AG Qualität
Leibniz Universität Hannover

Mathematik

Windelberg, D.

Mittelung
von Schallpegeln

physikalisch und psychologisch

Dezember 2014

Dr. Dirk Windelberg
Heuerstr. 12, D-30519 Hannover, Germany

Mittelung von Schallpegeln

Verfasser: ***Dr. Dirk Windelberg, AG Qualität, Heuerstr. 12, 30519 Hannover***

Inhaltsverzeichnis

1 Mittelung für Schallereignisse mit langen Pausen **2**
1.1 Szenario A 2
1.1.1 physikalische Beurteilung: Nacht-Mittelungspegel 4
1.1.2 physikalische Beurteilung: Lästigkeits-Vektor 5
1.2 Szenario B 9
1.2.1 physikalische Beurteilung: Mittelungspegel 11
1.2.2 physikalische Beurteilung: Lästigkeits-Vektor 12

2 Anhang und Ausblick **16**

Mittelwert-Bildung ist immer etwas problematisch: Wenn die Abiturnote die Qualität der „allgemeinen Hochschulreife“ beschreiben soll, so wird diese Problematik sichtbar: sowohl für Mathematiker, Mediziner, Theologen, Juristen als auch für Architeken und Gartenbauer soll diese Note in gleicher Weise aussagekräftig sein - und die Noten der einzelnen Fächer, die zu dieser Note führten, bleiben im Verborgenen.

Hier wird an Beispielen von Schallereignissen mit langen Pausen gezeigt, welche verschiedenen Szenarien bei gleichem Mittelungspegel vorkommen können: Der „Mittelungspegel“ - als „Abiturnote“ - setzt sich zwar aus vielen Einzelinformationen - als Noten aus den einzelnen Schulfächern - zusammenen, aber er beschreibt damit auch nicht mehr die vielleicht wesentlichen Einzelheiten.

1 Mittelung für Schallereignisse mit langen Pausen

Als *Schallereignis* S_{ir} wird hier ein zur besseren Vorstellung jeweils ein Sirenenton mit einem Pegel von 92 dB(A) (am Ohr des Beobachters) und einer Dauer von 2 Minuten betrachtet. Dieser Lärm ist so hoch, daß in dieser Zeit kein Gespräch geführt werden kann.

1.1 Szenario A

Für einen Bereich, in dem die Hintergrundgeräusche stets etwa 51 dB(A) betragen, werden die folgenden vier Situationen beschrieben und berechnet:

1. **ein einziges Schallereignis S_{ir} tritt um 22:30 Uhr auf; während der übrigen Nachtzeit gibt es nur die Hintergrundgeräusche von 51 dB(A).**
2. **acht der Schallereignisse S_{ir} erfolgen in der Zeit zwischen 22:00 Uhr und 23:00 Uhr. Nach 23:00 Uhr gibt es nur die Hintergrundgeräusche von 51 dB(A).**
3. **acht der Schallereignisse S_{ir} erfolgen im Stundenrhythmus während der gesamten Nacht: in jeder Stunde wird das Hintergrundgeräusch von 51 dB(A) für jeweils 2 Minuten durch ein Schallereignis unterbrochen.**
4. **das Hintergrundgeräusch wird durch ein kontinuierlich 66 dB(A) lieferndes Schallereignis überlagert. Zusätzlich erfolgen acht der Schallereignisse S_{ir} im Stundenrhythmus während der gesamten Nacht.**

