

Dirk Windelberg

Schieneverkehrslärm gestern und heute

Vortrag am 20. Oktober 2016 in Hamminkeln

D. Windelberg

AG Qualität

Mathematik

Leibniz Universität Hannover

Sieben Nächte einer Woche an der Bahn

Haminkeln

1. Einleitung

2 Übersicht

3 Ursache: Schienenverkehrslärm

4 Wirkung: medizinisch

5 Wirkung: mathematisch

6 Wirkung

1 Einleitung

Seit 2011 wurden an der vom TÜV Nord eingerichteten Messstelle Hamminkeln kontinuierlich sämtliche Zugvorbeifahrten registriert.

Die Daten der nächtlichen Vorbeifahrten jeweils einer exemplarisch ausgewählten Woche eines Jahres werden von der AG Qualität der Universität Hannover ausgewertet und mit den Ergebnissen aus den vorangegangenen Jahren verglichen.

Die Auswertung soll zeigen, ob die nächtlichen Vorbeifahrten an den 7 Tagen einer Woche seit 2011 im Laufe der Jahre leiser werden.

Erklärtes Ziel der Bahn war eine „Halbierung des Lärms“ bis zum Jahr 2020.

Hier werden die Ergebnisse aus den Jahren 2011, 2012 und 2015 vorgestellt.

**Bundesweit gibt es nur hier in Hamminkeln
eine (amtliche) Messstelle,
an der durch Messungen
und nachfolgende (mathematische) Auswertungen
untersucht wird,
ob sich der nächtliche Schienenverkehrslärm
bis zum Jahr 2020 verringert.**

2 Übersicht

Die Messstation Hamminkeln dokumentiert bereits seit 2011 sämtliche Zugvorbeifahrten zwischen Emmerich und Düsseldorf.

In meinem Vortrag werden
die Vorbeifahrpegel
an der Messstelle Hamminkeln
während der 7 Nächte einer Woche (exemplarisch für das Jahr)
aus den Jahren 2011, 2012 und 2015
graphisch dargestellt.

Die Wirkung dieser Vorbeifahrten
auf den Schlaf der Anwohner
wird nach mathematischen Verfahren ausgewertet.

2.1 Ursache:

Vorbeifahrten in den Jahren 2011, 2012 und 2015

Für jeden Tag der ausgewählten Woche werden in jeweils einer Graphik die genauen Vorbeifahrdaten jedes einzelnen Zuges dokumentiert:

- Uhrzeit der Vorbeifahrt,
- Höhe des mittleren und des maximalen Vorbeifahrpegels,
 - Geschwindigkeit,
 - Dauer der Vorbeifahrt
 - Fahrtrichtung.

Diese Parameter sind notwendig, um jede Vorbeifahrt als Ursache einer möglichen Störung des Schlafes erkennen zu können.

2.2 Wirkung auf den Schlaf

In einem weiteren Abschnitt wird die Wirkung der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorbeifahrten auf den Schlaf berechnet:

Für eine mathematisch definierte Kurve der mittleren Aufwachwahrscheinlichkeit wird untersucht, wie hoch bei einer Zugvorbeifahrt die Aufwachwahrscheinlichkeit erhöht wird.

3 Ursache: Schienenverkehrslärm

3.1 Schall 03 und 16. BImSchV

Die „Schall 03“ bzw. die 16. BImSchV beschreibt die jeweils zur Zeit gültigen Berechnungsverfahren für den Schienenverkehr.

Danach wird bis heute der „Pegel“

$$L := L_{W'A,f,h,m,Fz}$$

als „längenbezogene Schalleistung“

- im Oktavband f ,
- im Höhenbereich h ,
- infolge einer Teil-Schallquelle m ,
- für eine Fahrzeugeinheit der Fahrzeug-Kategorie Fz je Stunde berechnet.

Insbesondere die Uhrzeit der Vorbeifahrt bleibt dabei unberücksichtigt.

Nacht-Mittelungspegel der 16. BImSchV

Die energetische Summe der Vorbeifahrpegel
sämtlicher Schienenfahrzeuge,
die während einer Nacht (von 22:00 bis 06:00 Uhr)
an einem bestimmten Ort vorbeifahren,
ist der „NACHT-MITTELUNGSPEGEL.

Für einen Schlafplatz gibt es nach §2 der 16. BImSchV
„zum Schutz der Nachbarschaft“

Grenzwerte für diesen (Tag- und) Nacht-Mittelungspegel.

Ein Anwohner an einem Schienen-Güterverkehrs-Weg
wird nicht vom Nacht-Mittelungspegel,
sondern von einzelnen Güterzug-Vorbeifahrten
geweckt!

Nacht-Mittelungspegel und Schlafqualität

Der Schlaf eines Anwohners an einer Güterzugstrecke wird nicht durch einen mathematisch definierten Mittelungspegel bestimmt, sondern durch die Vorbeifahrten einzelner (Güter-)Züge.

Infolge der unterschiedlichen Ausbreitungswege zwischen dem befahrenen Gleis und dem Bett eines Anwohners ist es daher sinnvoll, an einem definierten Ort in der Nähe der Gleise während einer Nacht (von 22:00 bis 06:00 Uhr) von jedem vorbeifahrenden Schienenfahrzeug

- die Uhrzeiten (in Zeitschritten von 0.5 Sekunden) während der Vorbeifahrt,
- alle (variierenden) Vorbeifahrpegel
- die Geschwindigkeit
- (Fahrtrichtung und Fahrzeugart [Güterzug / Personenzug])

zu messen.

