Wirkt (Verkehrs-)Lärm auf Schlaf belebend?

Dirk Windelberg

Mathematik, Universität Hannover, Deutschland, Email: windelberg@math.uni-hannover.de

1. Einleitung

Schlaf ist zwar ein allgemein bekannter Zustand, aber es gibt keine allgemeine Definition für den Schlaf. Führt (Verkehrs-)Lärm zu Aufwachreaktionen, so wird Schlaf „gestört“?

Aber gibt es auch Aufwachreaktionen, bei denen Schlaf nicht „gestört“ wird? Ist eine Aufwachreaktion dann „belebend“?

Hier werden zwei verschiedene Ansichten zur Beschreibung von Schlaf angegeben:

In der **Medizin** ist das Individuum der Mittelpunkt jeder Betrachtung. Bei Versuchen, allgemeine medizinische Regeln z.B. für den Schlaf vieler Menschen aufzustellen, gibt fast nur Sonderfälle: Einige Versuchspersonen glauben, dass sie eine Nacht ohne Unterbrechung „durchgeschlafen“ haben, während andere glauben, aus verschiedenen Gründen sehr unruhig geschlafen zu haben.

Um diese und mögliche andere Ereignisse individuell zu berücksichtigen, wird für jede Versuchsperson und für jede Nacht jeweils ein Hypnogramm erstellt. Zusätzlich werden die Zeiten und die Pegel von Überflügen registriert; daher lässt sich erkennen, ob eine Aufwachreaktion durch einen Überflug verursacht wurde.

In der **Mathematik** wird eine allgemeine Beschreibung des ungestörten Schlafes mit Hilfe einer „Kurve der mittleren Aufwachwahrscheinlichkeit“ sowie ihrer „Toleranzbereiche“ (für „leichten“ und für „tiefen“ Schlaf) angegeben. Wenn bekannt ist, zu welcher Zeit und mit welchem Pegel ein Überflug stattfand, kann berechnet werden, um welchen Betrag die Aufwachwahrscheinlichkeit zu diesem Zeitpunkt erhöht wurde.
Durch einen Überflug wird entweder ein Aufwachen verursacht - oder die Aufwachwahrscheinlichkeit wird erhöht. In beiden Fällen ändert sich die Kurve der Aufwachwahrscheinlichkeit.

In diesem Vortrag werden sowohl für die medizinische als auch für die mathematische Schlafbeschreibung die drei folgenden Szenarien betrachtet:

- **S** 8 Überflüge im Stundentakt
  je Stunde: 12 s mit 77 dB(A), sonst 38 dB(A)
- **R** 4 Überflüge (22 - 23 Uhr) + 4 Überfl”ge (5 - 6 Uhr)
  $4 \cdot 12\,s$ mit je 77 dB(A): 58.5 dB(A)
- **E** keine Überflüge zwischen 22 und 06 Uhr
  bf ungestörter Schlaf

Wie der Autor auf der DAGA 2015 vorstellte, lassen sich die Treppenfunktionen „Hypnogramm“ mathematisch durch stetige „Schlafkurven“ für leichten, mittleren und tiefen Schlaf beschreiben (siehe *Bild 1*):

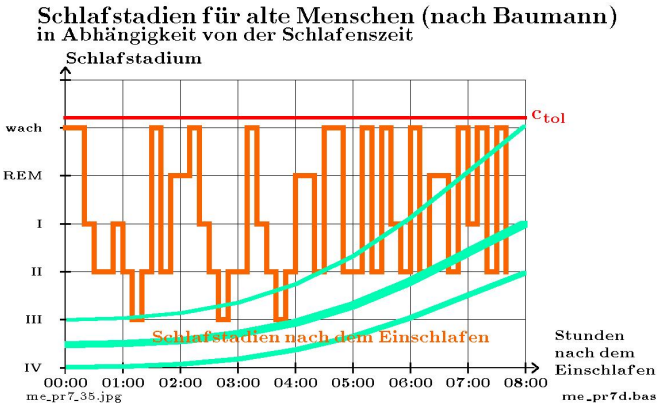


Bild 1: Hypnogramm und Schlafkurven

2 Pegeladdition

Es sollen 3 Modellnächte S (Stundenpegel), R (Ruhezeit) und E betrachtet werden:

