Schlafstadienwechsels nach Wach oder Schlafstadium S1 (ab hier abgekürzt als „Aufwachreaktion“) sind für die drei Verkehrsträger dargestellt.

Es handelt sich um auf den Rohdaten beruhende Punktschätzer. Insgesamt basieren die Kurven auf 72 Versuchspersonen und 29663 Geräuschen (1939 bis 2028 Geräusche pro Punkt).

Die in den lärmfreien Kontrollnächten ermittelte spontane Aufwachwahrscheinlichkeit ist als gestrichelte schwarze Linie dargestellt.

Multiple Logistische Regression

Variable	Koeffizient	p-Wert
ROAD (vs. RAIL)	-0,0266	0,5130
AIR (vs. RAIL)	-0,3767	<0,0001
$cL_{AS,max}$	0,0606	<0,0001
cAlter	0,0044	0,2625
Geschlecht (Mann)	0,2117	0,0488
Tiefschlaf	-0,7141	<0,0001
REM	-0,2718	<0,0001
cSchlafzeit	0,0007	<0,0001
cNacht	-0,0119	0,0739

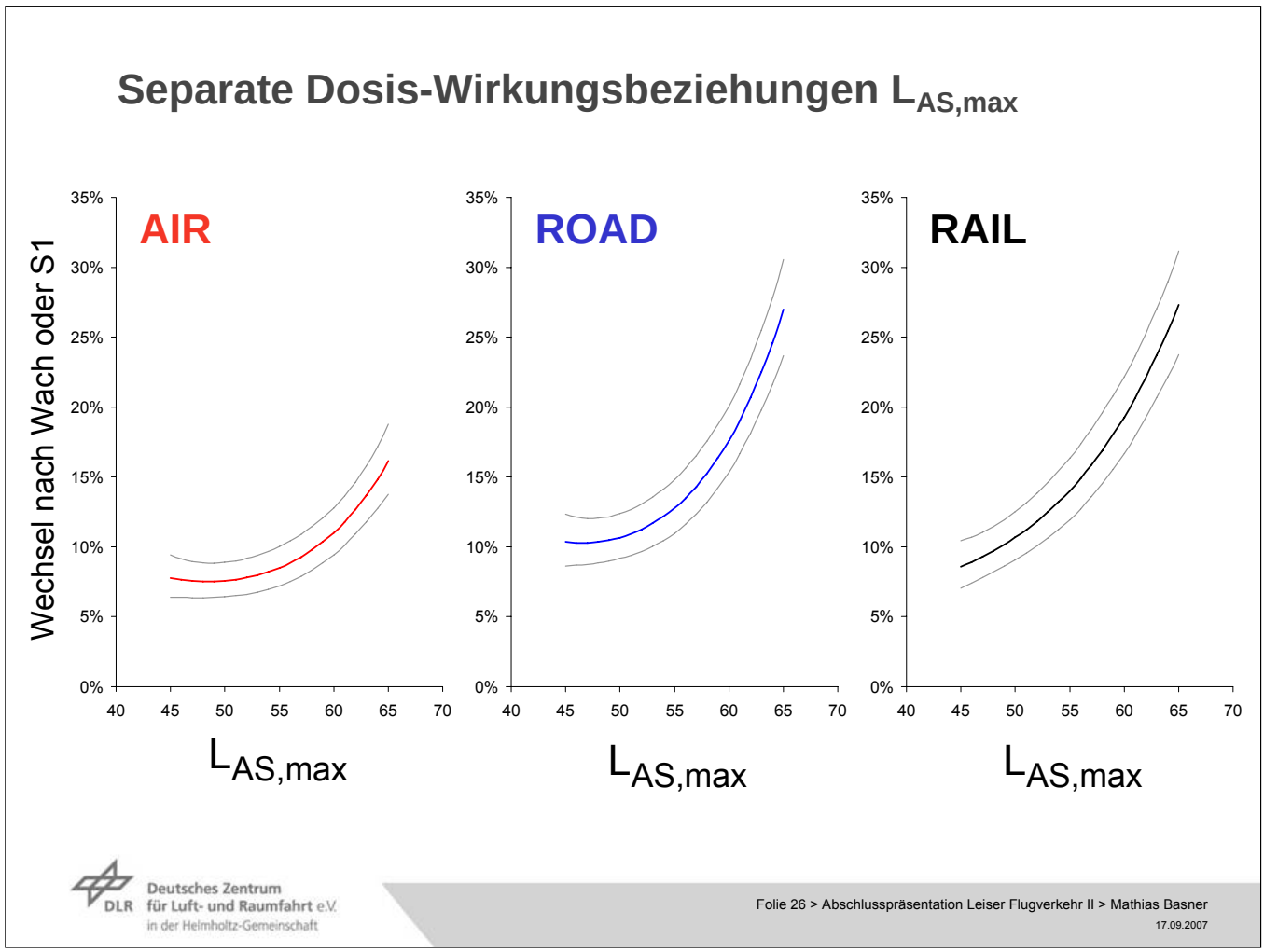
Die Tabelle zeigt Ergebnisse eines multivariablen logistischen Regressionsmodells mit Zufallseffekt.

Positive Koeffizienten bedeuten, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit mit Zunahme der Variablen steigt. Negative Koeffizienten bedeuten, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit mit Zunahme der Variablen sinkt.

Straßenverkehrslärm ging im Vergleich mit Schienenverkehrslärm mit geringeren Aufwachwahrscheinlichkeiten einher. Beide Verkehrsträger unterschieden sich jedoch nicht statistisch signifikant (p=0,5130). Fluglärm ging sowohl im Vergleich zu Schienenverkehrslärm (p<0,0001) als auch im Vergleich zu Straßenverkehrslärm (p<0,0001, nicht gezeigt) mit statistisch signifikant geringeren Aufwachwahrscheinlichkeiten einher.

