Dirk Windelberg

Nächtlicher Verkehrslärm und seine Lärmstruktur

12. März 2014

AG Qualität
Leibniz Universität Hannover

1. Stand der Technik

2. individuelle Schlafstörungen/Aufweckreaktionen

1. Stand der Technik

1.1 Schienenverkehr und Schlafstruktur

Wie lässt sich die Lärmstruktur nächtlichen (Schienen-)Verkehrslärms messen?

„Es besteht kein Zweifel daran, dass Verkehrslärm den Schlaf stört und in Abhängigkeit von Anzahl und Lautstärke der Verkehrsgeräusche zu Veränderungen der Schlafstruktur führt“ (Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland - Fokus Verkehrslärm, S. 17).

Es ist für viele reale Schienenverkehrsstrecken nur ein Jahres-Nacht-Mittelungspegel bekannt, obwohl selbst an verschiedenen Wochentagen einer Woche auch verschiedene Nacht-Mittelungspegel auftreten.

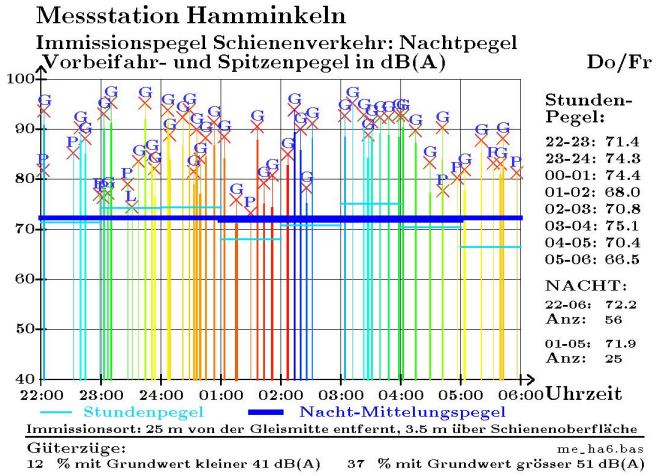


Bild 1.1a: **47 Güterzug-Vorbeifahrten**
Nacht-Mittelungspegel: 72 $dB(A)$ **(22-06 Uhr)**
71 $dB(A)$ **(01 bis 05 Uhr)**

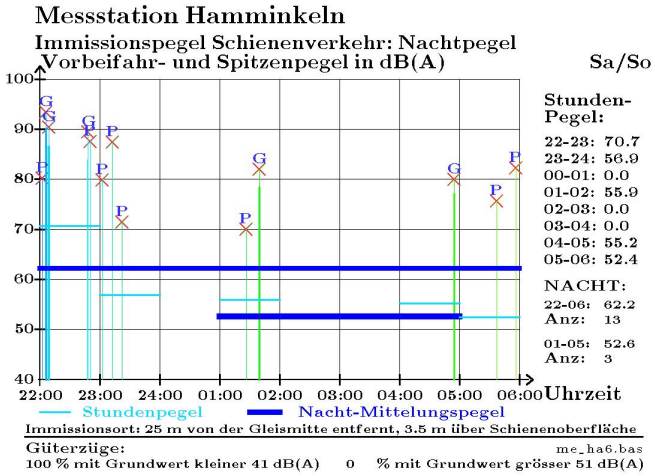


Bild 1.1b: **5 Güterzug-Vorbeifahrten**
Nacht-Mittelungspegel: 62 $dB(A)$ **(22-06 Uhr)**
53 $dB(A)$ **(01 bis 05 Uhr)**

1.2 Störung der Schlafstruktur (im Schlaflabor)

- **Ein einzelner (erwachsener) Bürger B schläft zu einer bestimmten Zeit z ein.**
- **nach einer bestimmten Zeit m (in Minuten nach dem Einschlafen) ertönt mit Hilfe eines geeigneten Lautsprechers ein „Geräusch“:**
  1. **Der Pegel P des Geräusches soll unter Berücksichtigung des maximalen Vorbeifahrpegels P_{max} gemäß der Pegelverteilung einer „typischen“ Güterverkehrsstrecke variieren.**
  2. **Dieses Geräusch soll einen mit einer bestimmten Geschwindigkeit in einem bestimmten Abstand vorbeifahrenden Güterzug repräsentieren - mit „geeigneten“ Frequenzverteilungen F der einzelnen Güterwagen.**
  3. **Dieses Geräusch soll eine der Realität entsprechende Vorbeifahr-Dauer T aufweisen,**
- **Dann wird untersucht, ob B durch dieses Geräusch aufgeweckt wurde (und wie sich seine Schlafstruktur geändert hat).**

„Aufgrund von biologisch plausiblen Gewöhnungseffekten sind ... Veränderungen der Schlafstruktur ... nicht mit klinischen Schlafstörungen zu vergleichen...
Die Gesetzgebung in Deutschland beschränkt sich weiterhin auf die Einhaltung abstrakter Grenzwerte wie dem äquivalenten Dauerschallpegel, die weder von der Bevölkerung verstanden werden noch mit der Schlaf störenden Wirkung des Verkehrslärms gut korrelieren“ (aaO, Seite 17 f.).

- **Weder Befragungs-Ergebnisse einer Langzeitstudie aus Oberwesel ([1]) [1] mit 380 Antworten auf die Frage *„Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen zu Hause denken, wie stark haben Sie sich durch Lärm von der Lärmquelle Bahnlärm gestört oder belästigt gefühlt“***
- **noch die beim DLR entwickelten Lärmwirkungsmodelle zu Aussage über physiologische Effekte**

lassen erkennen, wie hoch der Prozentsatz der Befragten/Probanden ist, die sich durch

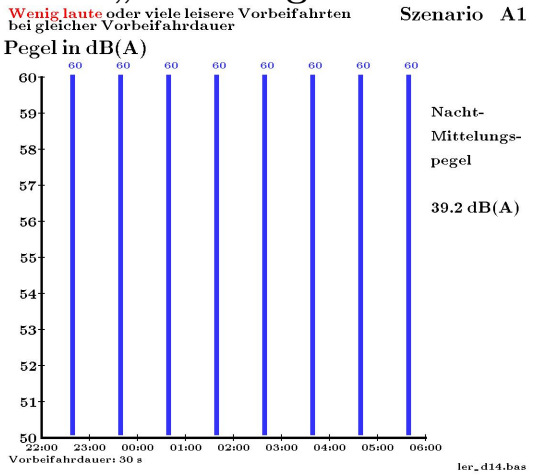
8 Güterzugvorbeifahrten mit jeweils 72 $dB(A)$ für 30 Sekunden
zu den Zeiten 22:30, 23:30, 00:30, 01:30, 02:30, 03:30, 04:30, 05:30 Uhr

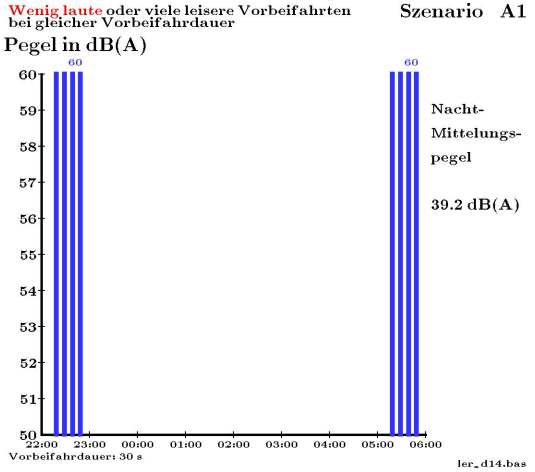
in ihrem Schlaf äußerst gestört fühlen,

und wie hoch der Prozentsatz derer ist, die sich durch

8 Güterzugvorbeifahrten mit jeweils 72 $dB(A)$ für 30 Sekunden
zu den Zeiten 22:12, 22:24, 22:36, 22:48, 05:12, 05:24, 05:36, 05:48 Uhr

in ihrem Schlaf „äußerst gestört“ fühlen.