Messungen an den 7 Tagen einer Woche

Es ist nicht einfach zu entscheiden, wie

DER NACHT-MITTELUNGSPEGEL EINER WOCHEN

zu bestimmen ist,

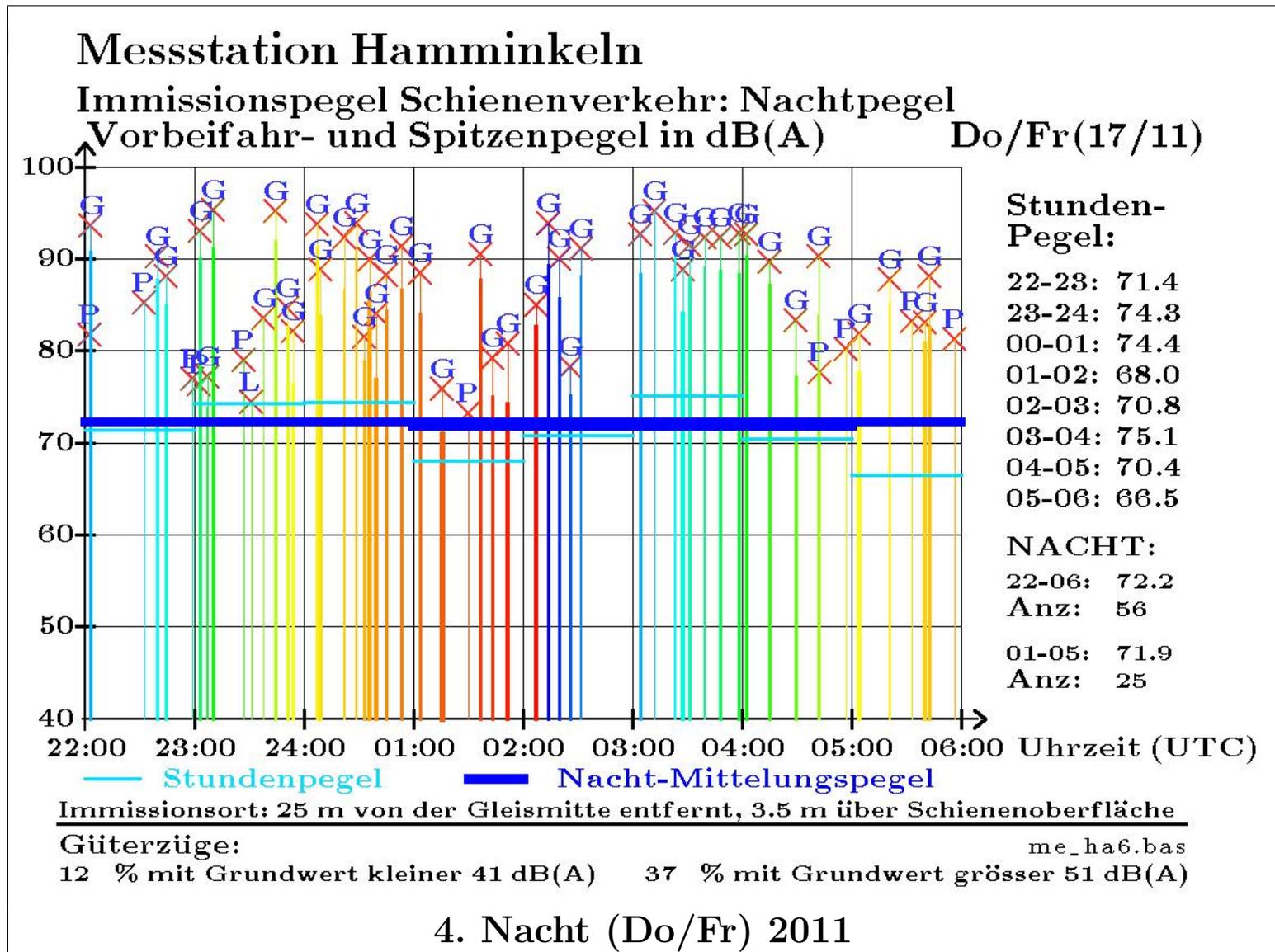
wenn - wie in Hamminkeln - der

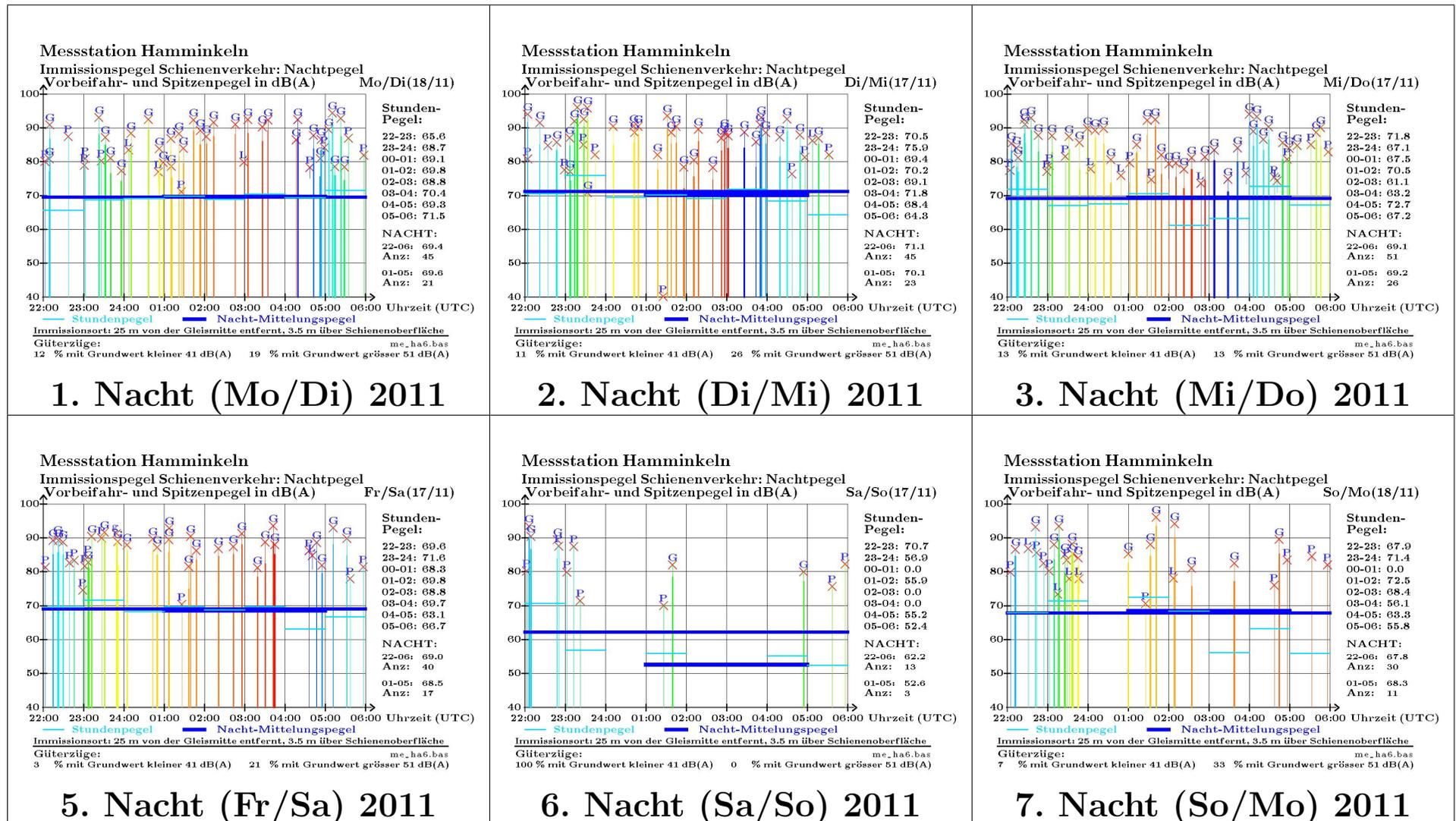
**DER NACHT-MITTELUNGSPEGEL EINES
WOCHENTAGES**

NICHT mit dem

Nacht-Mittelungspegel eines anderen Wochentages
übereinstimmt.

Darstellung der Vorbeifahrten 2011





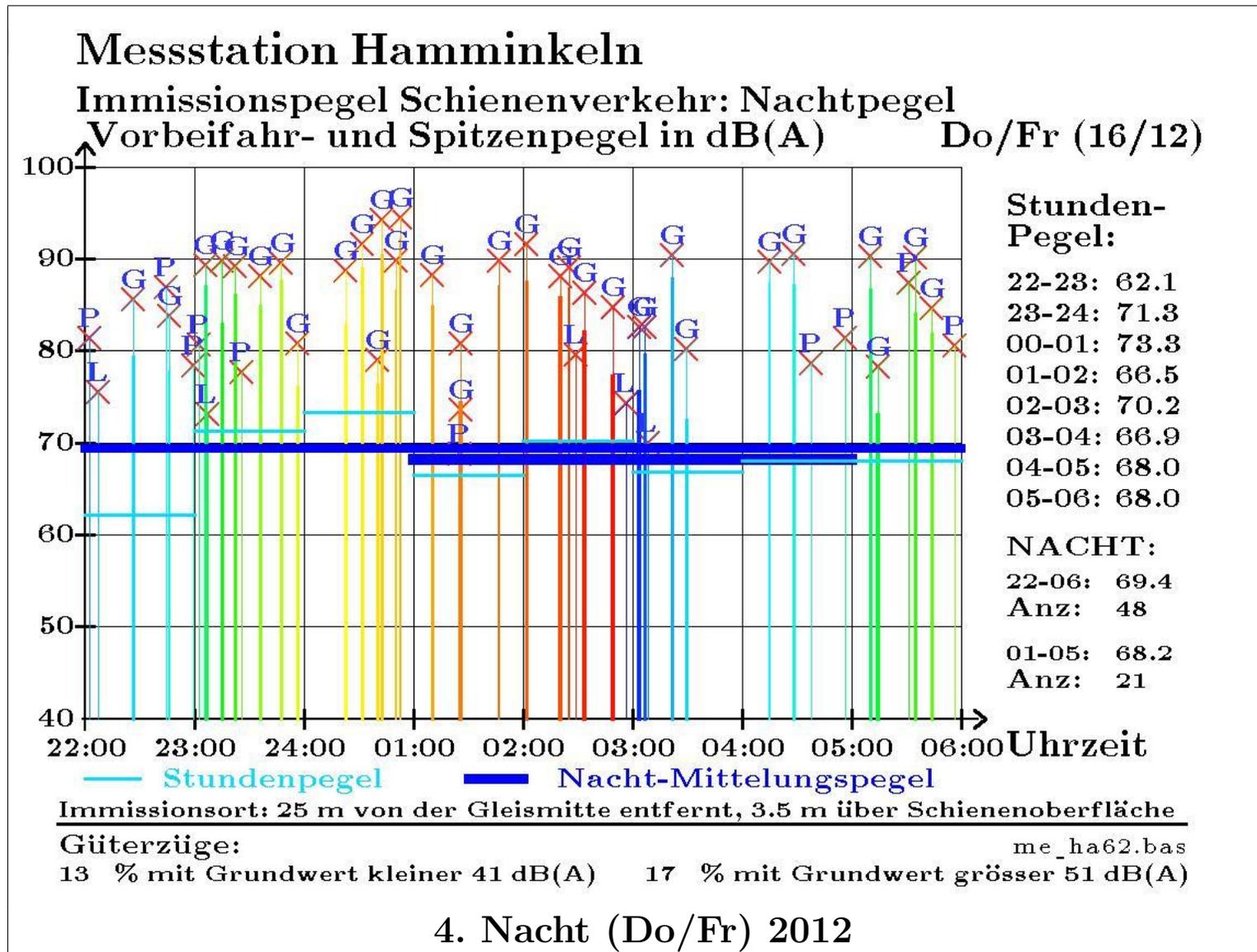
Auswertung der Hamminkeln-Vorbeifahrten 2011