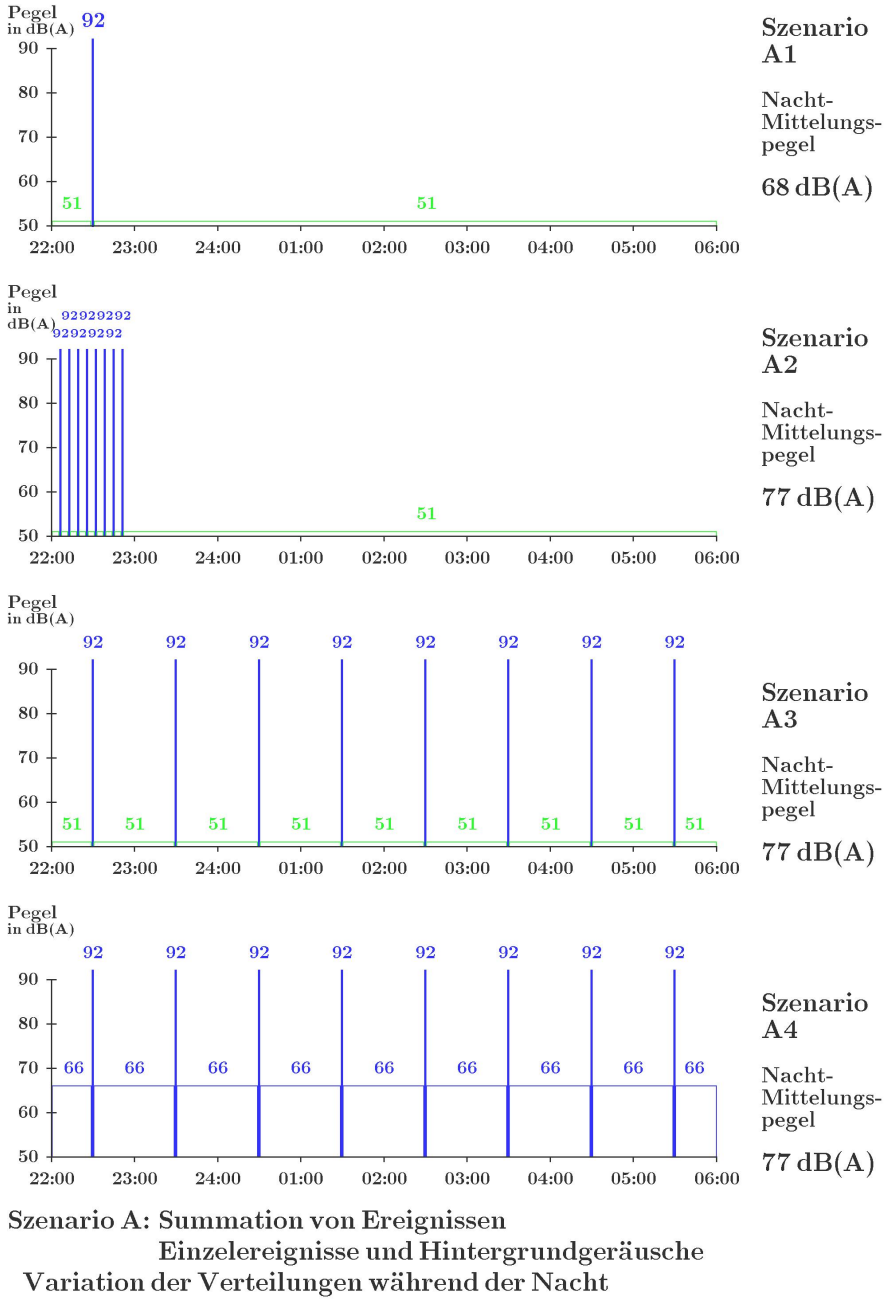

Abb. 1: **Szenario A: Summation von Ereignissen Einzelereignisse und Hintergrundgeräusche Variation der Verteilungen während der Nacht**

1.1.1 physikalische Beurteilung: Nacht-Mittelungspegel

Hier werden die acht Nachtstunden (von 22:00 bis 6:00 Uhr) in Minuten aufgeteilt, also in $8 \cdot 60$ Minuten = 480 Minuten. Für n Schallereignisse $S_1, \ldots, S_n$ seien die zugehörigen A-bewerteten Schallpegeln $p_1, \ldots, p_n$ in $dB(A)$ und die die dazugehörigen Zeiten $t_1, \ldots, t_n$ in Minuten (mit $\sum_{i=1}^{i=n} t_i = 480$). Dann wird der Nacht-Mittelungspegel $L_{eq,Nacht}$ (in $dB(A)$) berechnet nach der Formel

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{t_i}{480} \cdot 10^{0.1 \cdot p_i} \right) \mathbf{dB(A)} \tag{1}$$