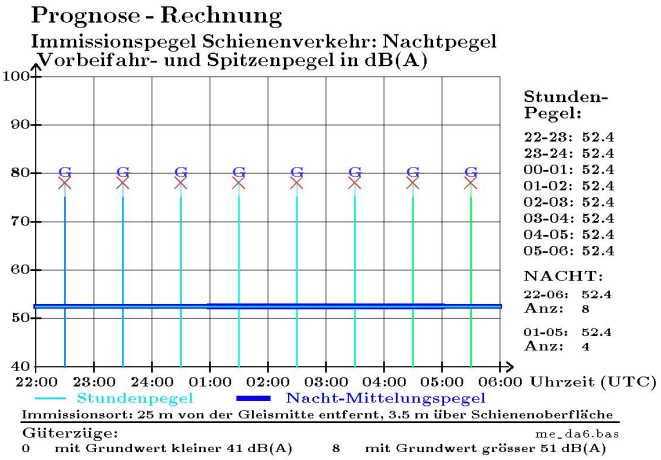


Bild 2a: **S**: 8 Überflüge im Stundentakt

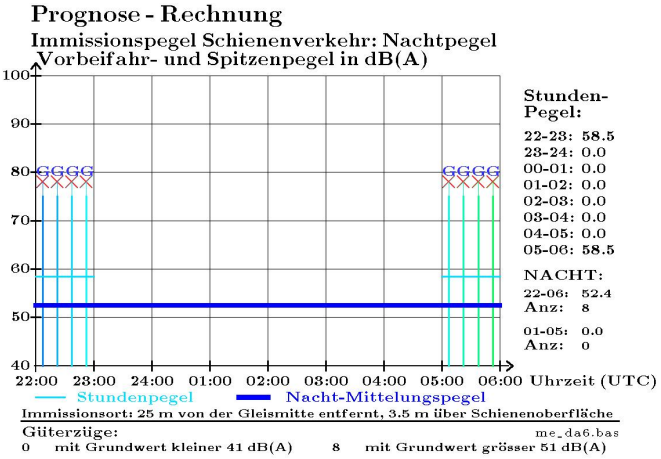


Bild 2b: **R**: 4 Überflüge von 22-23 Uhr
und 4 Überflüge von 05-06 Uhr

Der Nacht-Mittelungspegel ist bei den Nächten S und R gleich.

3 Wirkung nächtlichen Fluglärms

Die **Wirkung** dieser 8 Überflüge auf einen Schlafenden ist jedoch von vielen Parametern abhängig, z.B. der Tätigkeit am Tage und am Abend, der Zeit nach dem Einschlafen und seiner jeweiligen Schlaf„tiefe“ abhängig. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Schlaftiefe während des gesamten Schlafes gleich bleibt. Daher wird die **Aufwachwahrscheinlichkeit** in Abhängigkeit von 8 Stunden während des Schlafes für drei verschiedene Schlafgewohnheiten (leicht, mittel und tief) modelliert:

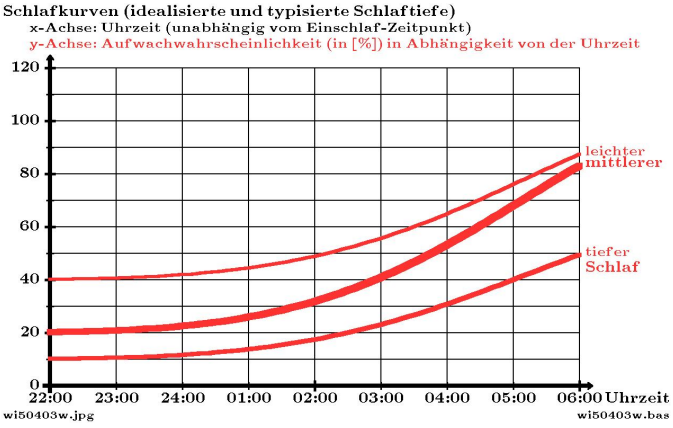


Bild 3: Aufwachwahrscheinlichkeit
mit Toleranzgrenzen (zwischen „tief“ und „leicht“)
bei ungestörtem Schlaf

Schlafstörungen führen zu Erhöhungen der Aufwachwahrscheinlichkeit.