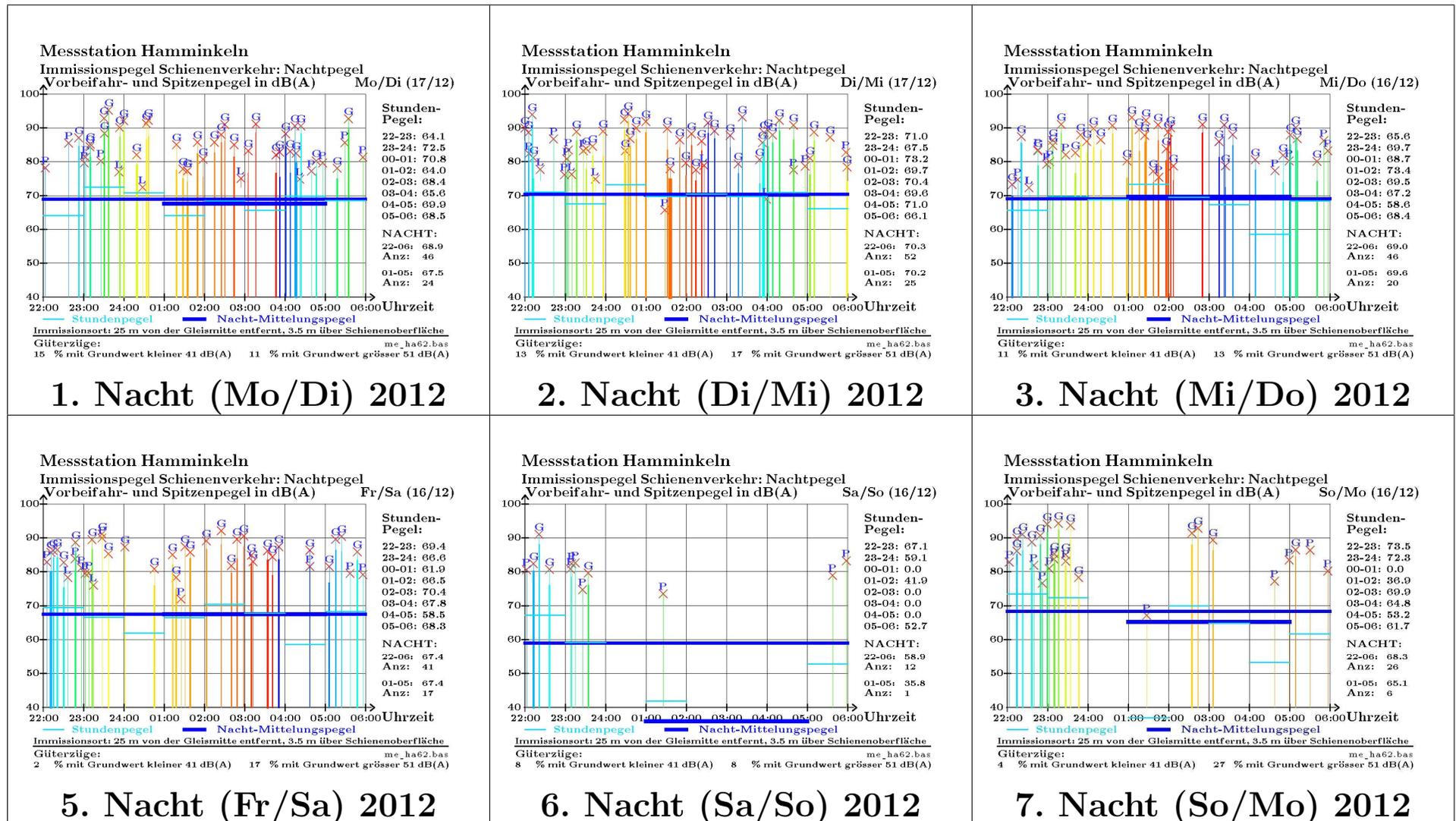
Wochen- tag	Anzahl Vorbeifahrten		Nacht-Mittelungspegel	
	22-06	01-05	22-06	01-05
Mo/Di	48	21	69,4	69,8
Di/Mi	45	23	71,1	70,1
Mi/Do	51	26	69,1	69,2
Do/Fr	56	25	72,2	71,9
Fr/Sa	40	17	69,0	68,5
Sa/So	13	3	62,2	52,6
So/Mo	30	11	67,8	68,3

Bezüglich des Schlafes ist in der hier betrachteten Woche
die Nacht von Donnerstag auf Freitag
die Nacht mit der **höchsten Lärm-Belastung** zwischen 22 und 06 Uhr:
72,2 dB(A) im Jahr 2011.

**Ist die höchste nächtliche Lärm-Belastung
zwischen 22 und 06 Uhr im Jahr 2015
höher oder niedriger?**

Darstellung der Vorbeifahrten 2012





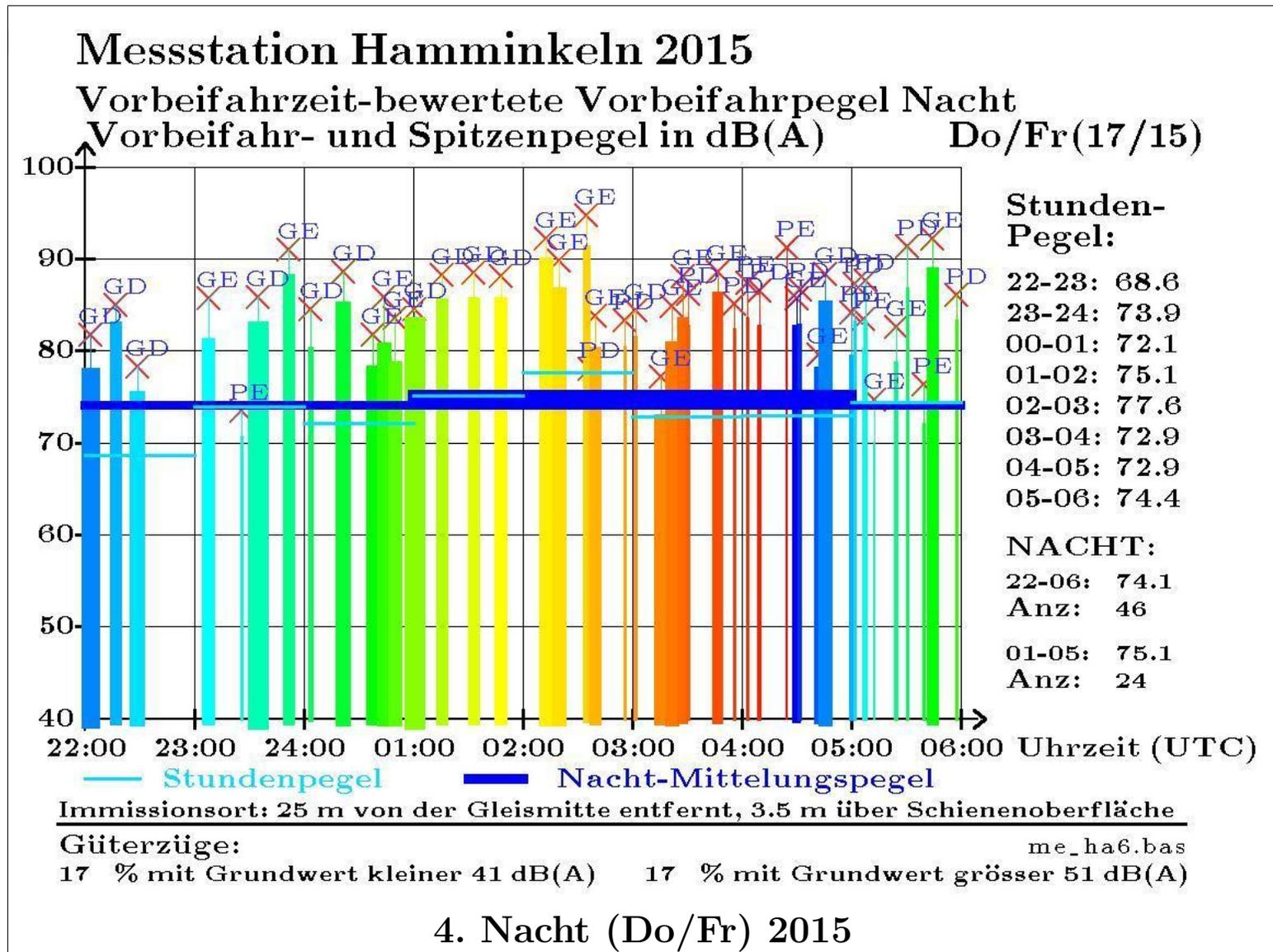
Auswertung der Hamminkeln-Vorbeifahrten 2012