[1] Heimann et al.: *Von der Emission bis zur Wirkung.* Lärmbekämpfung, Heft 1/2014, S. 20 - 28

Die oben angegebene Betrachtung führte in einem „Fallbeispiel“ bei der physiologischen Betrachtung zu EEG-Signalen jeweils bei Vorbeifahrt eines Zuges, aber Aufweckreaktionen - insbesondere unter Berücksichtigung vorangegangenerAufweckeaktionen - wurden nicht beobachtet. Es blieb bei einer Befragung nach der „subjektiven Aufwachhäufigkeit“, wobei die höchste subjektive Belästigung gleichzeitig als höchste subjektive Aufwachhäufigkeit empfunden wurde.

1.3 „Typische“ Frequenzverteilungen bei Güterzügen

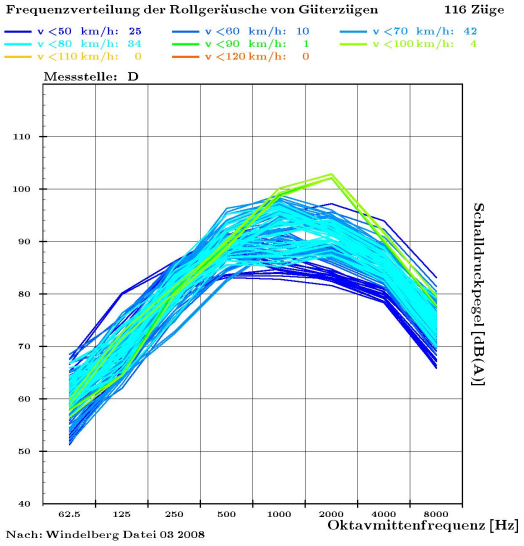


Bild 1.2a
Frequenzverteilungen von 116 Zügen an Messstelle D

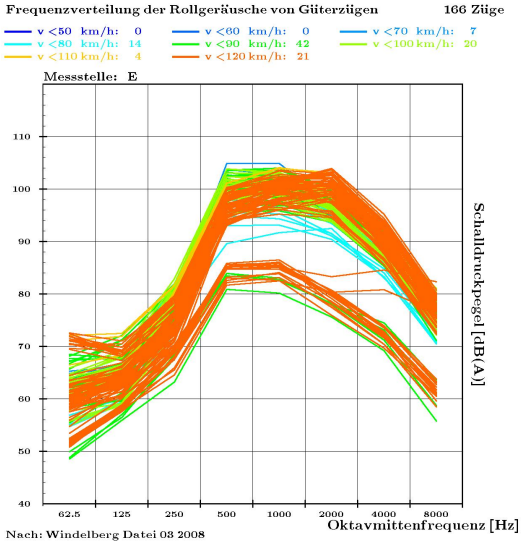


Bild 1.2b
Frequenzverteilungen von 166 Zügen an Messstelle E

Gibt es eine „typische“ Frequenzverteilung bei der Vorbeifahrt von Güterzügen?

1.4 (Typische) Schlafgewohnheiten

Der Bürger B schlafe in einem Schlafzimmer mit geschlossenen Fenstern zu bekannten *Schlafzeiten (Einschlaf- und Aufwachzeit)* mit der typischen „Tiefe“ des Schlafes (nach dem Einschlafen), falls er nicht gestört wird:

typische 8 Stunden Schlaf: „wach“, REM (Rapid Eye Movement) oder Schlafstadien I bis IV

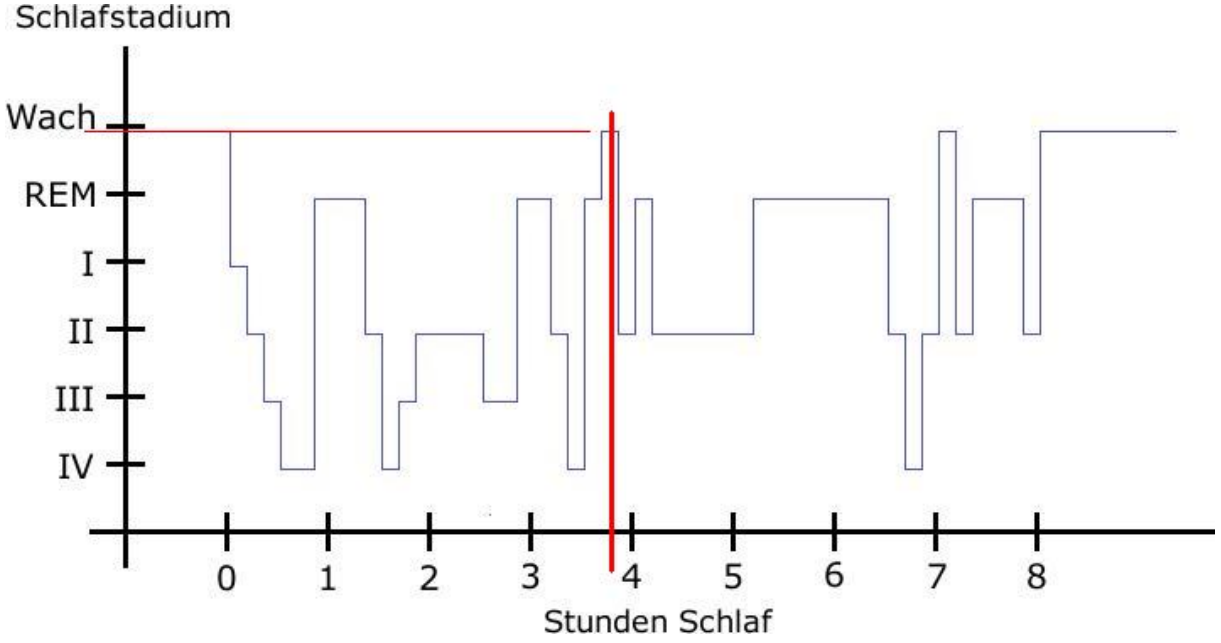


Bild 1.3 **REM-Schlaf nach Wikipedia**

3:50 Stunden nach dem Einschlafen ist das Schlafstadium „wach“!

Wird der Bürger B geweckt, wenn ein erstes Geräusch genau 3:50 Stunden nach dem Einschlafen auftritt?

Wir nehmen an, dass B genau den REM-Schlaf schläft und genau um 22:00 Uhr einschläft und erst nach 1:16 Stunden (also um 23:16 Uhr) durch einen Güterzug geweckt wird:

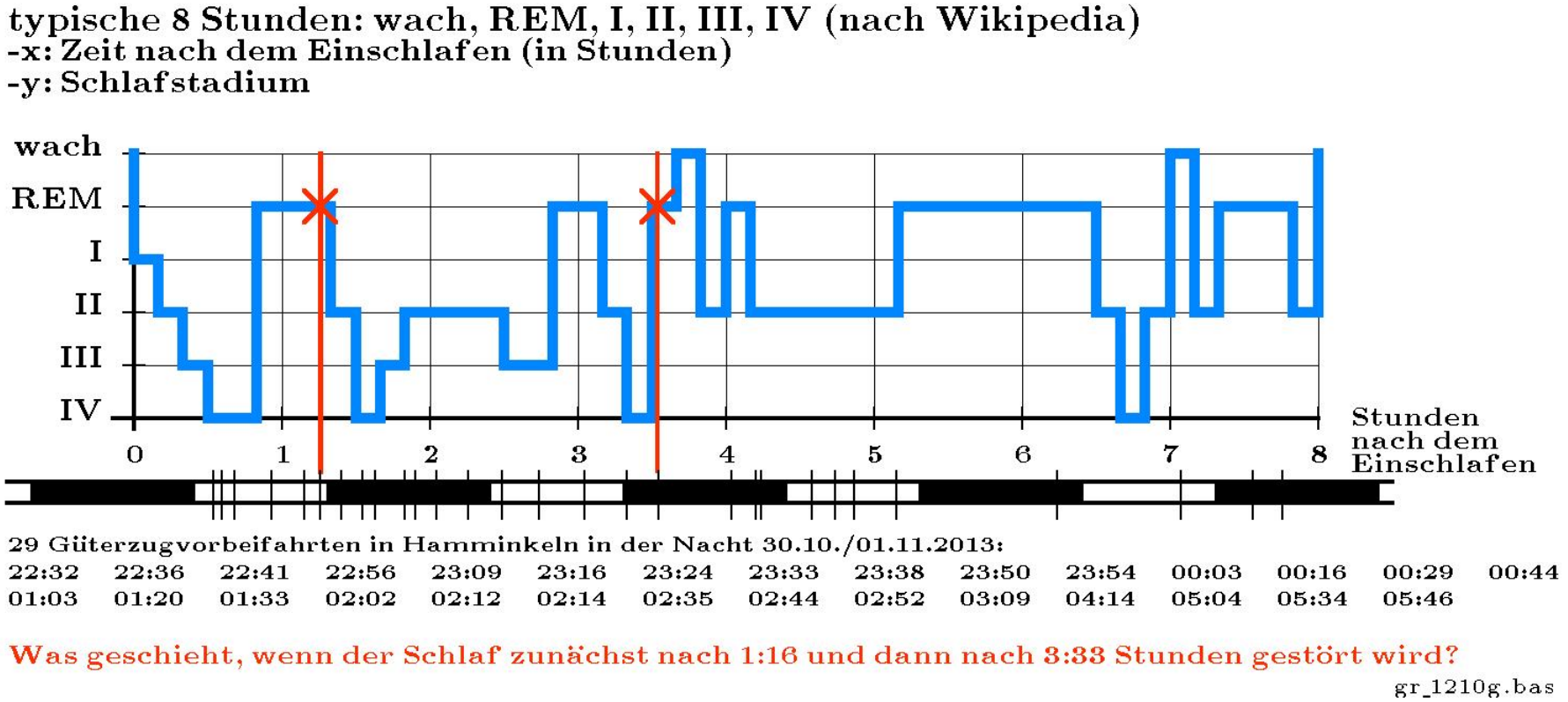


Bild 1.4 **REM-Schlaf in Hamminkeln**

Schläft B nach dem Aufwachen sofort wieder ein?
Gelten die blau eingetragenen Schlafstadien auch für die Zeit nach einer Schlafstörung oder einem Aufwachen?

Wenn B aufgeweckt wurde, bleiben viele Fragen:

Ist dieses Aufwachen zu diesem Zeitpunkt „typisch“?

1. **Schläft B genau den REM-Schlaf?**
   Oder einen Cortisol-Schlaf (Bild 1.5)?
   Oder hat B eine der 3 Schlafgewohnheiten (Bild 1.6)?

2. **Gibt es weitere Kombinationen aus**
   - Zeit m nach dem Einschlafen zur Zeit z
   - Frequenzverteilung F
   - Vorbeifahrzeit T
   - mittlerem Vorbeifahrpegel P
   - maximalem Vorbeifahrpegel P_{max},
   durch die B aufgeweckt wird?

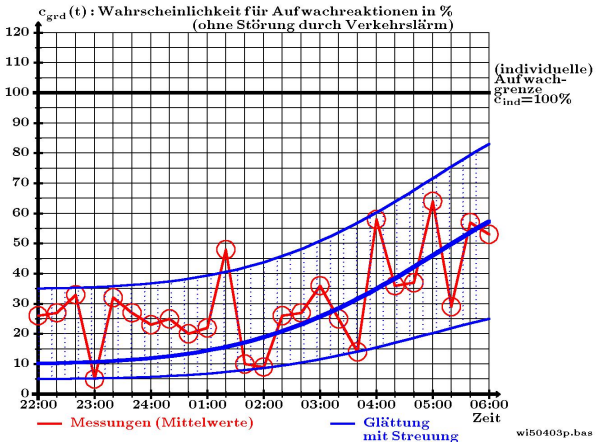


Bild 1.5
Cortisol-Schlaf

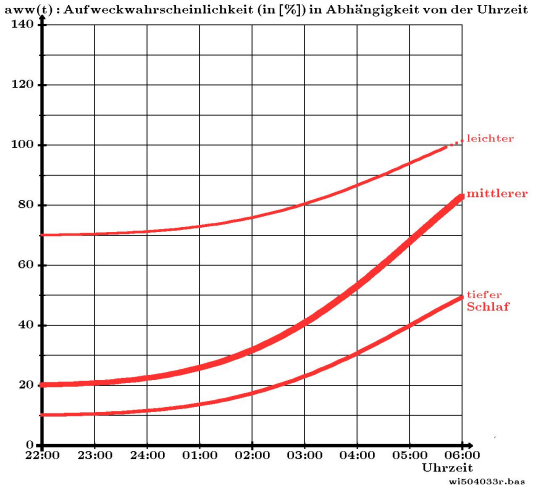


Bild 1.6
3 Schlafgewohnheiten

3. **Beeinflusst dieses erste Aufwachen die Parameter für ein späteres Aufwachen von B?**

4. **Gelten diese Bedingungen auch für andere Menschen - oder: wie hoch ist der Prozentsatz der Menschen, die durch diese Geräusche ebenfalls aufgeweckt werden?**

Lassen sich die Aufweckbedingungen verallgemeinern?

1.5 Einschlaf-Zeitpunkt und Schlafstadium

Das REM-Schlaf-*Bild 1.7* zeigt die Schlafstadien in Abhängigkeit von dem Zeitpunkt des Einschlafens; dieser Zeitpunkt ist jedoch im allgemeinen nicht bekannt.

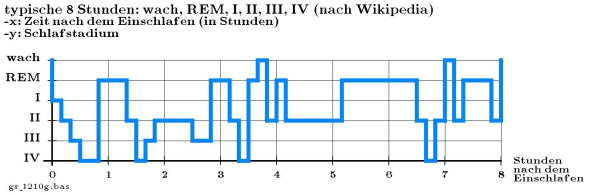


Bild 1.7
REM-Schlaf

Für jeden Bürger B,
der um 22:00 Uhr (Sommer- oder Winterzeit?)
in sein Bett geht,
muss sein jeweiliger Einschlaf-Zeitpunkt z bestimmt werden,
um aus diesem Bild zu jedem Zeitpunkt m seines Schlafes
das jeweilige Schlafstadium $S(m)$ bestimmen zu können
- falls B nicht gestört wurde.

Fährt aber zu einem Zeitpunkt m_1 nach dem Einschlafen ein Zug vorbei, so ändert sich im allgemeinen das Schlafstadium $S(m)$ für $m \geq m_1$ von B.

(Ist $m_1 = 3:50$ Stunden $= 230$ Minuten, so ist $S(m_1) =$ „wach“)

1.6 Vorhersage des Schlafqualität

Vorhersagen zu der nächtlichen Störung durch Schienenverkehrslärm für einen (individuellen) Bürger B sind nur möglich, wenn bekannt ist,

wie sich die individuellen Schlafgewohnheiten $S(m)$ nach dem Einschlafen durch einzelne Störungen (z.B. eine Güterzug-Vorbeifahrt) ändern.