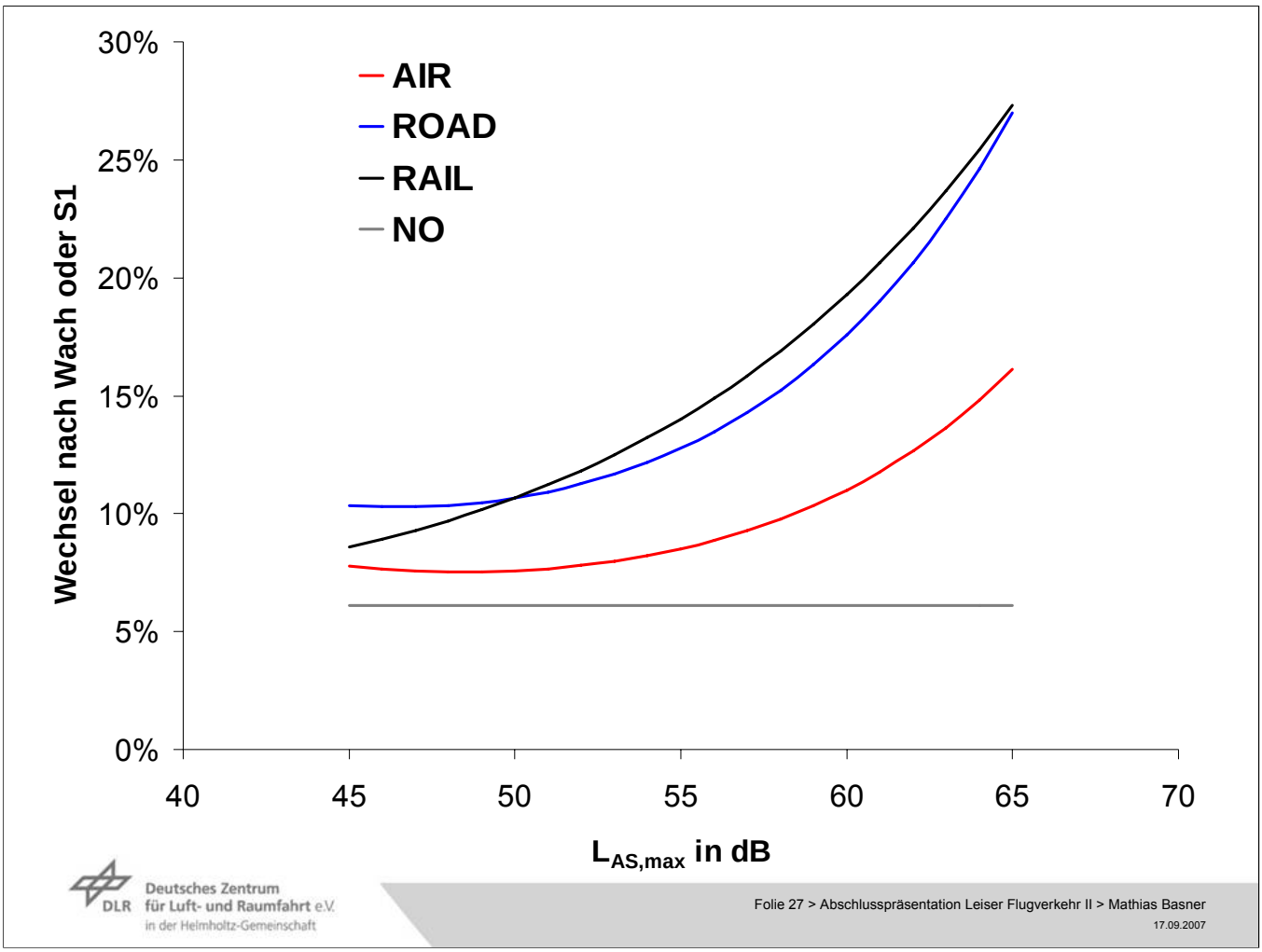
Die Aufwachwahrscheinlichkeit stiegt mit zunehmendem Maximalpegel ($cL_{AS,max}$, p<0,0001), mit dem Alter (cAlter, p=0,2625) und mit der verstrichenen Schlafzeit (cSchlafzeit, p<0,0001) an. Im Vergleich zum oberflächlichen Schlafstadium S2 war die Aufwachwahrscheinlichkeit im REM-Schlaf (p<0,0001) und insbesondere im Tiefschlaf (p<0,0001) signifikant geringer. Männer wachten im Vergleich zu Frauen signifikant (p=0,0488) häufiger durch Verkehrsgeräusche auf.

Die Aufwachwahrscheinlichkeit nahm im Verlauf der Studie, d.h. im Laufe der Studientage 2 bis 10, ab (cNacht, p=0,0739). Dies kann durch Gewöhnungseffekte und/oder durch partiellen Schlafentzug aus vorangehenden Nächten erklärt werden.