Es gibt allgemeine (mathematische) Verfahren, um die Erhöhung der Aufwachwahrscheinlichkeit infolge nächtlicher Störungen in Abhängigkeit von Uhrzeit, Pegel und Dauer der Störung zu berechnen. Diese werden im Folgenden angewandt, um jeweils für mittlere Schlafgewohnheit die Wirkungen der drei verschiedenen Szenarien auf den Schlaf miteinander vergleichen zu können.

4 Ursache und Wirkung bei Verkehrslärm

Folgende Parameter beschreiben die **Ursache**:

U1 Zeitpunkt **U2** mittlerer Pegel
U3 maximaler Pegel **U4** zeitliche Dauer

und folgende Parameter beschreiben die **Wirkung** von Lärm auf einen schlafenden Menschen:

W1 Zeitpunkt nach dem Einschlafen
W2 Schlaftiefe unter verschiedenen Schlafgewohnheiten
W3 Aufwachwahrscheinlichkeit (abhängig von vorangehenden Schlafstörungen

Dadurch ergibt sich für **Szeanrio S**:

Ursache → Wirkung

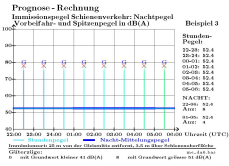
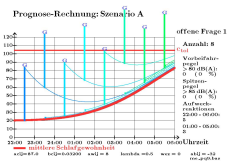


Bild 4



Ergebnis Szenario S: Aufwachreaktionen um
23:30, 01:30, 03:30, 04:30, 05:30

Entsprechend ergibt sich für **Szenario R**:

Ursache → Wirkung

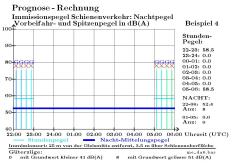
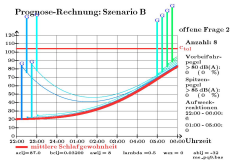


Bild 5



Ergebnis Szenario R: Aufwachreaktionen um
22:30, 23:00, 05:00, 05:15, 05:30, 05:45

5 Auswertung

Die modellierten Szenarien S (Bild 4) und R (Bild 5) beschreiben Fluglärm und seine Wirkungen auf den Schlaf im Flughafenumfeld für 8 Überflüge.

Natürlich wurden zur Bestimmung der Wirkung sowohl für die Ursache als auch für die Wirkung jeweils Annahmen verwendet:

Dazu war es notwendig,

- ein Szenario für die Ursache durch Uhrzeit und Pegel zu definieren
- eine „Schlafkurve“ für die Wirkung
  a) ohne Störungen durch Fluglärm
  b) für die durch Fluglärm hervorgerufenen Änderungen (in Abhängigkeit von jeweiliger Uhrzeit, den Pegelhöhen in Dauer und Stärke)

für verschiedene Schlafgewohnheiten (mittel, leicht und tief) festzulegen.

Diese Festlegungen sind Annahmen. Sie sind formulierbar und können jeweils überprüft und geändert werden.

Die Bilder zeigen die Aufwachreaktionen für eine „mittlere“ Schlafkurve; bei anderen Schlafgewohnheiten ändert sich auch die Anzahl Aufwachreaktionen:

Die obigen Bilder 4 und 5 zeigen:

Zeit	**Szenario S**			**Szenario R**		
	tief	mittel	leicht	tief	mittel	leicht
22-23	0	0	0	1	1	1
23-05	1	2	3	0	0	0
05-06	1	1	1	2	4	3
Nacht	**2**	**3**	**4**	**3**	**5**	**4**

Tabelle 1

Es gibt also mehr Aufweckreaktionn im Szenario R als im Szenarion S, aber in der Zeit zwischen 23 und 05 Uhr ist es im Szenario R ruhig.

In einer weiteren oder anderen Nacht wird sich eine andere Tabelle ergeben. Falls dann etwa die gleiche Verteilung an Fluglärm und etwa die gleiche Schlafsituation auftraten, wäre es vielleicht möglich, für diese Versuchsperson eine „mittlere Schlafqualität“ anzugeben.