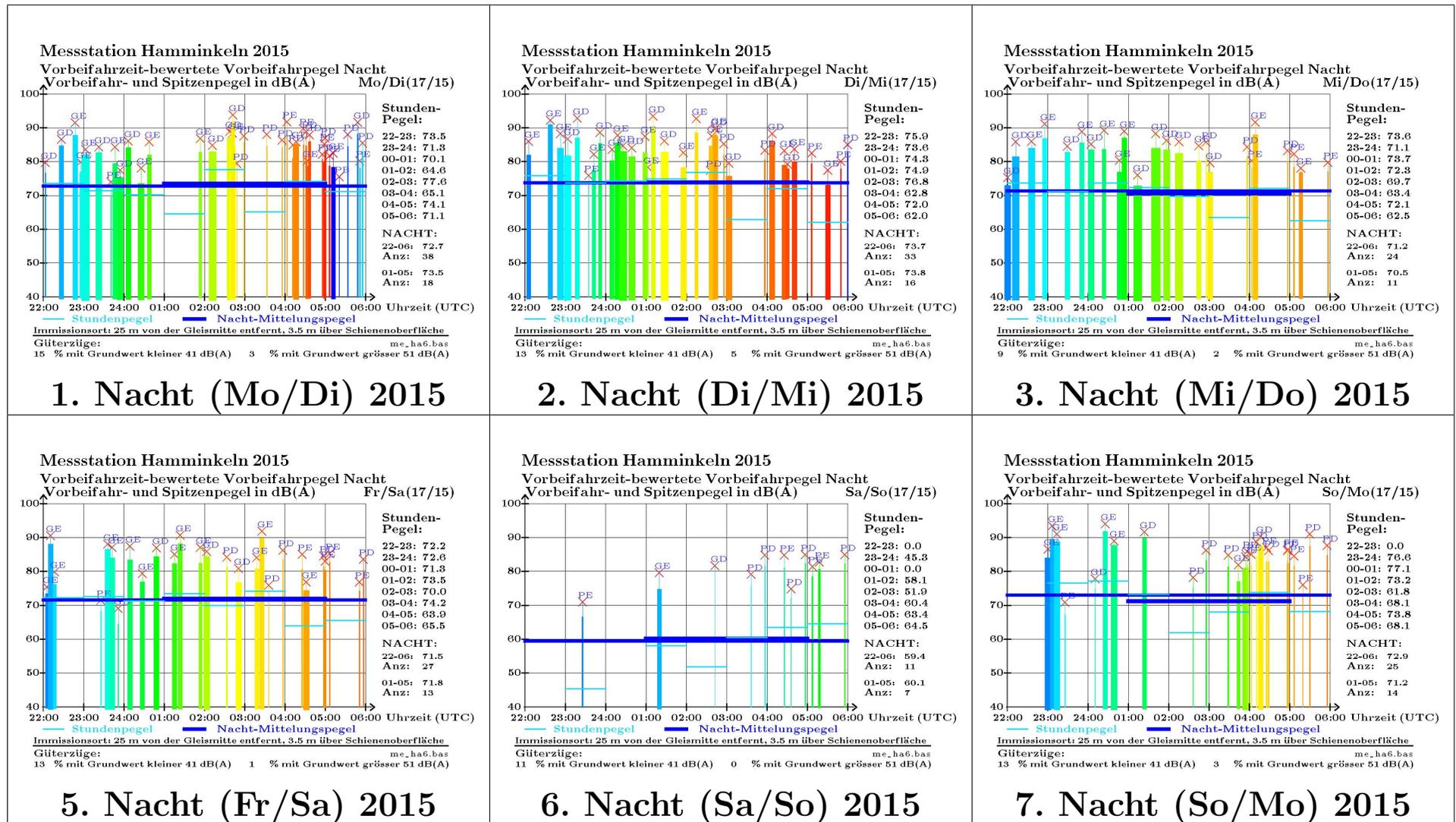
Wochentag	Anzahl Vorbeifahrten		Nacht-Mittelungspegel	
	22-06	01-05	22-06	01-05
Mo/Di	46	24	68,9	67,5
Di/Mi	52	25	70,3	70,2
Mi/Do	46	20	69,0	69,5
Do/Fr	48	21	69,4	68,2
Fr/Sa	41	17	67,4	67,4
Sa/So	12	1	58,9	35,8
So/Mo	36	6	68,3	65,1

Bezüglich des Schlafes ist in der hier betrachteten Woche die Nacht mit der **höchsten Lärm-Belastung** zwischen 22 und 06 Uhr: **70,3 dB(A) im Jahr 2012** (und 72,2 dB(A) in 2011!).

Ist die höchste nächtliche Lärm-Belastung zwischen 22 und 06 Uhr im Jahr 2015 höher oder niedriger als 72,2 dB(A)?

Darstellung der Vorbeifahrten 2015





Auswertung der Hamminkeln-Vorbeifahrten 2015

Wochen- tag	Anzahl Vorbeifahrten		Nacht-Mittelungspegel	
	22-06	01-05	22-06	01-05
Mo/Di	38	18	72,7	73,5
Di/Mi	33	16	73,7	73,8
Mi/Do	24	11	71,2	70,5
Do/Fr	46	24	74,1	75,1
Fr/Sa	27	13	71,5	71,8
Sa/So	11	7	59,4	60,1
So/Mo	25	14	72,9	71,2

Bezüglich des Schlafes ist in der hier betrachteten Woche
die Nacht von Donnerstag auf Freitag
die Nacht mit der **höchsten Lärm-Belastung** zwischen 22 und 06 Uhr:
74,1 dB(A) im Jahr 2015.

Diese Belastung ist höher als im Jahr 2011 mit 72,2 dB(A)!

Mittlere Wochen-Lärm-Belastung zwischen 22 und 06 Uhr:
73,2 dB(A).

Im Jahr 2011 betrug diese Belastung 69,5 dB(A)!

Und nun?

Vorbeifahrten von Schienenfahrzeugen beschreiben wir durch mehrere Parameter.

Aber wie lauten die entsprechenden Parameter für den Schlaf?

Es gibt „Erfahrungswissenschaft“:

„7 stündlich auftretende (Vorbeifahr-)Pegel wirken anders als 7 (Vorbeifahr-)Pegel hintereinander.“

Die Standard-Messstellen für Schienenverkehrslärm liefern insbesondere die Nacht-Mittelungspegel.

Aus den bekannten Ausbreitungsrechnungen kann damit berechnet werden, ob die Grenzwerte der 16. BImSchV am Bett eines Anwohners eingehalten werden - oder nicht.

Falls sie nicht eingehalten werden, ist „guter Rat teuer“.

Und nun?

**Kann aus diesen Informationen abgelesen werden,
wie häufig ein Schlafender infolge vorbeifahrender Züge
aufgeweckt wurde?**

Uns interessiert hier, ob der Schlaf eines Anwohners
infolge einzelner (Güterzug-)vorbeifahrten

„gestört wird“,

d.h. ob eine Vorbeifahrt
zu Aufwachreaktionen führen kann.

4 Wirkung von Schienenverkehrslärm Schlafstörungen

Es wird versucht, die Wirkung von nächtlichem Verkehrslärm auf einen schlafenden Menschen zu beschreiben.

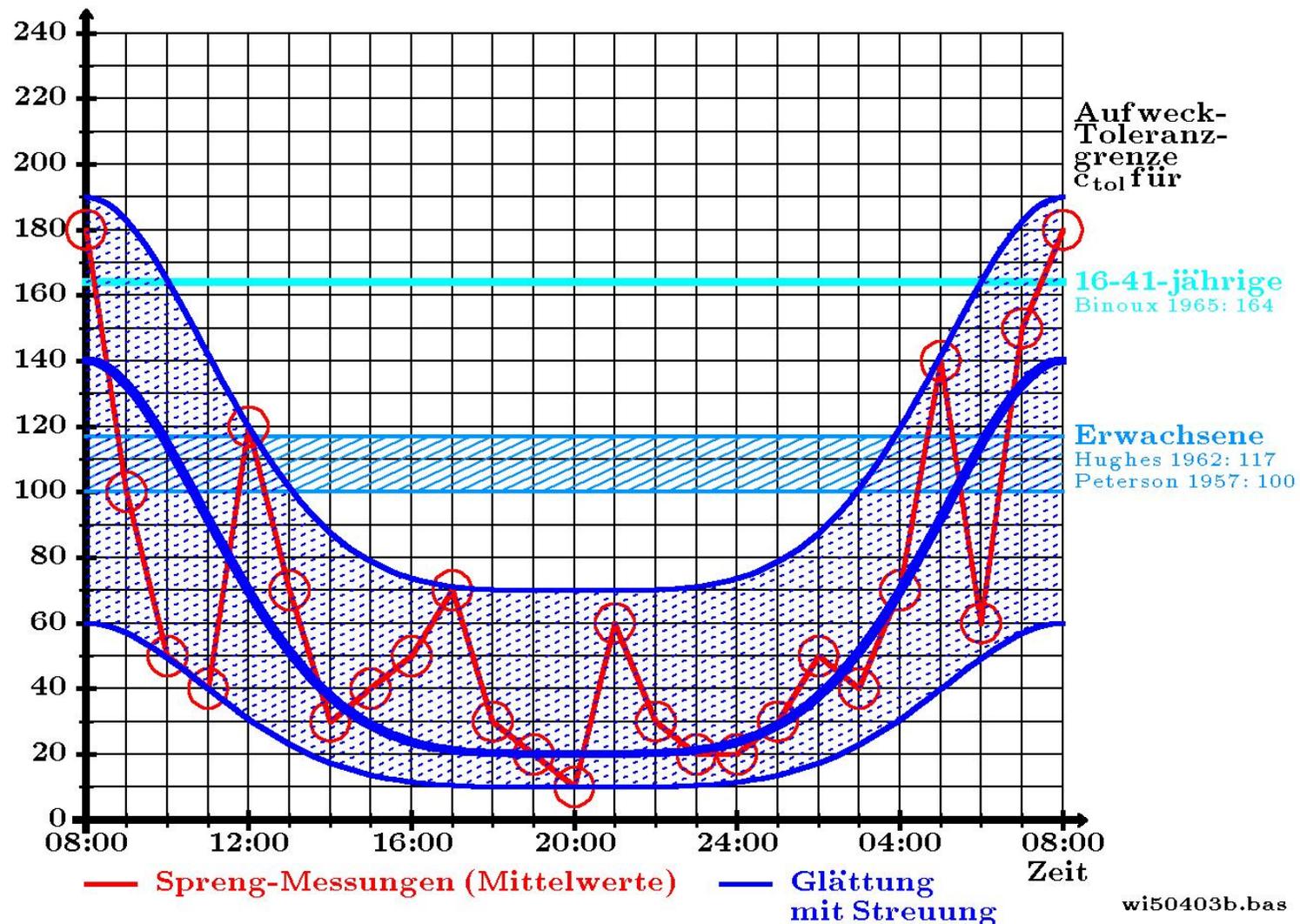
Dazu wird eine **medizinische Diagnose** zur Erkennung von individuellem „ungestörtem Schlaf“ sowie der Anzahl individueller „lärmbedingter Aufwachreaktionen“ beschrieben

und eine **mathematische Modellierung** sowohl zur Beschreibung von allgemeinem 8-stündigem Schlaf als auch zur Modellierung von Aufweckreaktionen (Störungen) infolge von Vorbeifahrpegeln von Schienenfahrzeugen zu definieren,

um eine **Anzahl lärmbedingter Aufwachreaktionen** bestimmen zu können.