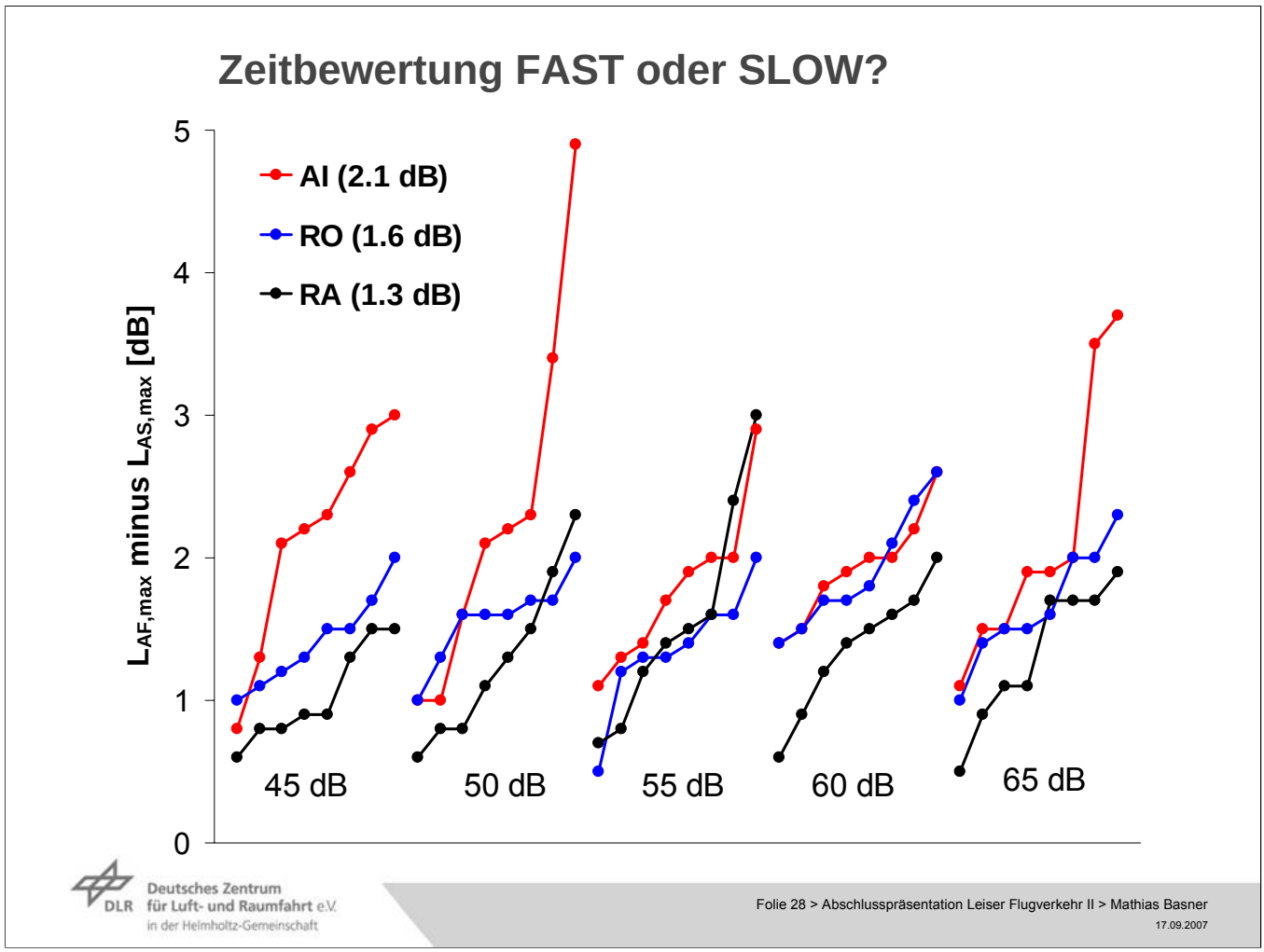


Anschließend wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen getrennt für die drei Verkehrsträger mit multivariablen logistischen Regressionsmodellen mit Zufallseffekt berechnet. In den Abbildungen sind Punktschätzer (bunte Linien) und 95% Konfidenzintervalle (graue Linien) dargestellt.

Die Dosis-Wirkungsbeziehungen wurden jeweils für die Referenzkategorien Frau, Alter 40 Jahre, Schlafstadium S2, 6. Studiennacht und Mitte der Nacht berechnet. Die hier dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen beruhen auf dem $L_{AS,max}$ (SLOW).



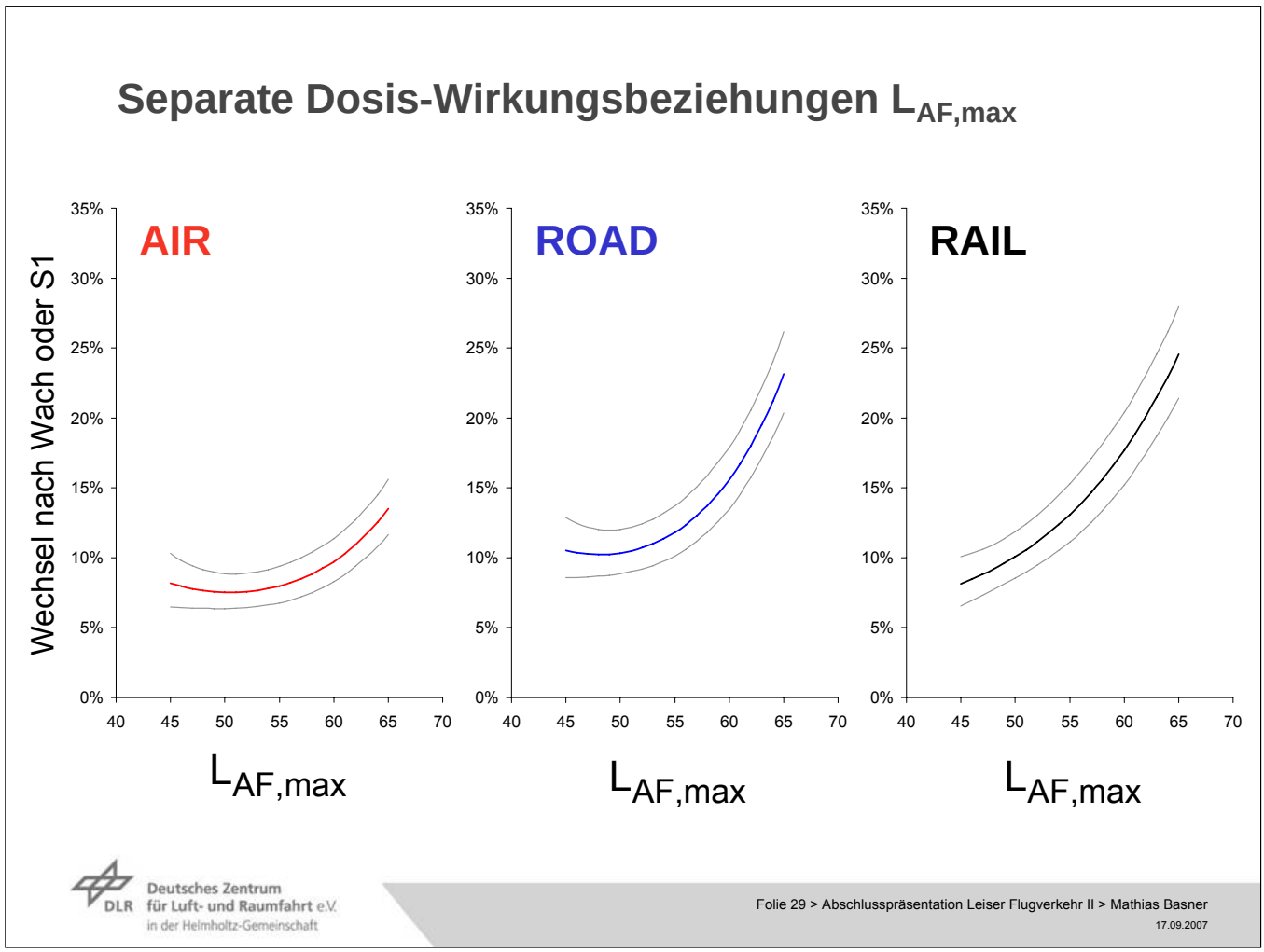
Hier sind die Dosis-Wirkungsbeziehungen für die drei Verkehrsträger zusammen mit der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit in einer Abbildung dargestellt.