Dazu ist es notwendig,

- **neben einer mathematischen Beschreibung der individuellen Schlafstadien $S(m)$ (in Abhängigkeit von der Zeit z nach dem Einschlafen) eines Bürgers B**
- **eine Aufweck-Funktion $A(z, S(m), P, P_{max}, T, F)$ zu definieren mit der Eigenschaft**
  - **$A(m, S(m), P, P_{max}, T, F) > 0$, falls B_i aufgeweckt wird,**
  - **$A(m, S(m), P, P_{max}, T, F) < 0$, falls B_i nicht aufgeweckt wird**

1.7 Laborversuch: Beschreibung nächtlicher Zugvorbeifahrten

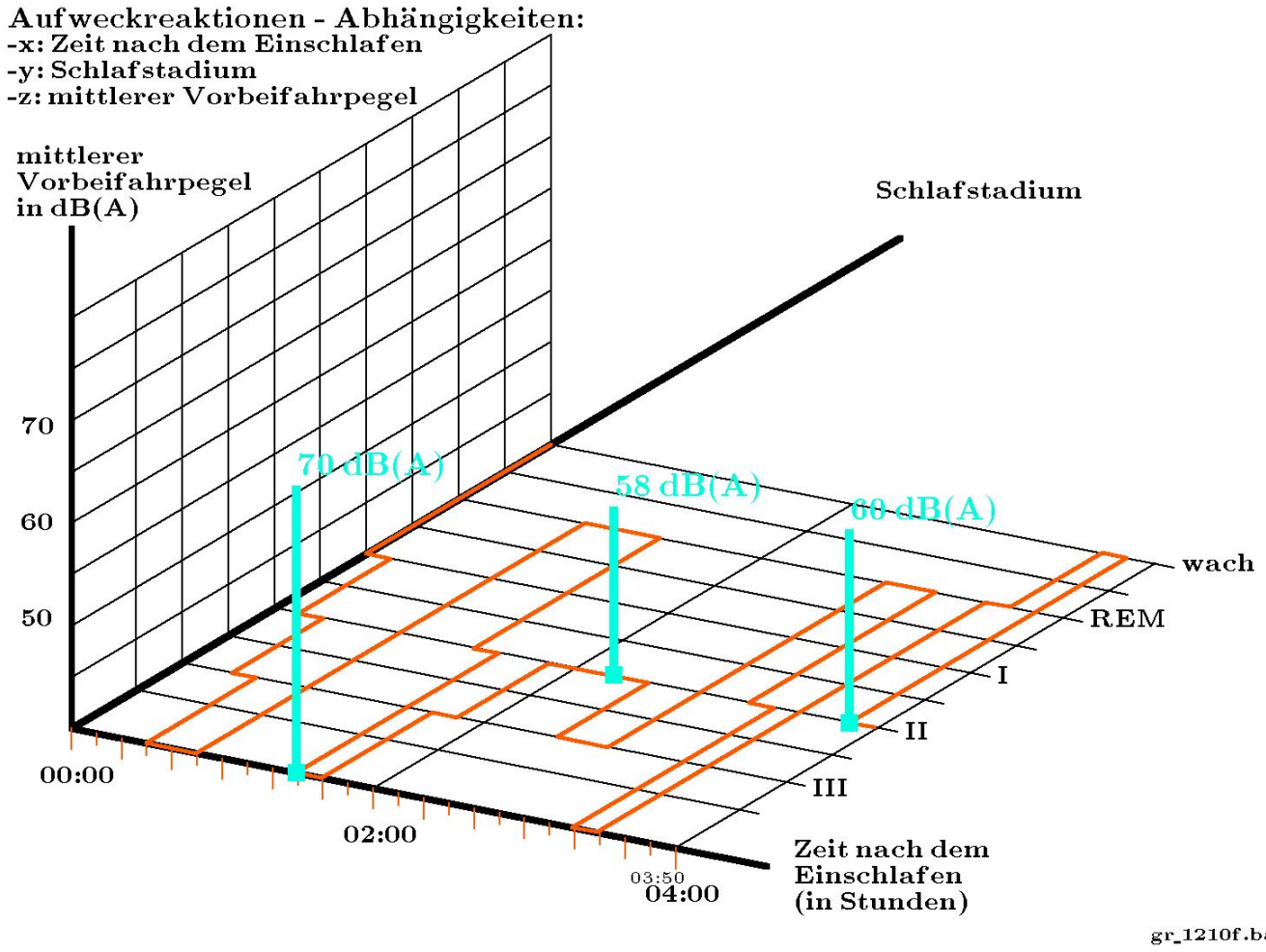
Für jeden der beteiligten Bürger seien jeweils die Schlafstadien $S(m)$ nach dem Einschlafen bekannt (z.B. nach *Bild 1.6.*)
Zusätzlich sei bekannt, wie sich diese Schlafstadien ändern, wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Geräusch mit folgenden Parametern eintritt:

z	**Der Bürger B ist zur Zeit z eingeschlafen**
m	**m Minuten nach dem Einschlafen befindet sich B**
$S(m)$	**im Schlafstadium $S(m)$ ($S(m) \in \{$„$wach$“$, REM, I, II, III, IV\}$) unter Berücksichtigung eventueller Störungen und/oder Aufweckreaktionen;**
P	**zu diesem Zeitpunkt m tritt ein mittlerer Vorbeifahrpegel P (in dB(A))**
P_{max}	**mit einem maximalen Vorbeifahrpegel P_{max}**
T	**während einer Vorbeifahrzeit T (in Sekunden)**
F	**und einer Frequenzverteilung F auf.**

Wenn B zu diesem Zeitpunkt (m Minuten nach dem Einschlafen zur Zeit z) aufwacht, dann ist $A(z, S(m), P, P_{max}, T, F) > 0$.

Andernfalls ist $A(z, S(m), P, P_{max}, T, F) < 0$.

In beiden Fällen ändern sich die Schlafstadien von B für die Zeit nach m (bis zum Aufwachen oder bis zu einer weiteren Störung).



3 Bürger B_1, B_2, B_3 wohnen an verschiedenen Stellen. Sie werden jeweils von dem ersten Zug geweckt:

Bürger B_1:
$m_1 = 90$ **Minuten**
$S_1 = IV$
$P_1 = 70$ **dB(A)**

Bürger B_2:
$m_2 = 135$ **Minuten**
$S_2 = II$
$P_2 = 58$ **dB(A)**

Bürger B_3:
$m_3 = 230$ **Minuten**
$S_3 = II$
$P_3 = 60$ **dB(A)**

Bild 1.7 **Drei Aufweck-Reaktionen bei (Wikipedia-)REM-Schläfern**

Kann durch die unten angegebenen drei „Aufweck-Punkte“ von drei Bürgern B_1, B_2 und B_3 eine allgemein-gültige Aufweck-Funktion bestimmt werden?
Könnte also vorausgesagt werden, ob ein Bürger B_4 bei einer Vorbeifahrt mit $m_4 = 165\,min$, $S_4 =$ „III“ und $P_4 = 66\,dB(A)$ aufgeweckt wird?

Jede Zugvorbeifahrt lässt sich in einem 4-dimensionalen Raum mit den Achsen

$$m, S, P \text{ und } T$$

bezüglich des jeweiligen Schlafstadiums S von B beschreiben (Bild 1.7 zeigt nur die Parameter m, S und P).

Leider werden die oben beschriebenen Daten - auch wenn sie gemessen wurden - meist nicht dokumentiert.

Ausnahmen:

in Hamminkeln: Uhrzeit z, P, P_{max}, T und Geschwindigkeit v,

in Assmannshausen: Uhrzeit z, P, P_{max} und Stundenpegel L_{eq}, jeweils Tag und Nacht,

in Oberwesel: L_{eq}, P_{max} und Anzahl Züge, jeweils Tag und Nacht.

Von den sonstigen Schienenstrecken sind nur die durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) publizierten gerechneten mittleren Tag- und mittleren Nacht-Mittelungspegels eines Jahres P verfügbar (allerdings nicht von Oldenburg: die Lärmbelastung ist zu gering).