Für diese vier Szenarien ergibt sich dann:

- **Szenario A1**
  2 Minuten 92 dB(A), 478 Minuten 51 dB(A):

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2}{480} \cdot 10^{9.2} + \frac{478}{480} \cdot 10^{5.1} \right) \approx 68 \, \mathbf{dB(A)}$$

- **Szenario A2 bzw. A3**
  Da die Zeit, zu der das jeweilige Schallereignis während der Nacht eintritt, nicht in der Formel berücksichtigt wird, sind für diese Berechnung die Szenarien A2 und A3 gleich.
  16 Minuten 92 dB(A), 464 Minuten 51 dB(A):

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{16}{480} \cdot 10^{9.2} + \frac{464}{480} \cdot 10^{5.1} \right) \approx 77 \, \mathbf{dB(A)}$$

- **Szenario A4**
  16 Minuten 92 dB(A), 478 Minuten 66 dB(A):

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{16}{480} \cdot 10^{9.2} + \frac{464}{480} \cdot 10^{6.6} \right) \approx 77 \, \mathbf{dB(A)}$$

1.1.2 physikalische Beurteilung: Lästigkeits-Vektor

Von dem Autor wurde in [7] ein Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Lästigkeit auf der Grundlage physikalischer Messungen angegeben

a) **Mittelungspegel**
Im Gegensatz zu dem über die acht Nachtstunden gemittelten Pegel $L_{eq,Nacht}$ wird hier für jede Stunde der Mittelungspegel bestimmt:

Szenario	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	77	51	51	51	51	51	51	51
A2	86	51	51	51	51	51	51	51
A3	77	77	77	77	77	77	77	77
A4	77	77	77	77	77	77	77	77

Szenarien A: Mittelungspegel a in $dB(A)$

b,c) **maximaler Schallpegel und seine Lästigkeit**
Wenn b der Maximalpegel ist, so wird der Grad der Belästigung **(0 bei keiner Lästigkeit und 100 bei sehr stärkster Lästigkeit) beshrieben durch**

$$c(b) = \left(0.5 + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan(1.4 \cdot (b - 75\,dB(A))\right) \cdot 100 \quad \text{\% Lästigkeit der Maximalpegel}$$

Szenario	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1: b	92	51	51	51	51	51	51	51
A1: $c(b)$	98	1	1	1	1	1	1	1
A2: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A2: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98
A3: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A3: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98
A4: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A4: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98

Szenarien A: maximaler Schallpegel b in $dB(A)$ und seine Lästigkeit $c(b)$ in %

d,e) Pausen: Lästigkeit der Einzelereignisse

Für die Zählung werden nur solche Schallereignisse gewertet, deren (maximaler) Schallpegel um mindestens 20 dB(A) über dem Grundpegel d liegt, wobei d definiert ist als der Schallpegel, der ohne Einzelereignisse gemessen wird.

Ferner sei n die Anzahl der Schallereignisse, deren maximaler Schallpegel höher ist als $d + 20\,\mathrm{dB(A)}$. Dann wird die Lästigkeit der Einzelereignisse **definiert durch**

$$e(n) = \left(-1 + \frac{800}{400 + (n-20)^2}\right) \cdot 100 \quad \textbf{\% Lästigkeit} \quad \textbf{für} \quad 0 \le n \le 20$$

$$e(n) = \left(\frac{2\,000}{2\,000 + (n-20)^2}\right) \cdot 100 \quad \textbf{\% Lästigkeit} \quad \textbf{für} \quad 20 < n \le 60$$

Damit ergibt sich dann wegen $e(0) = 0\,\%$, $e(1) = 5\%$ und $e(8) = 47\%$

Szenario		22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	$e(n)$	**5%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A2	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**8**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	$e(n)$	**47%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A3	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	$e(n)$	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**
A4	d	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	$e(n)$	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**	**5%**