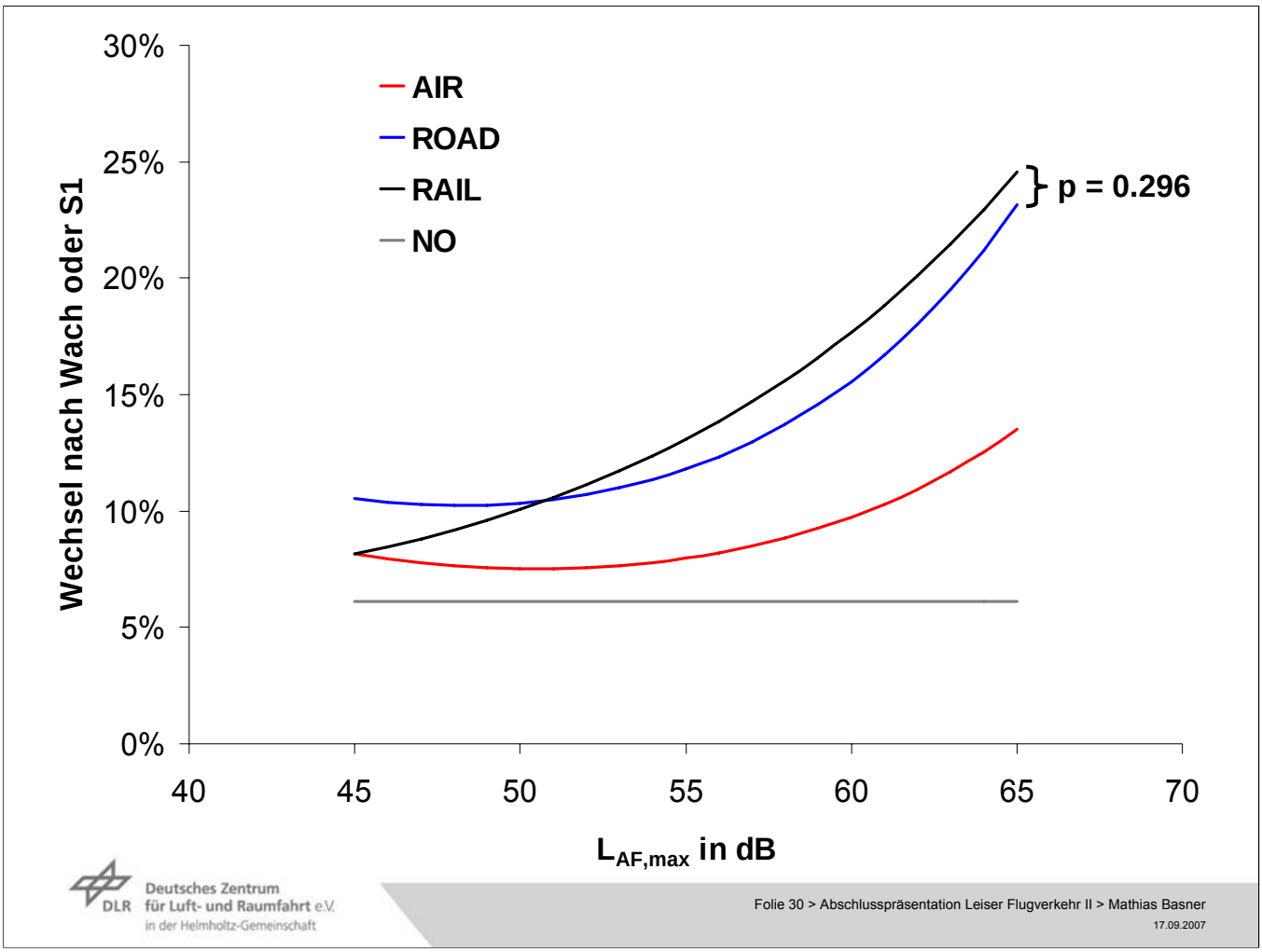
Durch die Zeitbewertung SLOW kommt es im Vergleich zur Zeitbewertung FAST zu einer stärkeren Dämpfung des Schallpegel-Signals, und damit auch zu geringeren Maximalpegeln.

Die Abbildung zeigt, dass die FAST bewerteten Maximalpegel um bis zu 5 dB über den SLOW bewerteten Maximalpegeln lagen, und dass die Unterschiede in der Reihenfolge Fluglärm, Straßenverkehrslärm und Schienenverkehrslärm geringer wurden.

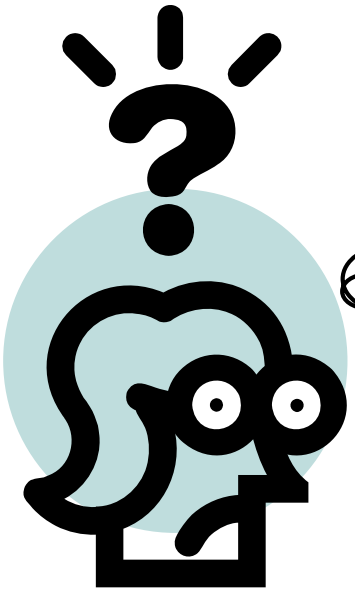
Schon aus dieser Tatsache ergibt sich, dass die zwischen Fluglärm auf der einen und Schienen- und Straßenverkehrslärm auf der anderen Seite beobachteten Unterschiede in der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Zugrundelegung des $L_{AF,max}$ eher noch größer werden müssen, da beim Fluglärm die gleiche Wirkung erst bei höheren Maximalpegeln (im Vergleich zum $L_{AS,max}$) beobachtet wird.