4.2 Cortisol-Konzentration bei ungestörtem Schlaf

$c_{\text{grd}}(t)$: Cortisol-Grundwert (in [ng/ml]) in Abhängigkeit von der Zeit

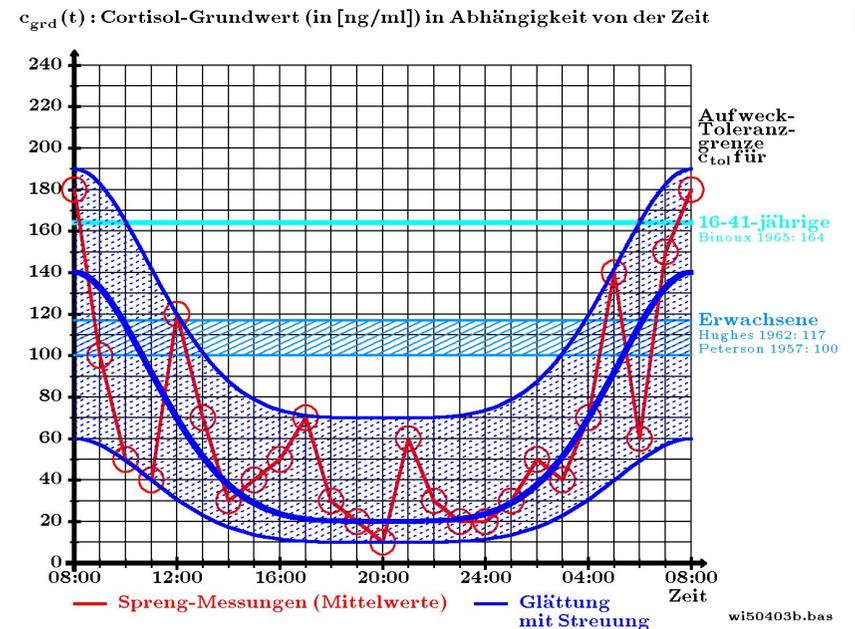


Cortisol-Konzentration

In den Jahren vor 2011 wurde Schlaf bewertet, indem während der 8 Stunden des Schlafes die jeweilige Cortisol-Konzentration im Körper eines Schlafenden gemessen wurde.

Wenn dann die zur jeweiligen Zeit nach dem Einschlafen gemessenen Cortisol-Werte in dem blau schraffierten Toleranzbereich lagen, war die Schlafqualität „gut“.

Die blauen „Toleranz-Kurven“ wurden von Vogelsang und Windelberg eingezeichnet.



Die roten Punkte sind Mittelwerte der Messung von SPRENG

4.3 Polysomnografie und Hypnogramm

Heute gibt es weitere Verfahren zur medizinischen Definition von (individuellem) Schlaf und eventuellen Aufwachreaktionen einer Versuchsperson.

Diese Verfahren finden insbesondere bei
Fluglärm-Studien
Verwendung:

Hier werden Definitionen und Ergebnisse aus der „NORAH-Studie“, zum Thema „Fluglärm und nächtlicher Schlaf“ verwendet:

In einem speziellen „Schlaflabor“ im Bereich eines Flughafens schlafen Versuchspersonen, deren Schlafverhalten mit den Verfahren „Polysomnografie“ während der Nacht aufgezeichnet wird.

Eine anschließende Auswertung der 960 Polysomnografien einer Nacht ergibt dann für jede Versuchsperson ein „Hypnogramm“.

Polysomnografie

Zunächst wird jeder Versuchsperson an 6 Stellen im Gesicht eine Elektrode angeklebt, welche die jeweiligen Variationen der an diesen Stellen durchfließenden Ströme misst.

Es wird in 960 Zeitschritten (von jeweils 30 Sekunden des 8-stündigen Schlafes) gemessen.

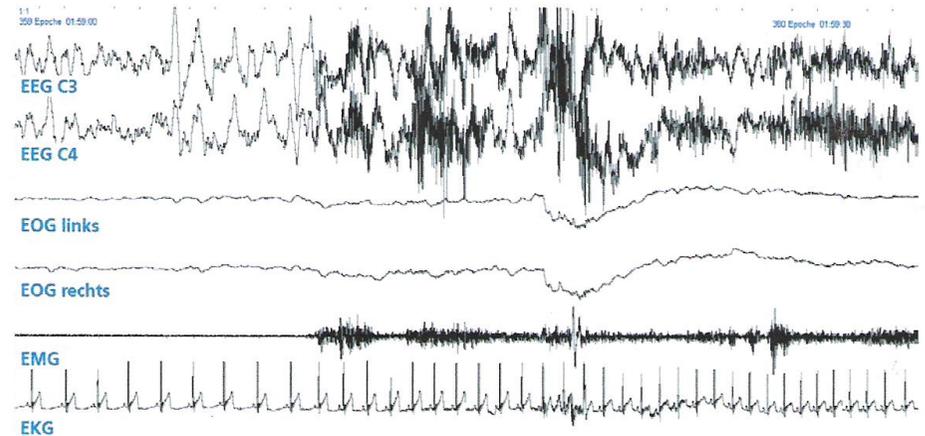


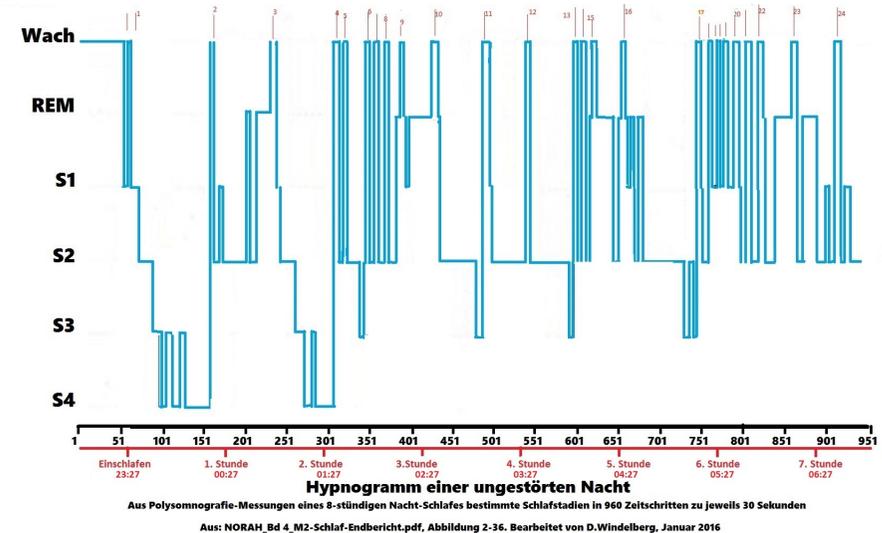
Abbildung 2-38: 30 s Epoche mit Aufwachreaktion aus dem Schlaf

30 Sekunden eines 8-stündigen Schlafs

Aus den 6 Kurven jedes dieser 960 Dokumente wird dann durch einen „geschulten Auswerter“ entschieden, in welchem der 6 Schlafstadien die Versuchsperson in diesem Zeitraum überwiegend geschlafen hat - oder ob sie aufgewacht ist.

Hypnogramm

Ein Hypnogramm beschreibt das Ergebnis der Auswertung: Für jedes der 960 Polysomnografie-Bilder wurde genau eines der 6 Schlafstadien wach - REM - S1 - S2 - S3 - S4 (mit S4=„Tiefschlaf“) erkannt und in die nebenstehende Graphik eingetragen.



**Ungestörter Schlaf:
24 Aufwachreaktionen**

Die Versuchsperson ist in dieser Nacht 24 mal aufgewacht

Allgemeine Kritik an der Verwendung von Hypnogrammen zur Bestimmung von Aufwachreaktionen

(H1) Es wird
zu jeder Nacht und von jeder Versuchsperson
genau ein **individuelles Hypnogramm** (mit Hilfe der Polysomnografie)
erzeugt.

Es gibt aber kein mathematisches Verfahren,
um aus 2 Hypnogrammen ein „mittleres Hypnogramm“
zu erzeugen. - Also gibt es keine Verallgemeinerung?

Wenn sich z.B. in der Zeitspanne zwischen 23:33:00 Uhr und 23:33:30 Uhr

- der Schlafende A im Schlafstadium „wach“ und
- der Schlafende B im Schlafstadium „S3“

befindet, dann wäre der Mittelwert in dieser Zeitspanne das Schlafstadium „S1“.