Szenarien A: Zahl der Einzelereignisse n und seine Lästigkeit $e(n)$ in %

f) Lästigkeit der Pausen zwischen Einzelereignissen
Wenn t_{max} die maximale Zeitdifferenz (in s) zwischen zwei Einzelereignissen (im Sinne der obigen Definition) ist, dann wir die Lästigkeit der maximalen Zeitdifferenz definiert durch

$$f(n, t_{max}) = \left(0.5 - 0.5 \cdot \arctan\left(\frac{t_{max} - 1\,800 \cdot \frac{n+1}{n}}{1\,200}\right)\right) \cdot 100 \quad \text{\% Lästigkeit}$$

Szenario		22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	t_{max}	**1740**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A2	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**8**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	t_{max}	**450**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
	$f(n, t_{max})$	**96%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A3	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	t_{max}	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**
A4	d	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	t_{max}	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**

Szenarien A: Lästigkeit $f(n, t_{max})$ der Pausen zwischen Einzelereignissen in %

$A1_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**47**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A1_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**86**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**47**	,	**96**	$)$
$A2_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A3_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$

Szenarien A: Vektoren der Lästigkeit

1.2 Szenario B

Der Bereich des Szenario A, in dem die Hintergrundgeräusche stets 51 dB(A) betragen, wird während einer Nacht-Stunde zusätzlich beschallt durch ein Schallereignis S_{mus} von 76 dB(A). Es werden die folgenden vier Situationen beschrieben und berechnet:

1. **von 22:00 bis 23:00 Uhr tritt das Schallereignis S_{mus} ein, das um 22:30 Uhr durch ein einziges Schallereignis S_{ir} überlagert wird; während der übrigen Nachtzeit (nach 23:00 Uhr) gibt es nur die Hintergrundgeräusche von 51 dB(A).**

2. **acht der Schallereignisse S_{ir} erfolgen in der Zeit zwischen 22:00 Uhr und 23:00 Uhr. Um 23:00 Uhr beginnt für eine Stunde das Schallereignis S_{mus}. Nach 24:00 Uhr gibt es nur die Hintergrundgeräusche von 51 dB(A).**

3. **acht der Schallereignisse S_{ir} erfolgen im Stundenrhythmus während der gesamten Nacht: in jeder Stunde wird das Hintergrundgeräusch von 51 dB(A) für jeweils 2 Minuten durch ein Schallereignis unterbrochen. Zusätzlich beginnt um 23:00 Uhr für eine Stunde das Schallereignis S_{mus}.**

4. **das Hintergrundgeräusch wird durch ein kontinuierlich 66 dB(A) lieferndes Schallereignis überlagert. Zusätzlich erfolgen acht der Schallereignisse S_{ir} im Stundenrhythmus während der gesamten Nacht, und um 2:00 Uhr beginnt für eine Stunde das Schallereignis S_{mus}.**