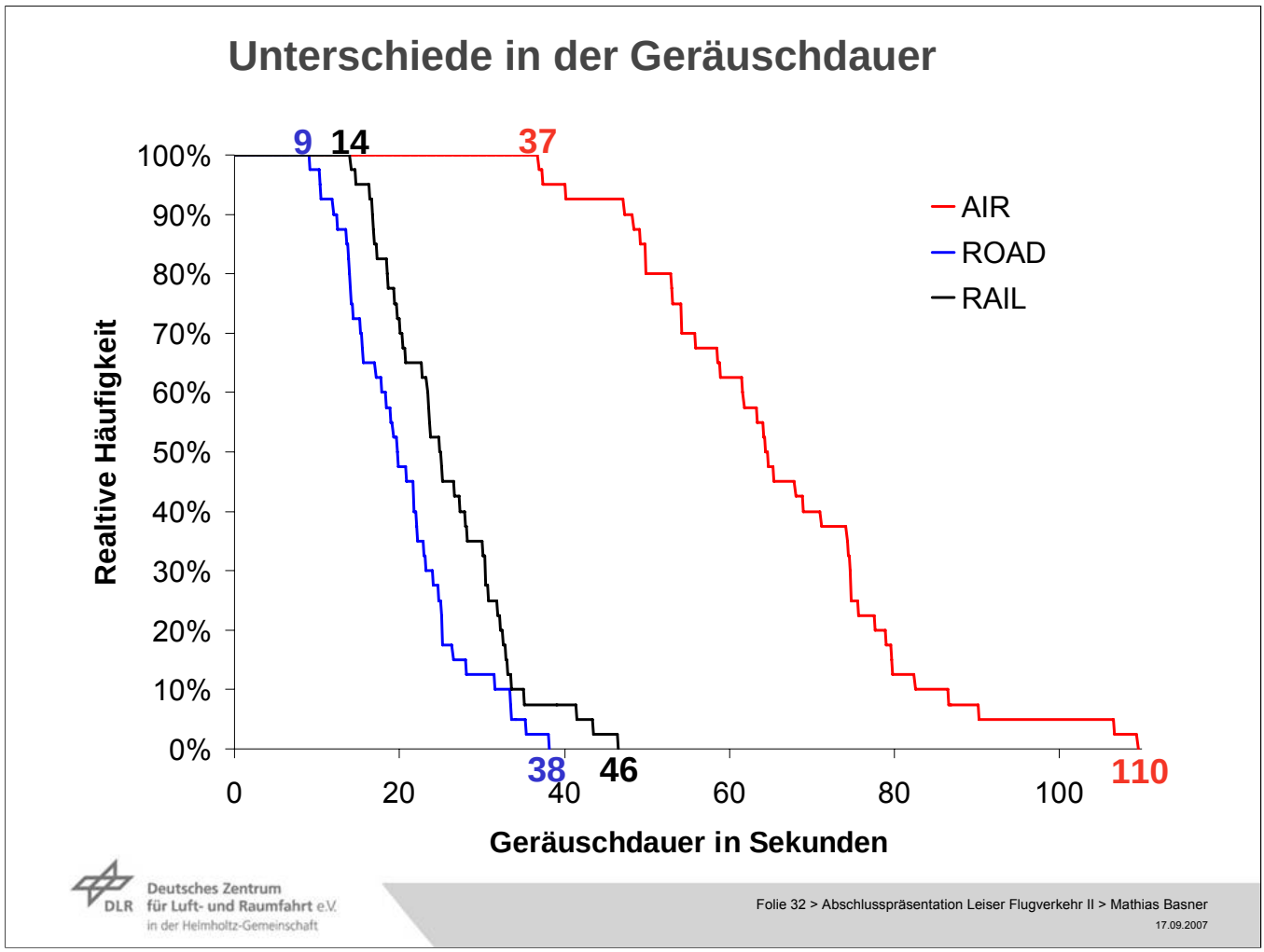
Die entsprechende Dosis-Wirkungsmodelle bestätigen diese Hypothese.



Nach wie vor gehen Schienen- und Straßenverkehrslärm im Vergleich zu Fluglärm mit höheren Aufwachwahrscheinlichkeit einher. Schienen- und Straßenverkehrslärm unterscheiden sich auch bei Zugrundelegung des $L_{AF,max}$ nicht signifikant.

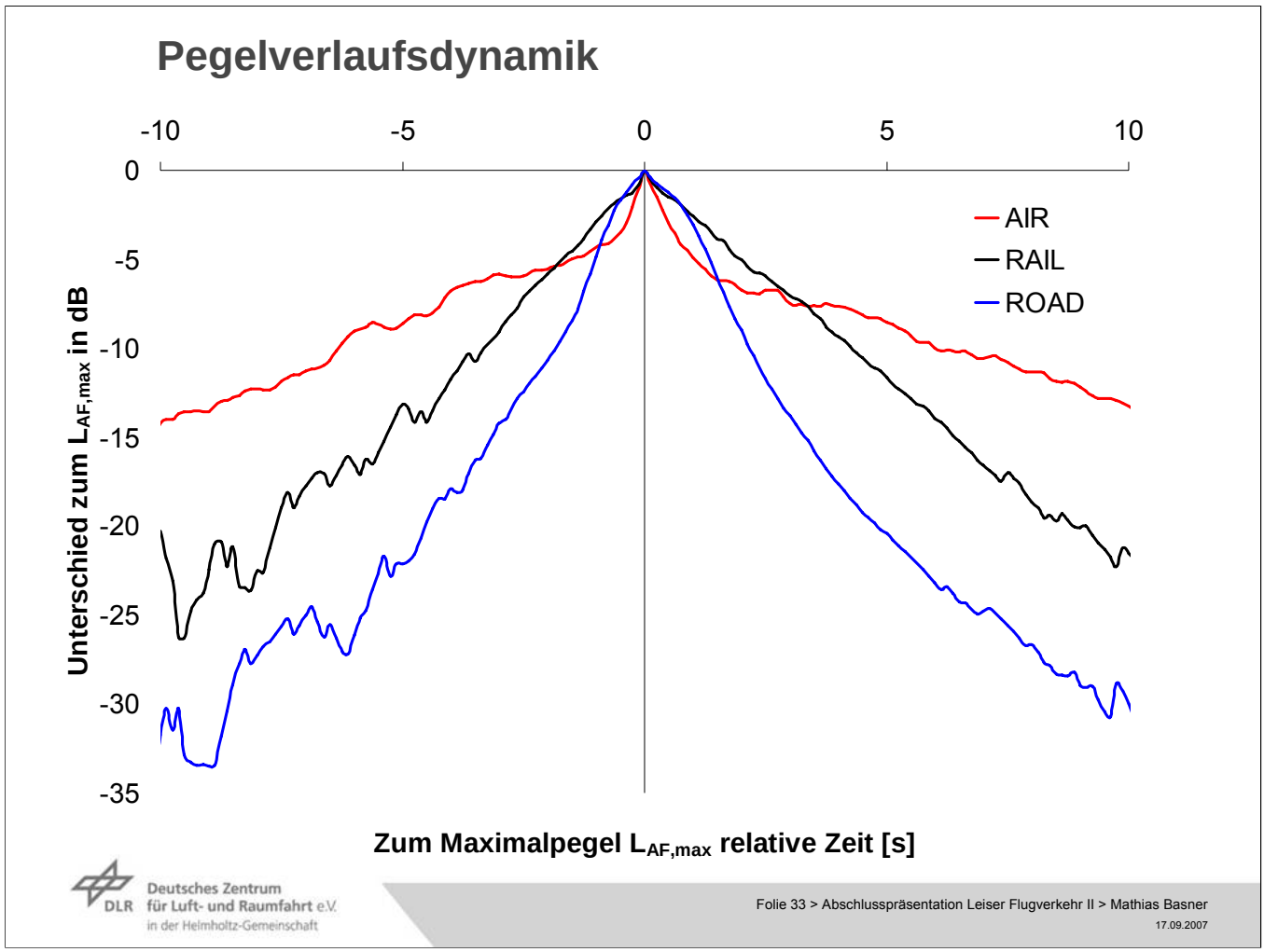


Wodurch kommen die Unterschiede im Aufwachverhalten bei gleichem Maximalpegel zustande?