(Oder allgemein: Ein aus A und B „gemittelter“ Schlaf würde kaum ein Stadium „S4“ (Tiefschlaf) und kaum ein Stadium „wach“ enthalten: Mittelwertbildung ist daher nicht sinnvoll.)

(H2) Wegen (H1) gibt es keine Möglichkeit, aus **mehreren Hypnogrammen** abzulesen, ob - und wenn, wie - eine Störung den Schlaf nicht nur einer Person, sondern „allgemein“ (z.B. mehrere Anwohner an einer Strecke) beeinflusst.

(H3) Aufwachreaktionen infolge „**schlechter Träume**“ sind aus einem Hypnogramm nicht zu unterscheiden von anderen Aufwach-Ursachen.

(H4) Da in der NORAH-Studie (nur)

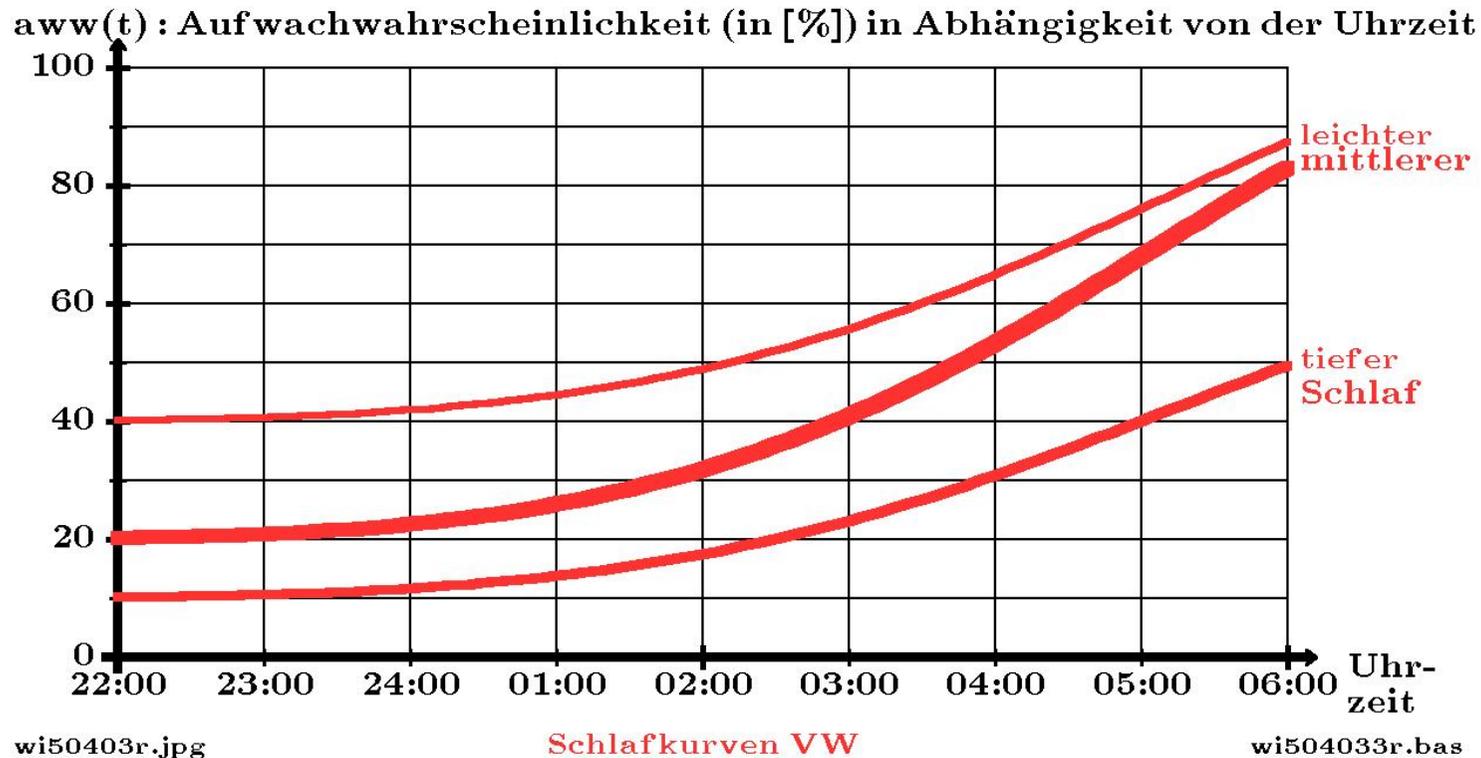
die Anzahl Aufwachreaktionen das Maß für die Schlafqualität ist (obwohl in dieser Studie untersucht werden sollte, welche Folgen nächtlicher Verkehrslärm für den Schlaf von [mehreren] Anliegern hat), wäre es konsequent (wenn auch nicht unbedingt sinnvoll),

die Zahl „24 Aufwachreaktionen“ als Mittelwert für störungsfreien Schlaf zu betrachten und dazu die Streuung μ um diesen Mittelwert so anzugeben, dass **für 50 Prozent der Versuchspersonen**

($24 \pm \mu$) Aufwachreaktionen pro ungestörtem 8-stündigem Schlaf stattfinden.

(H5) Es gibt keine Möglichkeit, aus einem Hypnogramm abzulesen, ob - und wenn, wie - zum Beispiel eine **Störung durch Verkehrslärm** den Schlaf beeinflusst.

5 Wirkung mathematisch

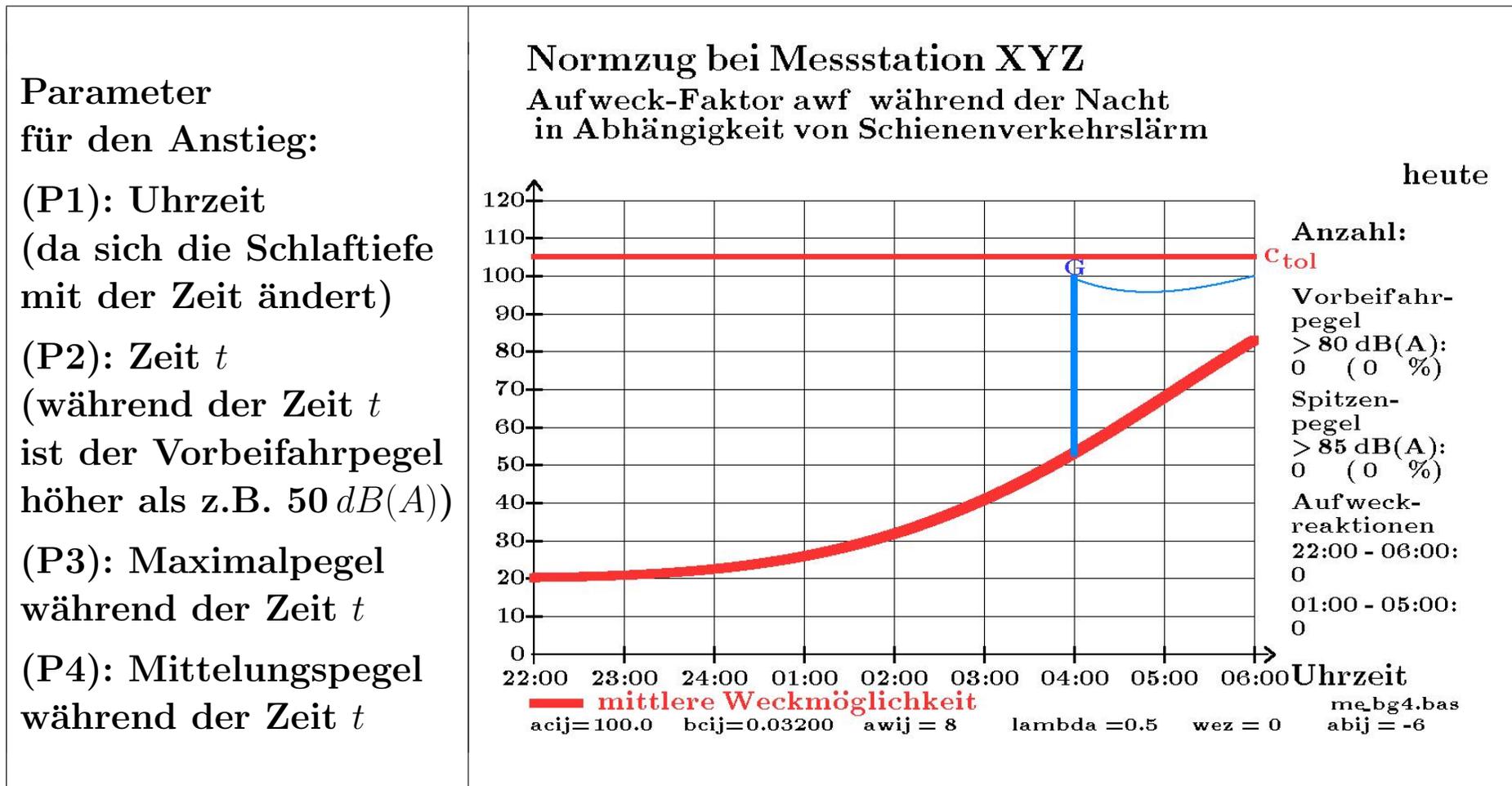


Die 3 Cortisol-Kurven wurden von Vogelsang und Windelberg mathematisch-physikalisch zur Beschreibung der (allgemeinen) Aufwachwahrscheinlichkeit von Menschen mit „mittlerer“ Schlafgewohnheit verallgemeinert.