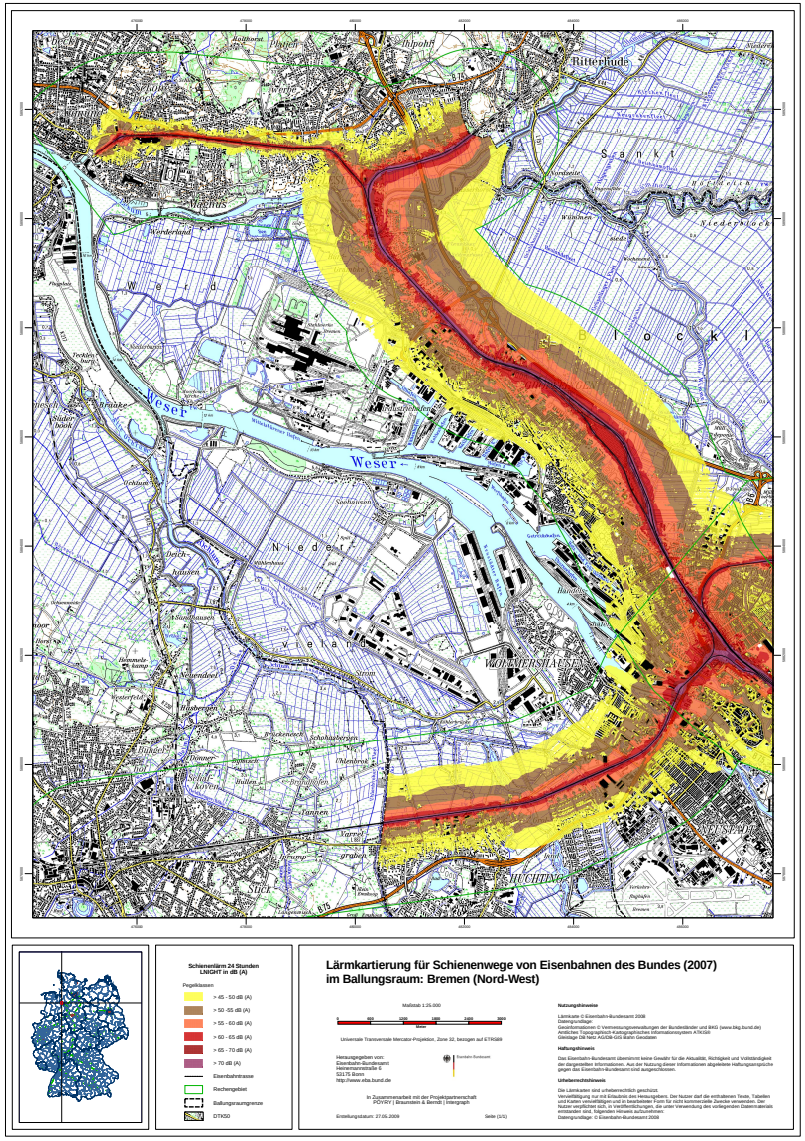


Bild 1.8: EBA-Daten Bremen-W

Uhr-zeit	Art	Messwerte: Vorbei-fahrzeit t in s	Messwerte: Geschwin-digkeit v v in km/h	Messwerte: Vorbei-fahrpegel in $dB(A)$	Berechnete Werte: Stunden-pegel in $dB(A)$	Berechnete Werte: Grund-wert in $dB(A)$	Messwert: maximaler Pegel in $dB(A)$
22:03:51	P	6.8	110	75.5	48.0	35.3	78.1
22:38:41	P	11	-124	81.7	56.1	39.9	85.4
22:53:24	G	26	-70	84.5	62.8	50.1	87
23:01:20	P	4.2	-114	76.4	46.7	35.6	79.6
23:03:33	P	6.0	136	78.0	49.9	35.0	81.2
23:09:43	G	17	-68	81.5	58.0	47.6	84.4
23:10:22	G	30	63	81.2	60.1	48.2	85.1
23:26:03	P	7.2	94	76.1	48.8	37.9	80.1
23:30:20	G	22	-81	88.3	65.9	52.1	92.7
23:31:30	G	17	88	83.8	60.1	46.4	88.3
23:37:54	G	22	-83	90.6	68.2	54.0	95.1
23:53:20	L	3.2	100	73.2	42.4	34.2	76.9
23:53:49	G	23	-80	87.2	64.9	51.1	90
00:00:05	G	22	-81	89.0	66.6	52.8	92
00:19:25	G	41	-48	78.9	59.2	49.5	82
00:28:02	L	4.0	106	68.6	38.8	28.9	72.3
00:33:31	G	21	-82	86.5	63.9	50.1	91.2
00:36:45	G	24	97	87.3	65.2	48.7	92.2
01:18:34	G	29	-71	77.4	56.2	42.9	84.9
01:28:15	G	31	77	74.9	54.0	39.3	77.8
01:34:58	G	17	-80	74.0	50.4	37.9	77.3
01:34:59	G	41	53	69.1	49.5	38.4	77.1
01:49:45	G	31	84	82.2	61.3	45.5	85.7
01:58:24	G	18	78	75.4	52.1	39.6	80.6
02:15:10	G	25	87	82.6	60.8	45.4	85.7
02:25:25	G	24	-74	85.6	63.6	50.5	87.9
02:30:37	G	19	-88	86.0	62.9	48.7	90.9
02:44:17	G	30	80	81.2	60.1	45.1	85
02:54:41	L	3.2	81	72.5	41.7	36.3	75
03:05:28	G	16	88	76.5	52.7	39.1	83.1
03:16:57	G	14	97	88.6	64.2	50.0	91.1
03:46:38	G	28	85	76.4	55.1	39.5	81.9
03:52:11	G	27	-66	75.4	53.9	41.8	82.8

Bild 1.9: vollständige Daten Hamminkeln

2. individuelle Schlafstörungen/Aufweckreaktionen

2.1 Zusammenwirken von Ursache und Wirkung

Wir haben

- **minutengenaue Beschreibungen des Schlafes (z.B. durch REM-Schlaf, Cortisol-Schlaf oder die drei Schlafgewohnheiten „leicht“, „mittel“ und „tief“) während des Zeitpunktes des individuellen Einschlafens,**
  und
- **jahresgenaue Beschreibungen des Schienenverkehrslärms durch den Jahres-Nacht-Mittelungspegel.**

Diese Informationen lassen sich nicht sinnvoll miteinander kombinieren!
Es ist notwendig, auch Zugvorbeifahrten minutengenau zu betrachten!

Daher betrachten wir zunächstfolgende Ursachen

a) 8 Güterzugvorbeifahrten mit jeweils 72 $dB(A)$ für 30 Sekunden zu den Zeiten 22:30, 23:30, 00:30, 01:30, 02:30, 03:30, 04:30, 05:30 Uhr

b) 8 Güterzugvorbeifahrten mit jeweils 72 $dB(A)$ für 30 Sekunden zu den Zeiten 22:12, 22:24, 22:36, 22:48, 05:12, 05:24, 05:36, 05:48 Uhr

Obwohl diese Ursachen in den Fällen a) und b) gleich sind, soll im Folgenden untersucht werden, ob auch die berechneten Aufweckreaktionen gleich sind.

Dabei werden verschiedene Faktoren variiert, um individuelle Schlaf-Faktoren zu berücksichtigen. Unberücksichtigt bleiben in diesem Teil jedoch

- **die Vorgeschichte des Bürgers (vorangegangene Störungen, z.B. durch Vorbeifahrten)**
- **die jeweiligen Schlafstadien S des Bürgers**

2.2 Minutengenaue Dokumentation von Güterzug-Vorbeifahrten

Sekundengenaue Beschreibungen jeder einzelnen Güterzug-Vorbeifahrt (mit Video und Pegel und Geschwindigkeit im 0.2 Sekunden-Schritt) liegen nur von der Messstation Hamminkeln vor;

die Messstellen Hamminkeln und Assmannshausen geben die Uhrzeit und den Pegel, nicht aber die Vorbeifahrzeit jeder Vorbeifahrt an.