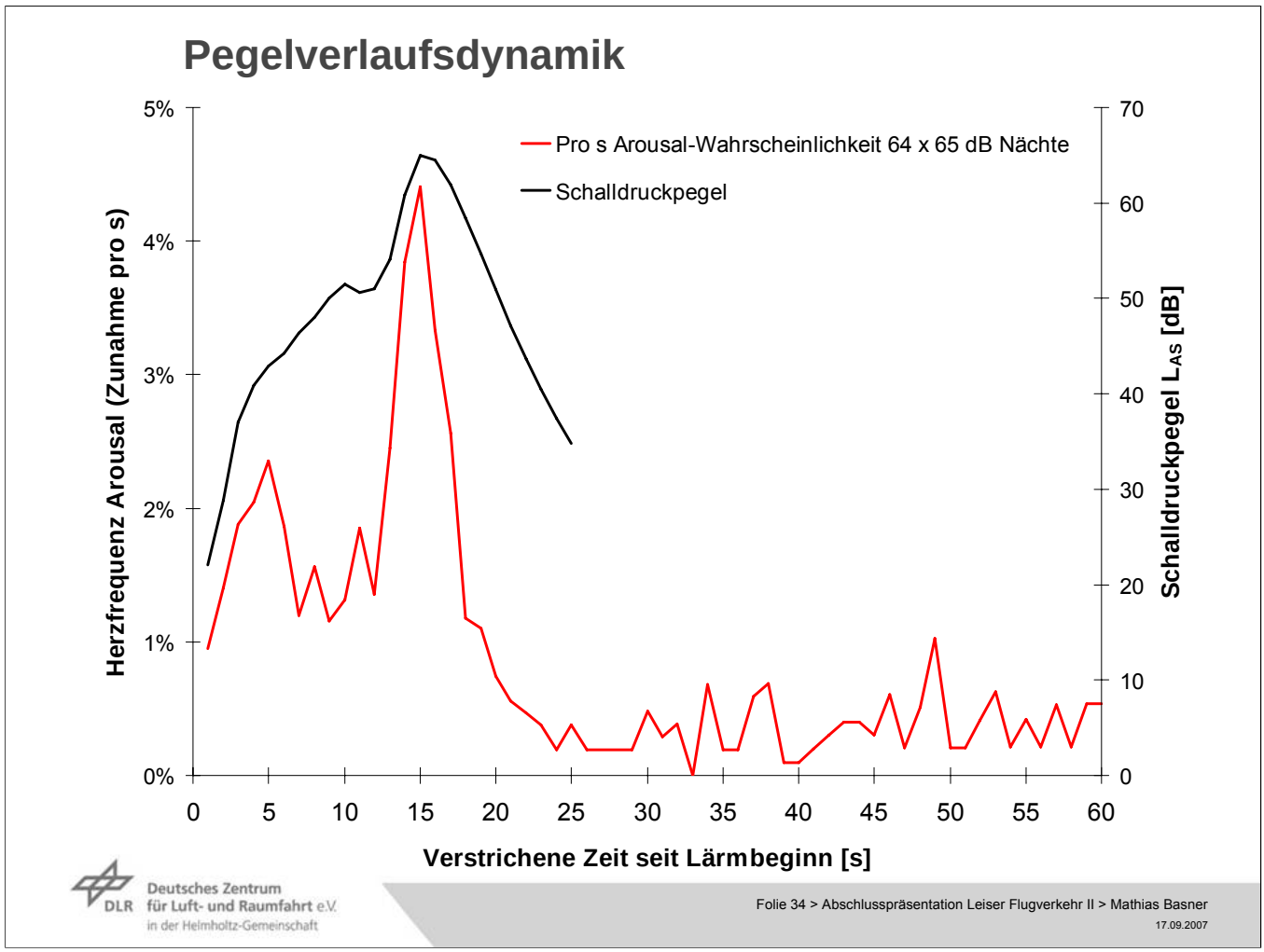
Die Unterschiede im Aufwachverhalten könnten durch Unterschiede in der Geräuschdauer begründet sein. Diese stieg vom Straßenverkehrslärm (Dauer 9 bis 38 s) über den Schienenverkehrslärm (Dauer 14 bis 46 s) bis zum Fluglärm (Dauer 37 bis 110 s) an.

Demnach würden längere Geräusche mit einer geringeren Aufwachwahrscheinlichkeit einhergehen, was in einer geringeren Pegelanstiegssteilheit begründet sein könnte (s. nächste Folie).



Diese Abbildung zeigt den Pegelverlauf relativ zum Maximalpegel des Geräusches, wobei die Pegel der einzelnen Geräusche arithmetisch gemittelt wurden.