Zusätzlich werden Schlafgewohnheiten zwischen „tief“ und „leicht“ berücksichtigt, um die Aufwachwahrscheinlichkeit

für 50% aller schlafenden (Versuchs-)Personen

für die Stunden zwischen 22:00 und 06:00 Uhr zu berücksichtigen.



Um 04:00 Uhr beträgt die Aufwachwahrscheinlichkeit bei bis dahin „ungestörtem mittlerem Schlaf“ 52%.

Der „Anstieg“ (d.h. die Länge der blau eingezeichneten Strecke) wird berechnet aus den Parametern (P1) bis (P4).

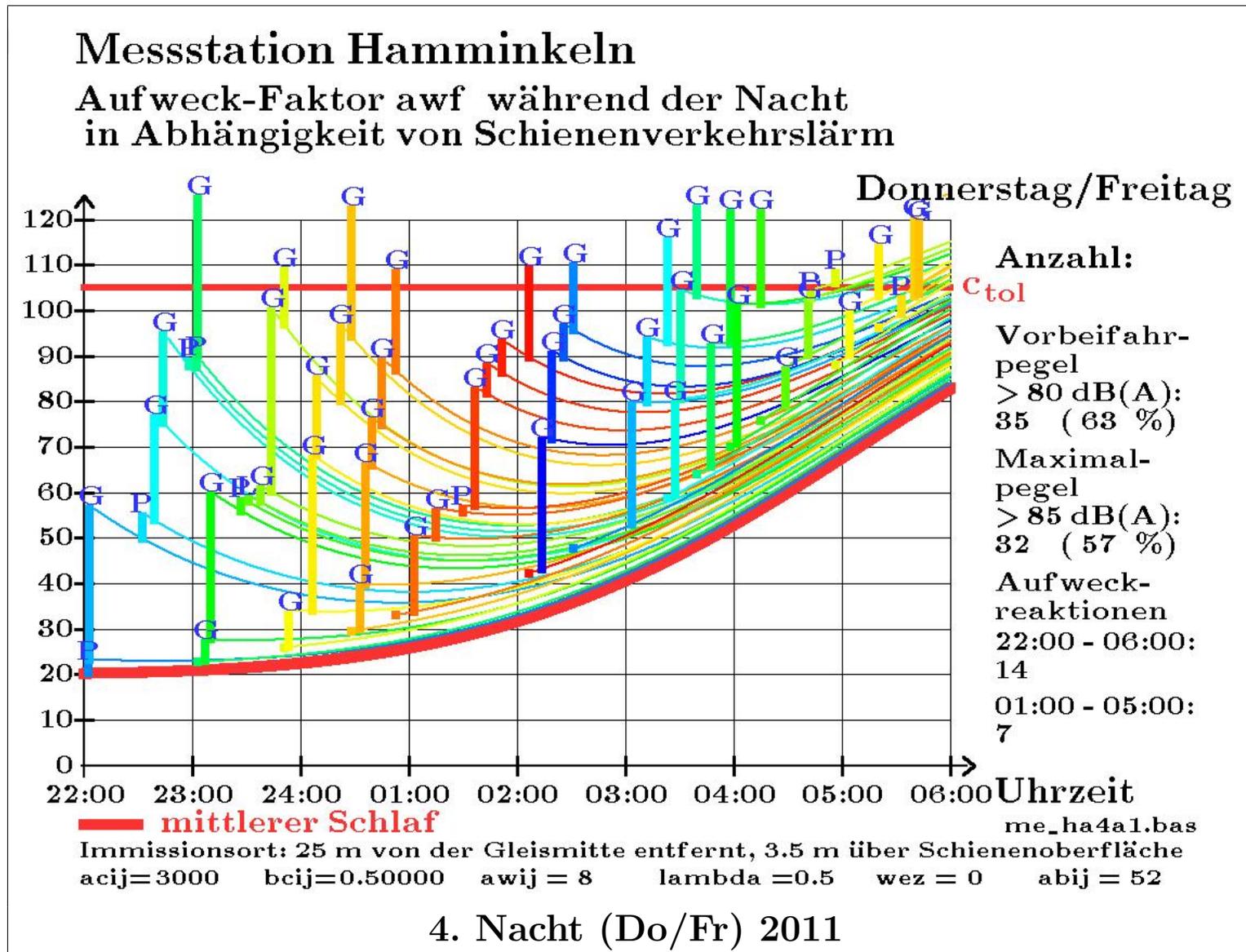
Schlafkurve bei Störungen

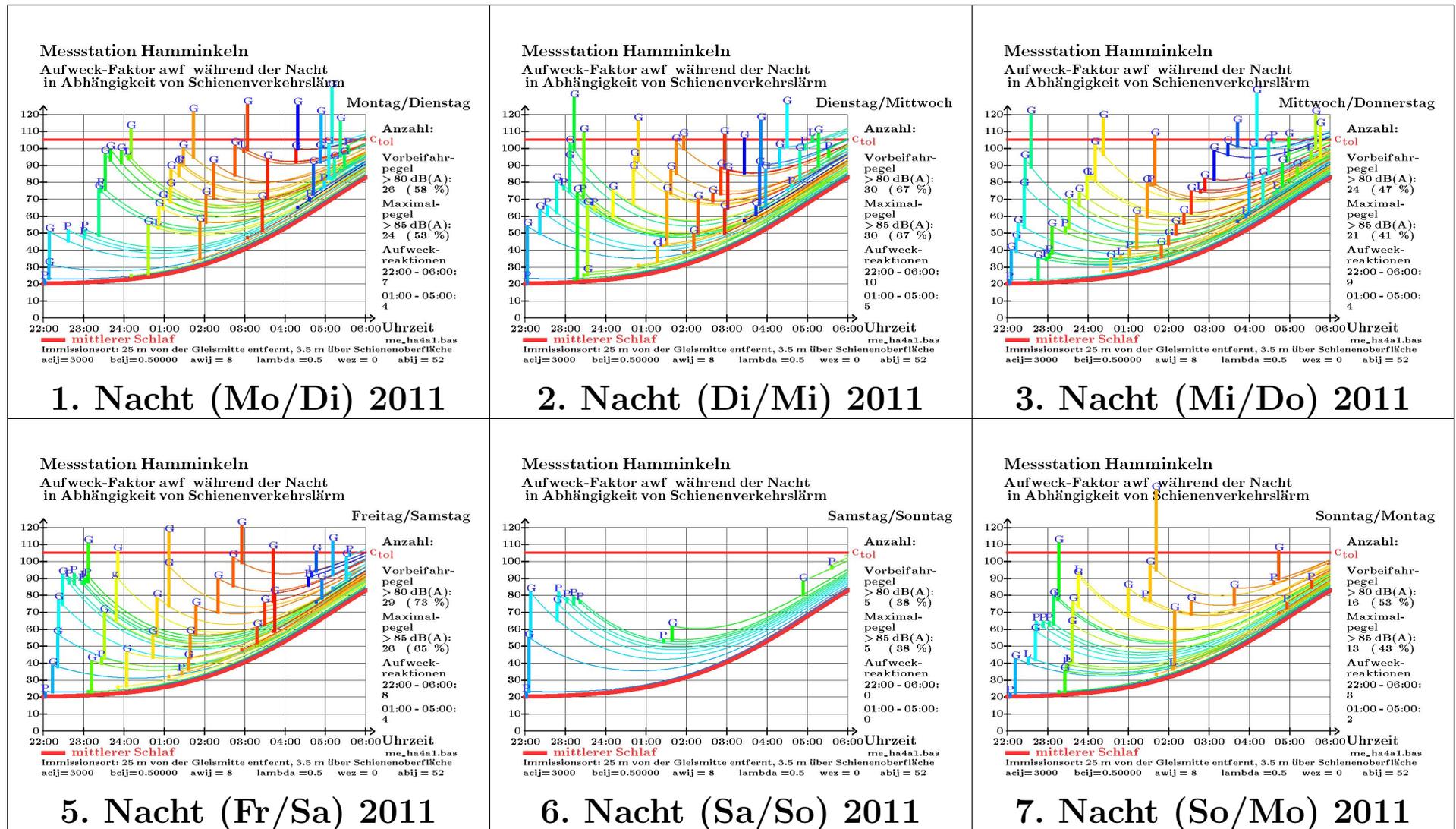
Für die mathematische Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit eines Menschen, der sich zu einer bestimmten Zeit nach dem Einschlafen in einem „leichten“, „mittleren“ oder „tiefen“ Schlaf befindet, und der während einer Vorbeifahrzeit eines Fahrzeugs an seinem Bett durch Vorbeifahrpegel geweckt wird, gibt es keine sinnvoll definierte Randbedingung.

Wir wissen (auch) nicht, wie ein durch eine Vorbeifahrt eines Güterzuges aufgewachter Anlieger wieder einschläft.