Eine andere Versuchsperson wird vermutlich andere Schlafgewohnheiten haben und entsprechend auch anders reagieren:

Zeit	**Szenario S**			**Szenario R**		
	tief	mittel	leicht	tief	mittel	leicht
22-23	0	1	0	1	1	1
23-05	1	3	3	0	0	0
05-06	1	2	1	2	4	3
Nacht	**2**	**6**	**4**	**3**	**5**	**4**

Tabelle 2

Versuch einer Auswertung:

Vorteile:

VS: in der gesamten Nachtzeit bei tiefem Schlaf nur 2 Aufweckreaktionen.
VR: Kein Fluglärm in der Zeit zwischen 23 und 05 Uhr.

Nachteile:

NS: in der gesamten Nachtzeit gibt es bei mittlerem Schlaf die meisten Aufweckreaktionen.

NR: Bereits beim Einschlafen zwischen 22 und 23 Uhr wird die Ruhe gestört.

Um **allgemeingültige** Lösungen zu finden, wäre es notwendig, entsprechende Tabellen über Aufwachreaktionen von vielen Nächten und von vielen Versuchspersonen miteinander statistisch zu vergleichen.

6 Schlaf (nach NORAH-Studie)

In der NORAH-Studie wurde Schlaf jedoch nicht in der oben angegebenen Weise bewertet: Es wurde keine Modellierung der Ursache (keine Störung, Störung nur zwischen 22 und 23 Uhr oder 05 und 06 Uhr, je eine Störung pro Stunde zwischen 22 und 06 Uhr) vorgenommen, und es wurde die Wirkung nicht für verschiedene Schlafgewohnheiten modelliert, sondern es wurde der Schlaf einzelner Versuchspersonen im Flughafenumfeld individuell kontinuierlich zwischen 22 und 06 Uhr medizinisch überwacht und dokumentiert - und dann wurde untersucht, ob eine der gemessenen Aufwachreaktionen mit dem Überflug eines Flugzeuges korrelierte.

6.1 Polysomnografie

Nach dem Verfahren „Polysomnografie“ werden an 6 Stellen am Kopf einer im Flughafenumfeld schlafenden Versuchsperson für 8 Nachtstunden in Schritten von jeweils 30 Sekunden EEG-Messungen durchgeführt. Dadurch entstehen 960 „Schlaf-EEGs“, die für jeweils 30 Sekunden sämtliche EEG-Belebungen/Aktivierungen in Form von Frequenzbeschleunigungen beschreiben:

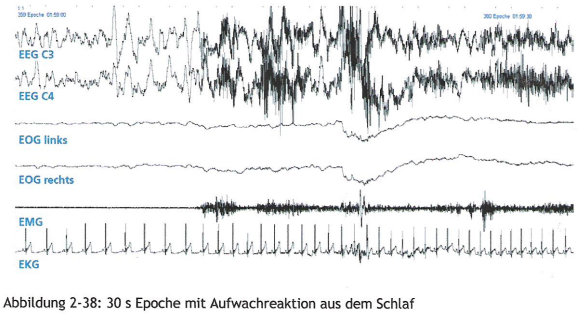


Bild 6: Polysomnografie einer Versuchsperson

Zunächst sind diese 6 Kurven,
die 30 Sekunden des Schlafes beschreiben, einem der 6 Schlafstadien zuzuordnen:

Wach - REM - S1 - S2 - S3 - S4(=Tiefschlaf)

zuzuordnen.

Für jede Versuchsperson und für jede Nacht gibt es damit bei 8 Stunden Schlaf 960 Aufzeichnungen der Art von *Bild 6*. Diese werden nach „Kriterien zur Schlafauswertung nach *Rechtschaffen et al.*“ bewertet, die dazu als „technische Minimalanforderung für die Schlafpolygraphie“ die Empfehlung geben, dass „die Papiergeschwindigkeit nicht unter $10\,mm/sec$“ zu wählen ist. - Daher müsste es bei diesem Verfahren

- für jede Versuchsperson und für jede Nacht

einen durch 6 Kurven beschriebenen Papierstreifen von mindestens 288 Metern Länge geben.

6.2 Hypnogramm

Jede der 960 Aufzeichnungen der 6 EEG-Kurven für jeweils 30 Sekunden wird in der NORAH-Studie von einem „geschulten Auswerter“ zu einem **Hypnogramm** dieser Versuchsperson und dieser Nacht ausgewertet, indem diesen 6 Kurven der Polysomnografie genau eine der 6 Schlafstadien

Wach - REM - S1 - S2 - S3 - S4(=Tiefschlaf)

zugeordnet wird[1]).