Dennoch können aber einzelne mögliche Aufweckreaktionen eines einzelnen Bürgers nicht prognostiziert werden, da

- **der Zeitpunkt des Einschlafens für keinen Bürger für keine Nacht an irgendeinem der Messstellen-Orte bekannt ist, und**
- **die Schlafstadien für keinen Bürger für keine Nacht an irgendeinem der Messstellen-Orte bekannt sind.**

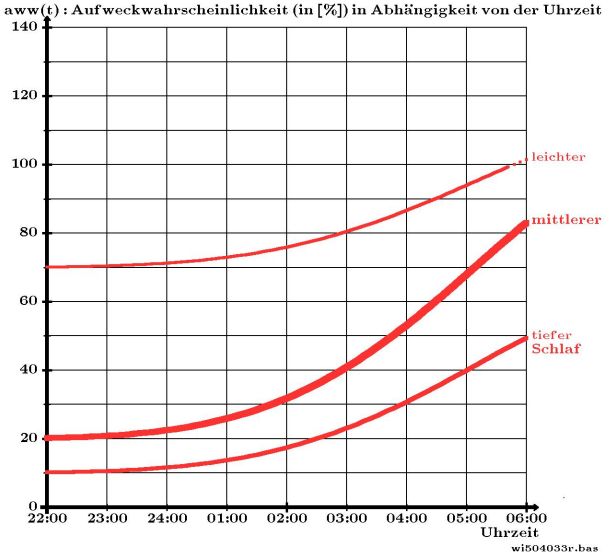
Ziel dieser Betrachtung soll es daher sein,
für sämtliche Zugvorbeifahrten einer Nacht
jeweils mit Uhrzeit z, Vorbeifahrzeit T und Pegel P
mögliche Aufweckreaktionen für Bürger
mit Einschlafzeit z und Schlafstadien S
die Anzahl möglicher Aufweckreaktionen zu prognostizieren. [2]

[2] Da es messtechnisch und mathematisch sehr aufwendig wäre, den maximalen Vorbeifahrpegel P_{max} bei einer zeitlichen Auflösung von $0.2\,s$ sinnvoll zu berücksichtigen, wird hier zunächst darauf verzichtet.

Es wird deutlich,
dass es nicht ausreicht,
Bedingungen für ein erstes mögliches Aufwecken eines Bürgers zu finden,
sondern es ist notwendig zu beschreiben,
wie eine beliebige Zugvorbeifahrt den Verlauf des (weiteren) Schlafes beeinflusst

2.3 Zugvorbeifahrten und Aufweckreaktionen

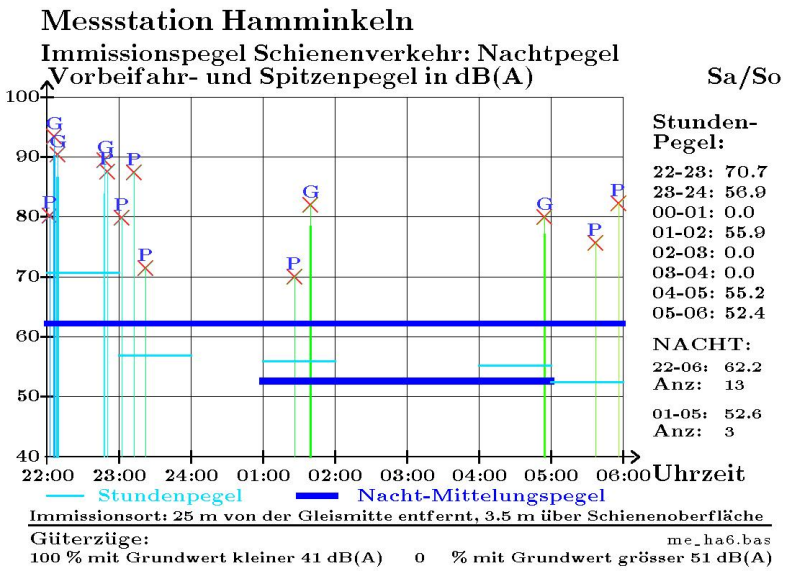
Für die Wirkung werden die drei verschiedenen Schlafgewohnheiten und dazu jeweils verschiedene Parameter bezüglich der Beeinflussung des Schlafes durch Schienenverkehrslärm berücksichtigt.



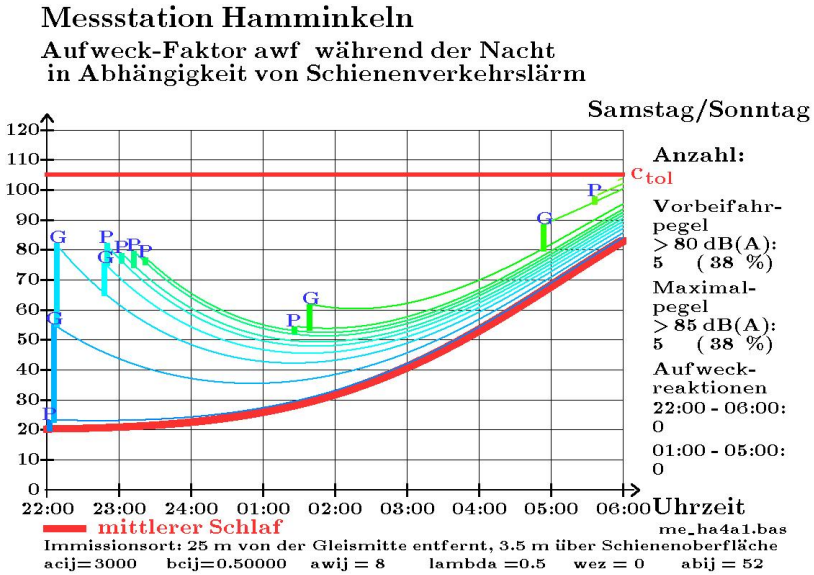
Schlafkurve: $y = a + b \cdot \cos\left(\left(\frac{1}{12} \cdot (2+t)\right)^2 \cdot \pi\right)$ **für** $0 \le t \le 8$

für die 8 Nachtstunden, mit

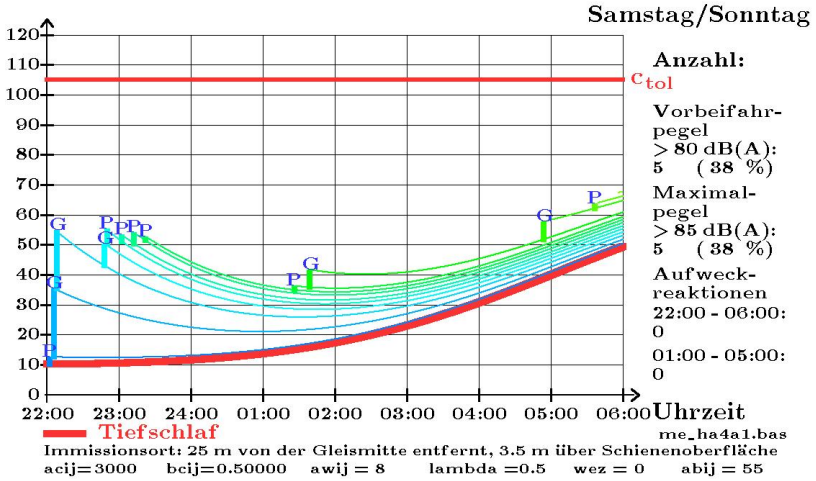
$a = 60$ **und** $b = -40$ **für mittleren Schlaf,** $a = 35$ **und** $b = -25$ **für tiefen Schlaf**
und $a = 90$ **und** $b = -20$ **für leichten Schlaf**



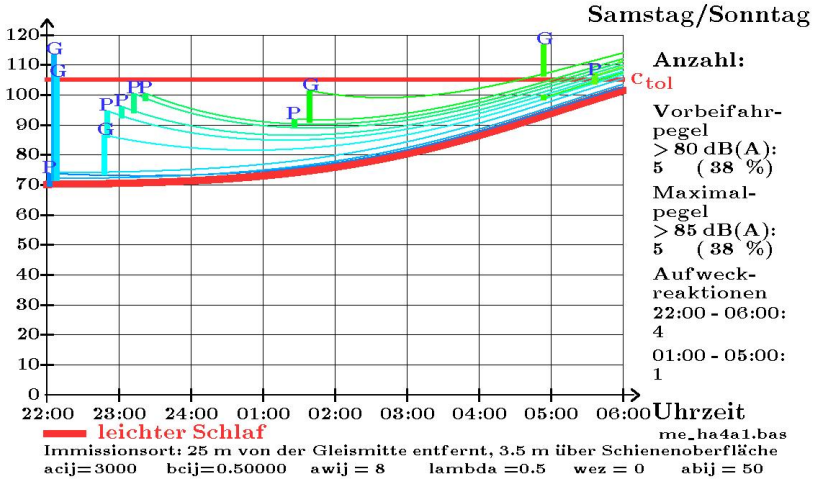
Ursache (Sa/So)



Wirkung (Sa/So, mittlerer Schlaf



Wirkung (Sa/So, tiefer Schlaf)



Wirkung (Sa/So, leichter Schlaf)

Im Folgenden werden 2 Beispiele für die Dosis betrachtet:

- **Szenario A: 8 Güterzüge zwischen 22 und 06 Uhr**
- **Szenario B: 8 Güterzüge zwischen 22 und 23 Uhr sowie zwischen 05 und 06 Uhr - und**

jeweils in optimalen zeitlichen Abständen.