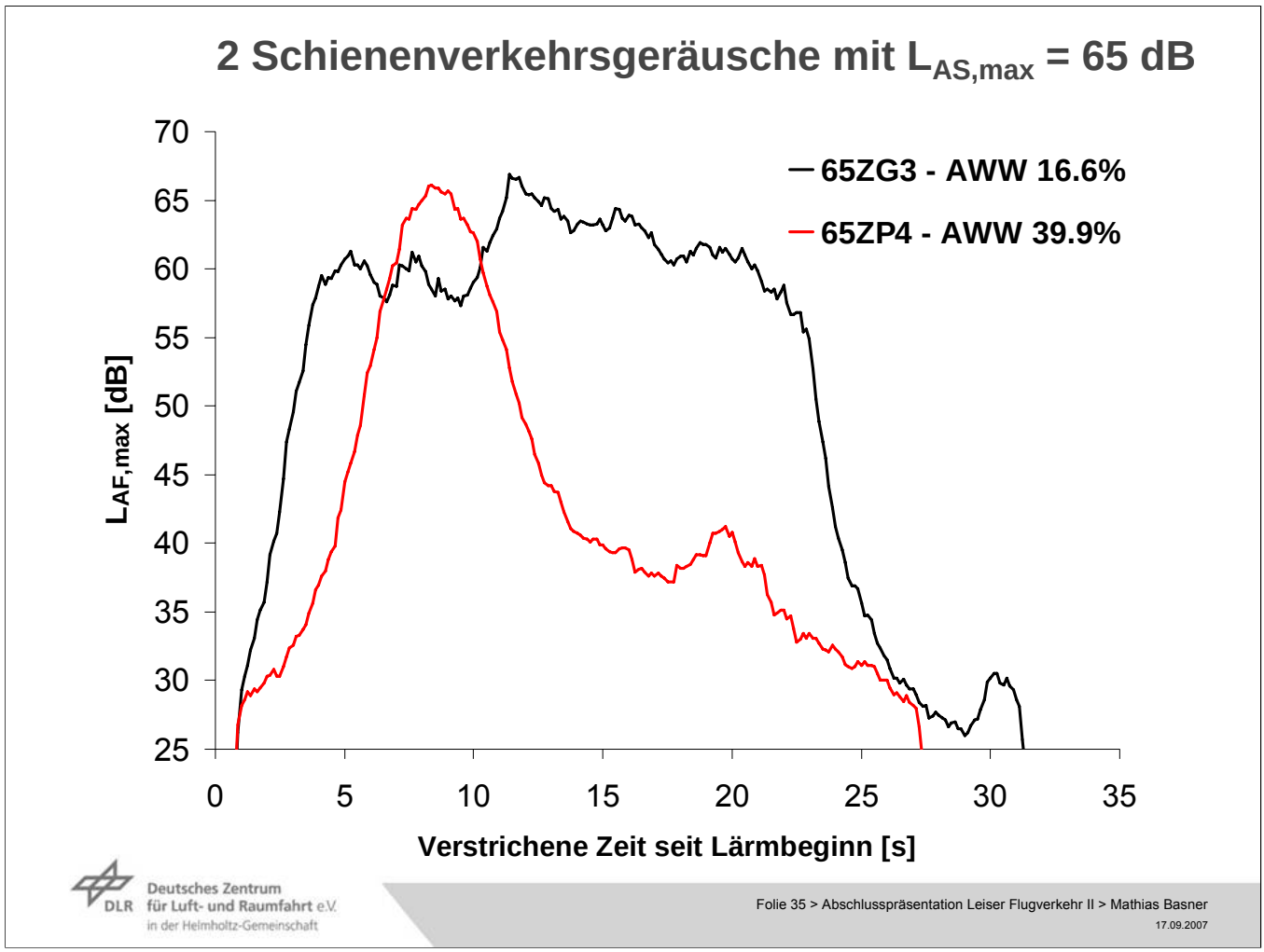
Die höchsten Pegelanstiegssteilheiten ergaben sich für den Straßenverkehrslärm, gefolgt vom Schienenverkehrslärm und Fluglärm.



Auch diese Abbildung weist auf die Bedeutung der Pegelanstiegssteilheit hin.

In rot dargestellt ist die Geschwindigkeit, mit der Herzfrequenzarousal auftreten. Diese Geschwindigkeit ist definiert als der Anteil Versuchspersonen, der in einem Zeitraum von 1 s ein Herzfrequenzarousal zeigt, bezogen auf den Anteil der Versuchspersonen unter Risiko zu Beginn des Intervalls.

Die Arousal-Geschwindigkeitsverteilung ist zweigipfelig. Starke Zunahmen ergeben sich in Zeiträumen, in denen auch eine hohe Pegelanstiegssteilheit des Fluggeräusches beobachtet werden kann. Es ist möglich, dass komplexe Interaktionen zwischen momentanem Pegel und Pegelanstiegssteilheit bestehen.



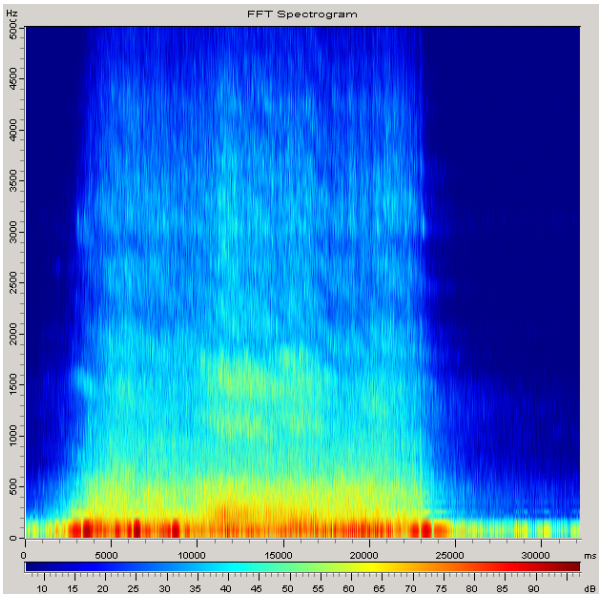
In dieser Abbildung sind Pegel-Zeitverläufe von zwei verschiedenen Schienenverkehrsgeräuschen mit identischem $L_{AS,max}$ dargestellt.

Die Aufwachwahrscheinlichkeiten unterschieden sich trotz identischem Maximalpegel deutlich (16.6% versus 39.9%). Auch die Pegelanstiegssteilheiten scheinen vergleichbar zu sein. Die Dauer, in der der Maximalpegel > 55 dB ist, war für das Geräusch mit der geringeren Aufwachwahrscheinlichkeit deutlich länger.

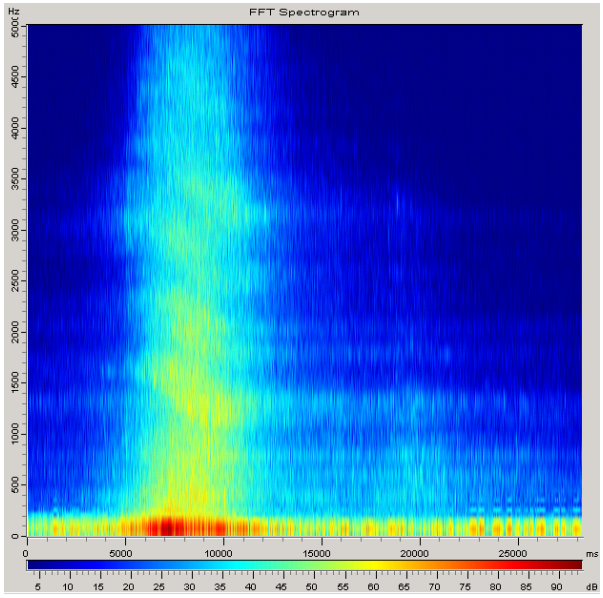
Auch Maximalpegel und Pegelanstiegssteilheit scheinen das Aufwachverhalten demnach nur z.T. zu erklären.