Als Ergebnis derartiger Zuordnungen entsteht dann ein **Hypnogramm**:

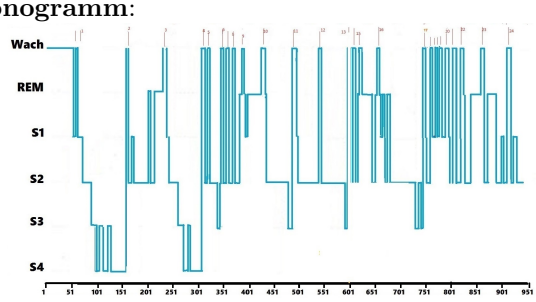


Bild 7: Hypnogramm eines **ungestörten** Schlafes[2]):
24 **spontane** Aufwachreaktionen
bei einem 8-stündigen Schlaf

7 Verallgemeinerungen

Das Ergebnis eines Schlafes einer Versuchsperson während einer Nacht im Flughafenumfeld wird in der NORAH-Studie durch ein Hypnogramm beschrieben. Wenn die Versuchsperson eine weitere Nacht an diesem Ort schläft, entsteht die Frage, ob das Hypnogramm der zweiten Nacht mit dem der ersten Nacht „übereinstimmt“.

7.1 Mittelwertbildung

Hypnogramme erlauben keine Mittelwertbildung:

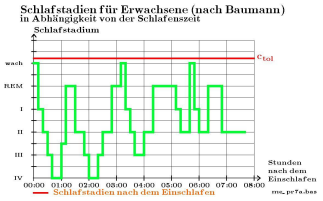


Bild 8: Hypnogramm 8

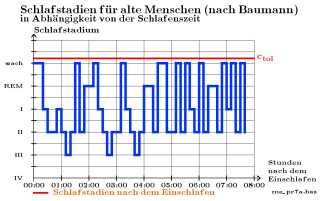


Bild 9: Hypnogramm 9

Wie könnte man einen „Mittelwert“ dieser beiden Hypnogramme definieren? Insbesondere die Bestimmung der Anzahl Aufwachreaktionen bereitet Schwierigkeiten!?

[1]) Medizin-Gutachter sind der Überzeugung, dass ein „geschulter Auswerter“ aus einem Polysomnografie-Bild eindeutig jeweils eines der 6 Schlafstadien bestimmen kann - die Eindeutigkeit dieser Zuordnung
ist jedoch mathematisch nicht nachvollziehbar.

[2] Abbildung 2-36 aus NORAH-Endbericht, Seite 72

7.2 „Mittelwertbildung“ zweier Hypnogramme

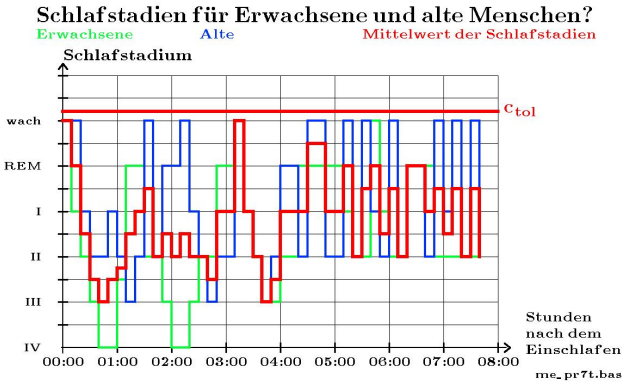


Bild 10: Mittelwert von Bild 8 und 9

Der Mittelwert der beiden Hypnogramme 8 und 9 enthält nur noch **eine** Aufwachreaktion!
Das entspricht **nicht** der erwarteten Mittelwertbildung, denn Hypnogramm 9 enthält bereits 10 Aufwachreaktionen.