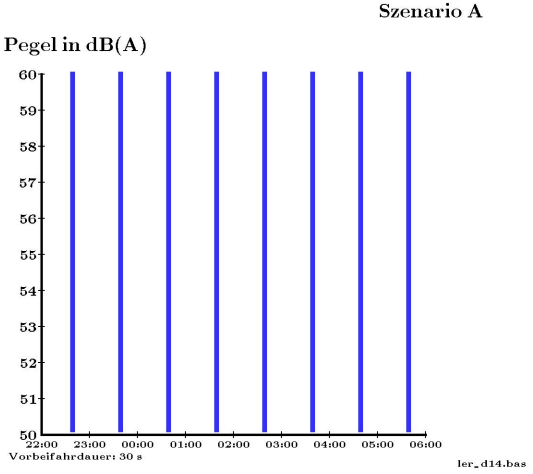


Bild 2.4: **Szenario A**

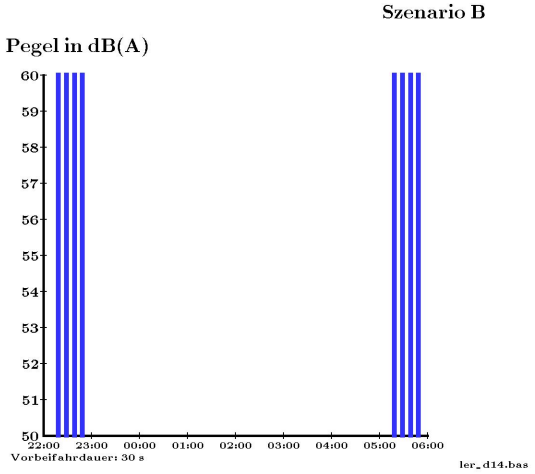


Bild 2.5: **Szenario B**

Abhängigkeit von der Schlafgewohnheit: Anstieg-Faktor $a_{cij} = 87$:

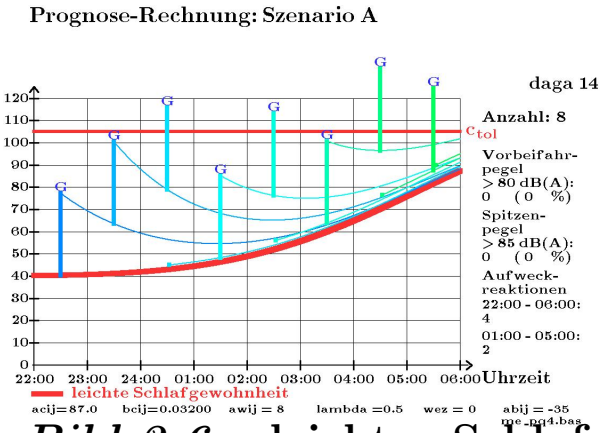


Bild 2.6a: **leichter Schlaf**

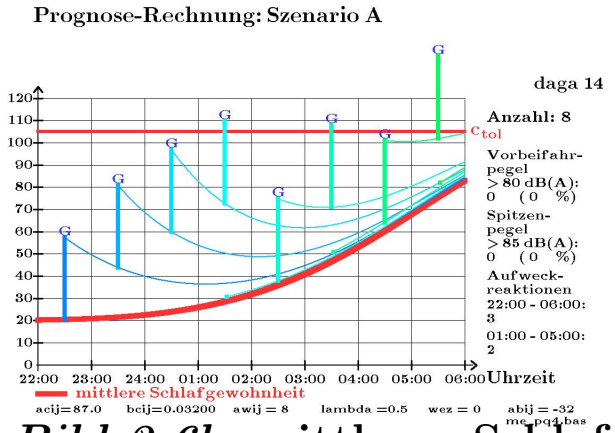


Bild 2.6b: **mittlerer Schlaf**

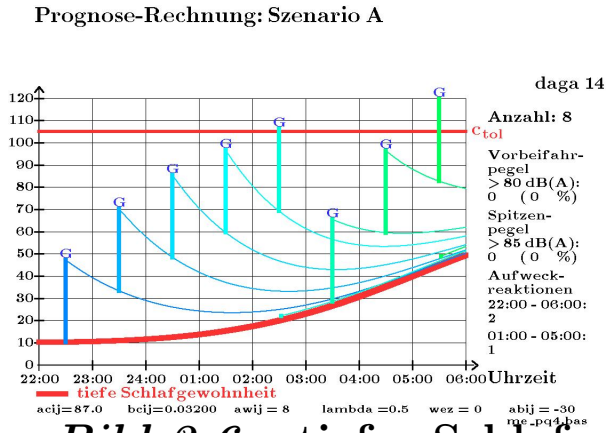


Bild 2.6c: **tiefer Schlaf**

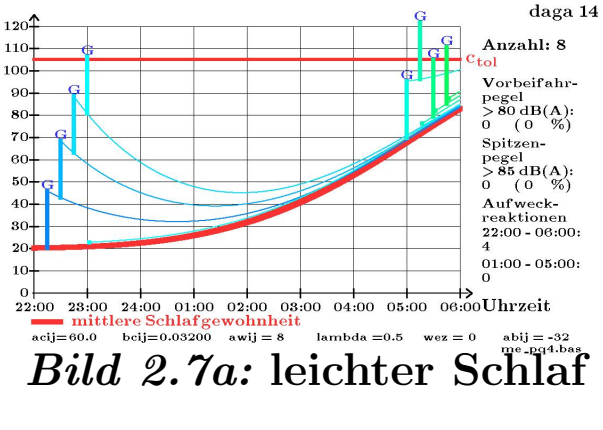


Bild 2.7a: **leichter Schlaf**

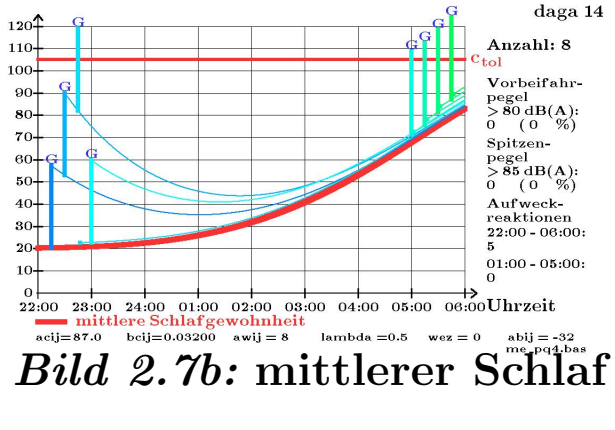


Bild 2.7b: **mittlerer Schlaf**

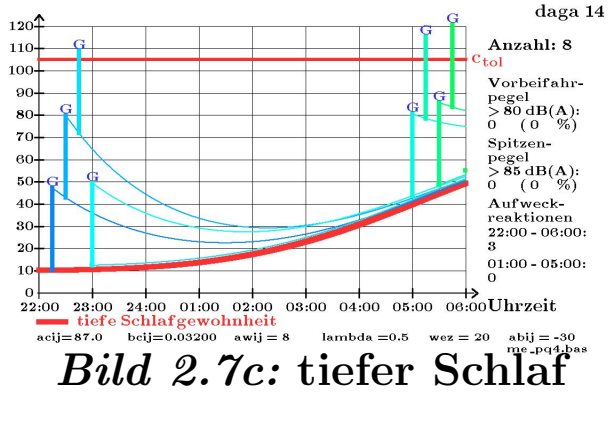


Bild 2.7c: **tiefer Schlaf**

Anzahl Aufweckreaktionen bei Anstiegsfaktor $a_{cij} = 87$

	leichter Schlaf	mittlerer Schlaf	tieferer Schlaf
Szenario A	4	3	3
Szenario B	6	5	3