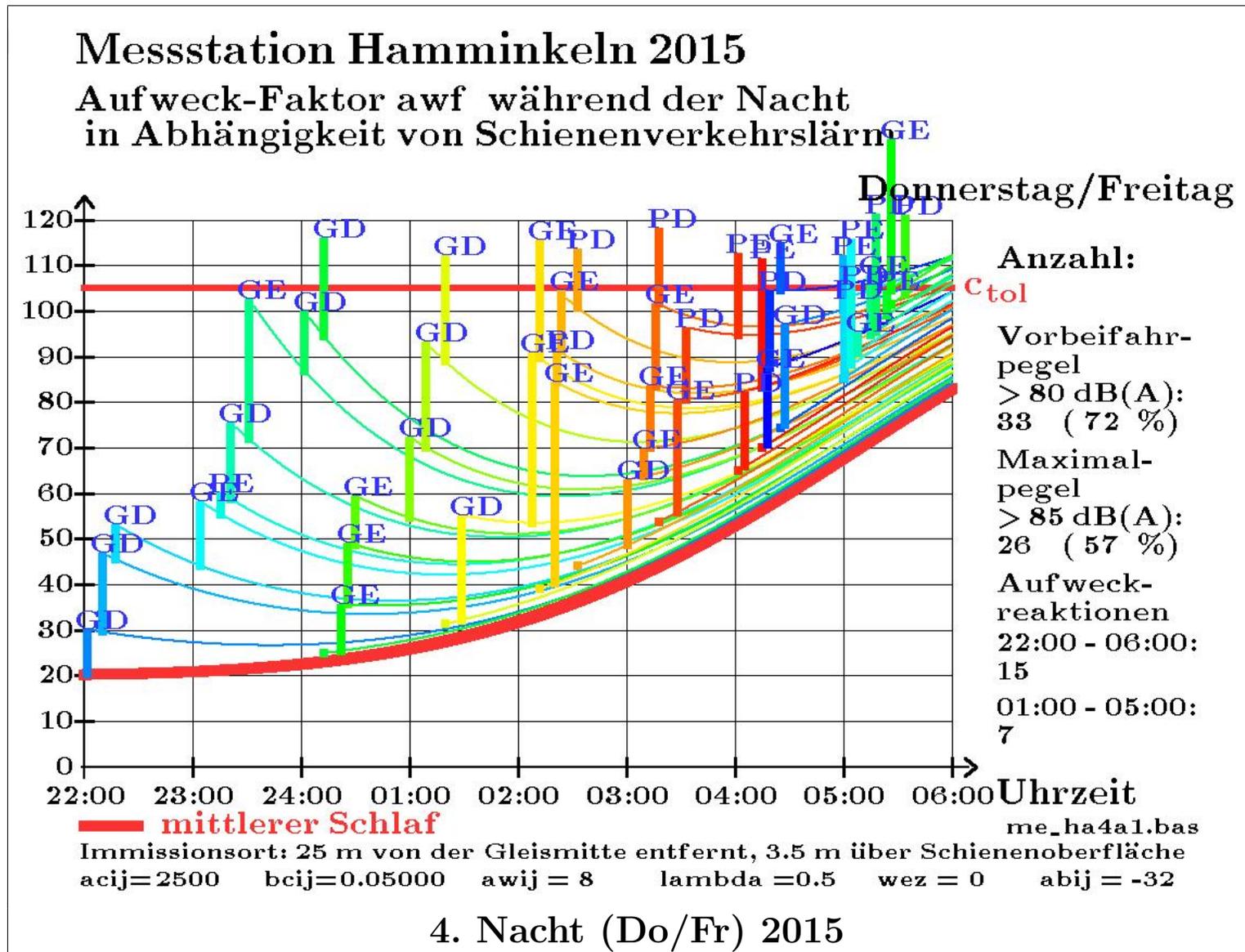
Daher haben wir hier angenommen, dass sich die Aufwachwahrscheinlichkeit „langsam“ wieder der Kurve der „ursprünglichen“ Aufwachwahrscheinlichkeit annähert.

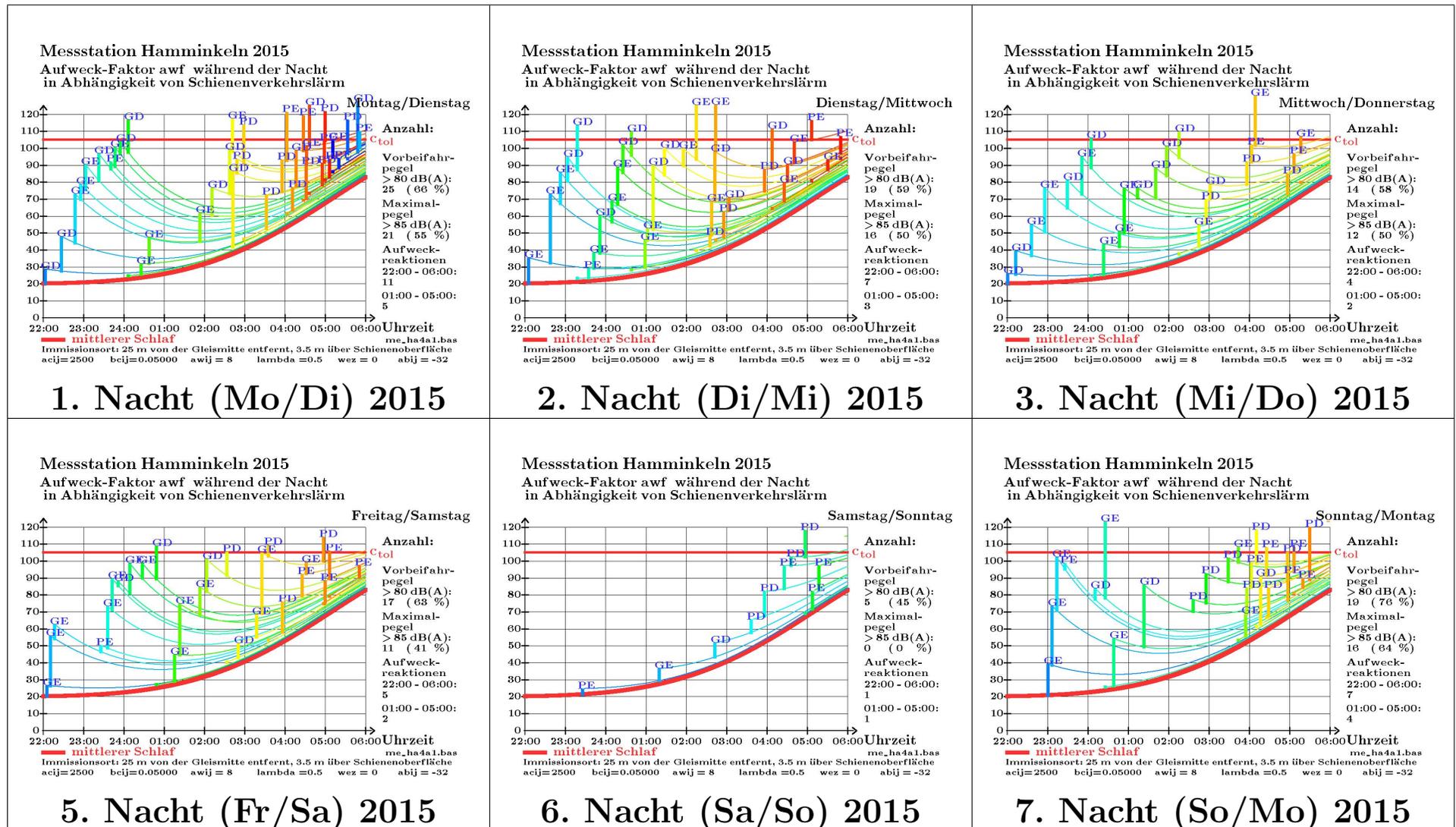
Störungen bei mittlerem Schlaf 2011





Störungen bei mittlerem Schlaf 2015





Anzahl Aufweckreaktionen bei mittlerem Schlaf 2011 und 2015

Wochen- tag	2011		2015	
	22-06	01-05	22-06	01-05
Mo/Di	7	4	11	5
Di/Mi	10	5	7	3
Mi/Do	9	4	4	2
Do/Fr	14	7	15	7
Fr/Sa	8	4	5	2
Sa/So	0	0	1	1
So/Mo	3	2	7	4

	2011	2015
	maximale Anzahl Aufweckreaktionen pro Nacht	
22-06 Uhr	14	15
01-05 Uhr	7	7
	Wochen-Mittelwerte	
22-06 Uhr	7	7
01-05 Uhr	4	4

Ergebnis der Auswertungen 2011 bis 2015

Die nächtliche Lärmbelastung infolge des Schienenverkehrs in Hamminkeln hat sich in den Jahren von 2011 bis 2015 nicht wesentlich geändert:

Die nächtliche Lärmbelastung hat sich von 2011 bis 2015 nicht verringert.

Insbesondere gibt es keine Anzeichen dafür, dass sich der Schienenverkehrslärm von 2011 bis 2020 „halbieren“ könnte.

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit!

**Die Datenmengen sind so gross,
dass sich für viele Thesen Beispiele finden lassen.**

**Ich hoffe, dass Ihnen diese Vielfalt
dennoch Motivation für weitere Diskussionen liefert.**