7.3 Toleranzbereich

In *Bild 11* wurde um die Treppenfunktion von *Bild 7* ein Toleranzband von $\pm 60\,sec$ gelegt: Dadurch sind aber Aufwachreaktionen nicht mehr erkennbar: es können sowohl mehr als auch wenioger sein:

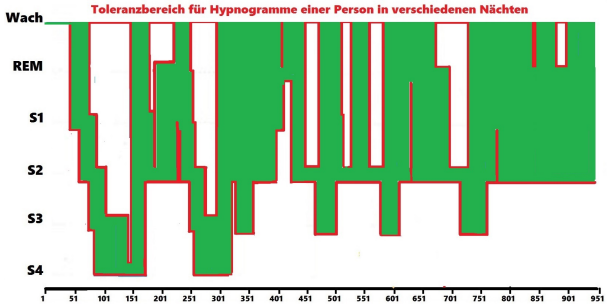


Bild 11: Toleranzbereich zu Bild 7

8 Anwendbarkeit

8.1 Medizinische Modellierung

Die in der NORAH-Studie beschriebenen medizinischen Aufwachreaktionen sind **individuelle** Parameter. Sie lassen sich damit weder auf andere Personen noch auf andere Szenarien übertragen.:

Es sei H das Hypnogramm einer Versuchsperson V bei ungestörtem Schlaf in einer Nacht N.
Es ist unwahrscheinlich,

U1 dass die Versuchsperson V bei ungestörtem Schlaf **in einer anderen Nacht** $N1$ wieder das Hypnogramm H der Nacht N aufweist.

U2 dass **eine andere Versuchsperson** während der Nacht N (bei ungestörtem Schlaf) auch das Hypnogramm H aufweist.

U3 dass **eine andere Versuchsperson** während der Nacht $N1$ (bei ungestörtem Schlaf) auch das Hypnogramm H aufweist.

8.2 Mathematische Modellierung

Auch die mathematische Beschreibung des Schlafes durch die hier exemplarisch konstruierten Kurven der Aufwachwahrscheinlichkeit (*Bild 3*) ist nicht unproblematisch:

Zunächst sind die „Schlafkurven“ den heutigen schlafmedizinischen Erkenntnissen anzupassen:
Neben einer

*(**stetigen**) Kurve der*
mittleren Aufwachwahrscheinlichkeit
in Abhängigkeit von der Zeit
nach dem Einschlafen

ist es notwendig, deren

Toleranzgrenzen
z.B. für „leichten“ und „tiefen“ Schlaf

zu beschreiben, so dass 50% der individuellen Abweichungen von der mittleren Aufwachwahrscheinlichkeit durch diese Kurven beschrieben werden können.

Erst mit der Kenntnis dieser Kurven ist es möglich, Bilder von der Art *Bild 4* und *Bild 5* zu berechnen.

und daraus abzulesen vor jedem Schlaf unbekannt und für jede Nacht anders.

8.3 Allgemeine Bemerkungen

Auch die hier im 2. Kapitel (Pegeladdition) angegebenen Modellierungen sind nur ein Versuch, die Wirkungen der Szenarien **S**, **R** (und **E**) auf einen möglichst eindeutig definierten Schlaf miteinander zu vergleichen.

Dabei entstanden vielleicht mehr Fragen als Antworten:

F1 Was ist „Schlaf“?

F2 Was ist eine „Aufwachreaktion“?
Unterscheidet sich eine durch körpereigene Reaktionen verursachte Aufwachreaktion von einer durch äußere Einflüsse verursachten Aufwachreaktion?

F3 Was ist „ungestörter Schlaf“?
Werden Aufwachreaktionen ohne erkennbare „äußeren Störungen“„spontan“ genannt?

F4 Ist ein Schlafender „aufgewacht“, auch wenn er nach einer gemessenen Aufwachreaktion dies weder merkt noch erinnert?

F5 Könnte sich eine Versuchsperson an eine Aufwachreaktion erinnern, wenn diese durch einen Überflug (oder allgemein durch Fluglärm) verursacht wurde?

F6 Wie sollte „gesunder Schlaf“ definiert und beschrieben werden?

F7 Welche Parameter beschreiben die „Startsituation“ beim Einschlafen?

F8 Es gibt Menschen, die (selten oder auch oft) in einer sehr „lauten“ Umgebung schlafen und aufwachen. - Wirken Flug- oder Schienenverkehrslärm anders, weil sie nur „kurz“ wirken?

F9 Kann die im Wachzustand erklärte persönliche Einstellung zu (Verkehrs-)Lärm Aufwachreaktionen im Schlafzustand beeinflussen?

Literatur:
NORAH_Bd4_M2-Schlaf_Endbericht.pdf