Abhängigkeit von der Schlafgewohnheit mit $a_{cij} = 60$:

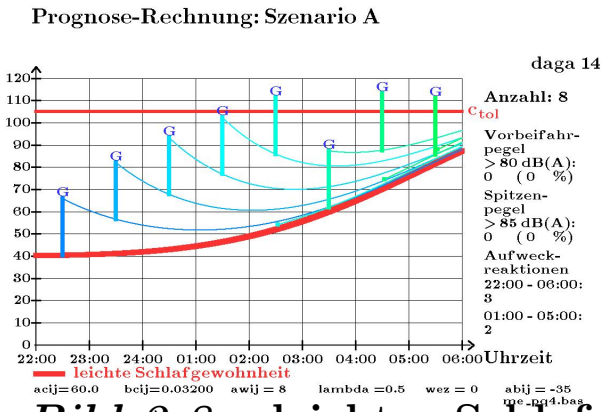


Bild 2.8a: **leichter Schlaf**

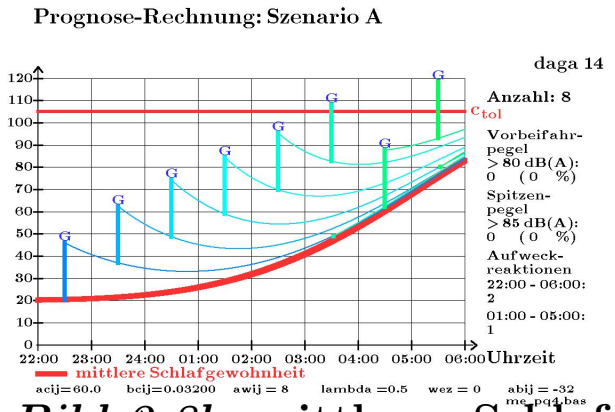


Bild 2.8b: **mittlerer Schlaf**

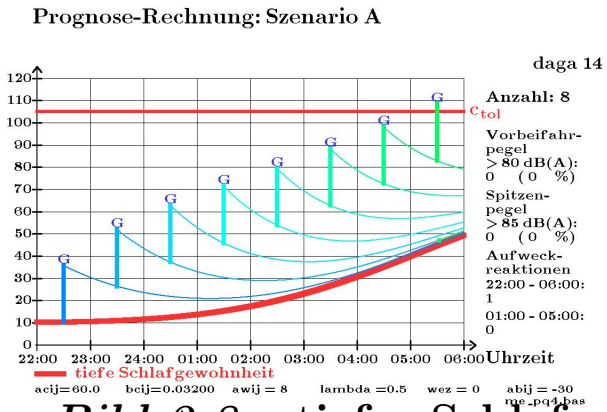


Bild 2.8c: **tiefer Schlaf**

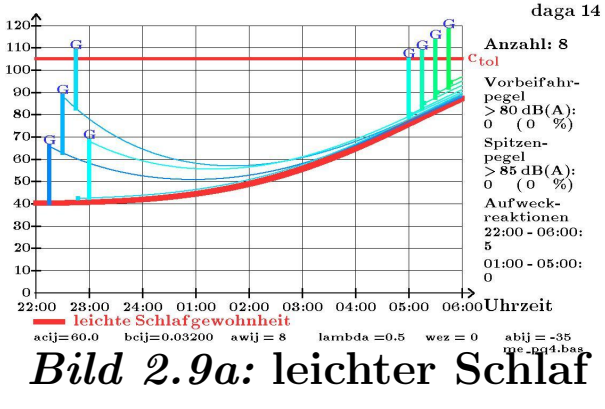


Bild 2.9a: **leichter Schlaf**

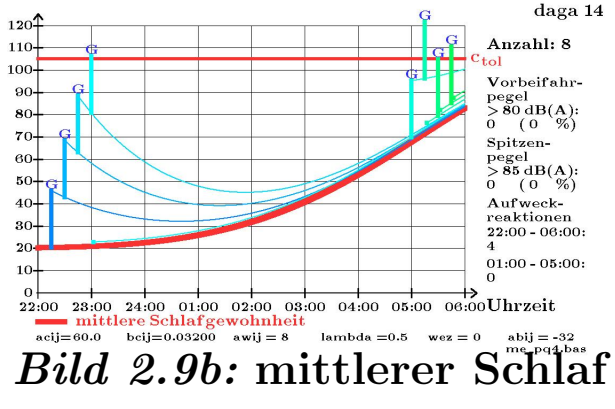


Bild 2.9b: **mittlerer Schlaf**

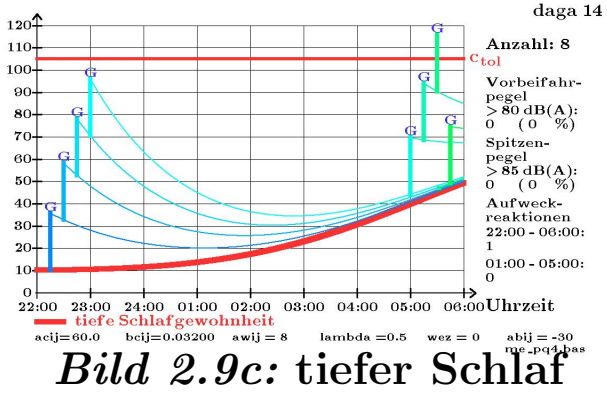


Bild 2.9c: **tiefer Schlaf**

Anzahl Aufweckreaktionen bei Anstiegsfaktor $a_{cij} = 60$

	leichter Schlaf	mittlerer Schlaf	tiefer Schlaf
Szenario A	3	2	1
Szenario B	5	4	1

Bei Variation der Anstiegfaktoren zwischen $a_{cij} = 60$ und $a_{cij} = 87$ ist die Aufweckwahrscheinlichkeit bei Szenario B stets höher als in Szenario A (unabhängig von der Tiefe des Schlafes)

Entspricht dieses Ergebnis den Labor-Studien oder medizinischen Theorien?

Der „Anstiegsfaktor“ beschreibt die Änderung des Schlafstadiums infolge einer Güterzugvorbeifahrt.
Dieser Faktor kann durch einen „Anstiegs-Exponent“ verstärkt oder verringert werden.

Ein „Abklingfaktor“ beschreibt die Geschwindigkeit, mit der eine Erhöhung des Schlafstadiums infolge eines Aufweckens wieder der Schlafkurve nähert.

Infolge eines Aufweckens (d.h. einer Überschreitung eines „Toleranzlevels“) wird die Schlafkurve um einen „Aufweck-Betrag“ erhöht.

In diesem Vortrag wurde davon ausgegangen, dass nächtliche Aufweckreaktionen nicht von dem Nacht-Mittelungspegel abhängig sind, sondern von jedem einzelnen vorbeifahrenden (Güter-)zug, der durch die Uhrzeit der Vorbeifahrt (eigentlich in Abhängigkeit von der Einschlafzeit), seinen mittleren Vorbeifahrpegel und seiner Vorbeifahrzeit beschrieben wird.

Bisher bleibt dabei unberücksichtigt, wie stark die Lärmbelastung während des Tages (06 - 18 Uhr) und des Abends (18 - 22 Uhr) vor der hier betrachteten Nacht beeinflusst wird.

Vielleicht beginnt für einige Schläfer die Nacht aber erst um 23:00 Uhr??

Literatur

[1] **Von der Emission bis zur Wirkung.**
Lärmbekämpfung 2014, 20-28

[2] **Prognose zu nächtlichem Verkehrslärm.**
URL: `http://www.windelberg.de/agq/pdf/daga14_v4.pdf`