Frequenzcharakteristik

65ZG3 AWW 16,6%



65ZP4 AWW 39,9%



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

Folie 36 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner
17.09.2007

Diese Abbildung zeigt eine Frequenzanalyse der beiden in der letzen Abbildung dargestellten Geräusche. Das Geräusch mit der höheren Aufwachwahrscheinlichkeit scheint im Frequenzbereich > 1 kHz über höhere Energien zu verfügen.

Weitere Analysen werden zeigen müssen, welche anderen (psycho)akustischen Faktoren für das Aufwachverhalten eine entscheidende Rolle spielen. Mit Kenntnis dieser Faktoren könnte die Prognose von Verkehrslärmwirkungen und damit der Schutz der Bevölkerung vor negativen Lärmwirkungen verbessert werden.

Zusammenfassung, Limitationen und Ausblick

Zusammenfassung

- Verkehrslärm führte zu primären (Aufwachreaktionen↑, Tiefschlaf↓) und sekundären Schlafstörungen (Belästigung↑, Gedächtnis↓)
- Bei gleichem Maximalpegel war die Wahrscheinlichkeit, auf Fluggeräusche zu reagieren im Vergleich zu Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen signifikant geringer (Schienenbonus?).
- Es konnten kumulative Effekte von Verkehrslärm gezeigt werden.
- Unterschiede in der Störwirkung der drei Verkehrsträger hingen von der betrachteten Wirkgröße (z.B. Aufwachreaktionen, Belästigung) ab.

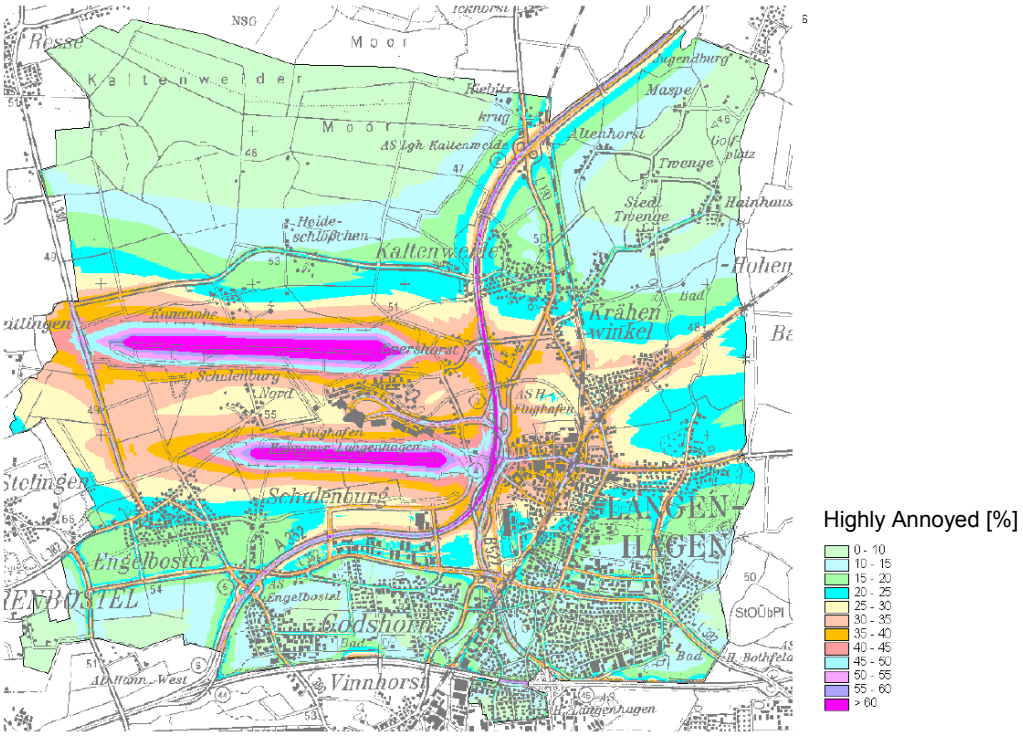
Limitationen

- Die ökologische Validität dieser Laborstudie ist gering.
- Die Repräsentativität von 40 Geräuschen pro Verkehrsträger ist eingeschränkt.

Ausblick

- Daten zu den drei Verkehrsträgern müssen in Feldstudien erhoben werden.
- Welche akustischen Eigenschaften des Geräusches bestimmen die Reaktion auf den Lärm neben dem Maximalpegel? Detailauswertungen sind erforderlich.

Das Ziel...



nach Vogelsang, B., DAGA 2001

Es ist das Ziel, die Wirkungen aller drei Verkehrslärmarten GLEICHZEITIG möglichst genau zu beschreiben, um die Bevölkerung möglichst gut vor den negativen Folgen des Lärms auf den Schlaf schützen zu können.

In der Abbildung wurde der Anteil Hochbelästigter in Abhängigkeit von Flug-, Straßen- und Schienenverkehrslärm prognostiziert (Vogelsang 2001).

Für den Schlaf müssen Dosis-Wirkungsbeziehungen für die drei Verkehrsträger im Feld ermittelt werden. Des weiteren muss die Lärmprognose für Straßen- und Schienenverkehrslärm verbessert werden.

Vielen Dank...

Helga Buess
Dr. Eva-Maria Elmenhorst
Axel Gerlich
Rabea Haag
Norbert Luks
Dr. Hartmut Maaß
Louise Mawet
Dr. Uwe Müller
Ernst-Wilhelm Müller
Tanja Niederl
Gernot Plath
Dr. Julia Quehl
Stefan Schmitt
Manfred Schulze
Martin Vejvoda
Prof. Jürgen Wenzel
Martin Wittkowski
allen Probanden

Dr. Alexander Samel

† 19.05.2007

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

Folie 40 > Abschlusspräsentation Leiser Flugverkehr II > Mathias Basner
17.09.2007

Die AIRORA Studie und dieser Vortrag ist Dr. Alexander Samel gewidmet, der am 19.05.2007 im Alter von nur 59 Jahren viel zu früh und unerwartet starb.

Wir haben mit ihm einen außergewöhnlichen und integeren Menschen, einen hervorragenden Wissenschaftler und einen sehr guten Freund verloren.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

www.dlr.de/flugphysiologie