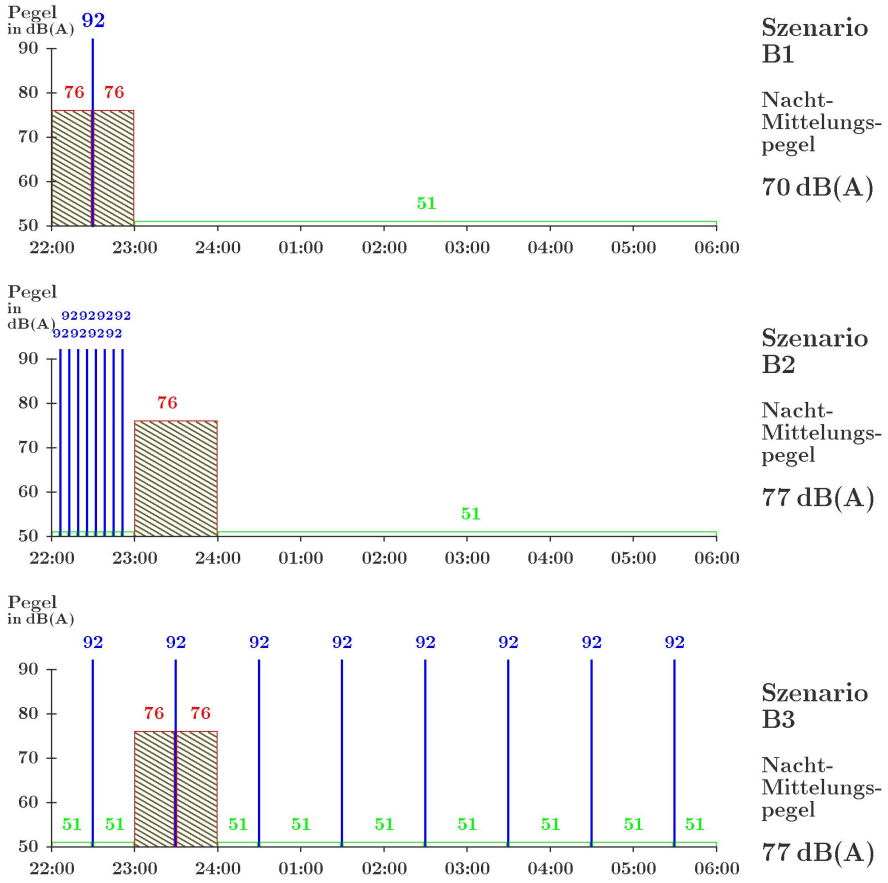

Abb. 2: **Szenario B: Summation von Ereignissen**
Einzelereignisse, einstündige Störung und Hintergrundgeräusche
Variation der Verteilungen während der Nacht

1.2.1 physikalische Beurteilung: Mittelungspegel

Für diese vier Szenarien ergibt sich entsprechend der Formel (1):

- **Szenario B1**
  2 Minuten 92 dB(A), 58 Minuten 76 dB(A) und 420 Minuten 51 dB(A):

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2}{480} \cdot 10^{9.2} + \frac{58}{480} \cdot 10^{7.6} + \frac{420}{480} \cdot 10^{5.1} \right) \approx 70\,\mathbf{dB(A)}$$

- **Szenario B2 bzw. B3**
  Da die Zeit, zu der das jeweilige Schallereignis während der Nacht eintritt, nicht in der Formel berücksichtigt wird, sind für diese Berechnung die Szenarien B2 und B3 gleich.
  16 Minuten 92 dB(A), 58 Minuten 76 dB(A) und 406 Minuten 51 dB(A):

$$L_{eq,Nacht} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{16}{480} \cdot 10^{9.2} + \frac{58}{480} \cdot 10^{7.6} + \frac{406}{480} \cdot 10^{5.1} \right) \approx 77\,\mathbf{dB(A)}$$

1.2.2 physikalische Beurteilung: Lästigkeits-Vektor

Auch für dieses Szenario wird der Lästigkeits-Vektor angegeben:

a) **Mittelungspegel**
Im Gegensatz zu dem über die acht Nachtstunden gemittelten Pegel $L_{eq,Nacht}$ wird hier für jede Stunde der Mittelungspegel bestimmt:

Szenario	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	77	51	51	51	51	51	51	51
A2	86	51	51	51	51	51	51	51
A3	77	77	77	77	77	77	77	77
A4	77	77	77	77	77	77	77	77

Szenarien A: Mittelungspegel a in $dB(A)$

b,c) **maximaler Schallpegel und seine Lästigkeit**
Wenn b der Maximalpegel ist, so wird der Grad der Belästigung **(0 bei keiner Lästigkeit und 100 bei sehr stärkster Lästigkeit) beshrieben durch**

$$c(b) = \left(0.5 + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan(1.4 \cdot (b - 75\,dB(A))\right) \cdot 100 \quad \text{\% Lästigkeit der Maximalpegel}$$

Szenario	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1: b	92	51	51	51	51	51	51	51
A1: $c(b)$	98	1	1	1	1	1	1	1
A2: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A2: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98
A3: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A3: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98
A4: b	92	92	92	92	92	92	92	92
A4: $c(b)$	98	98	98	98	98	98	98	98

Szenarien A: maximaler Schallpegel b in $dB(A)$ und seine Lästigkeit $c(b)$ in %

d,e) Pausen: Lästigkeit der Einzelereignisse

Für die Zählung werden nur solche Schallereignisse gewertet, deren (maximaler) Schallpegel um mindestens 20 dB(A) über dem Grundpegel d liegt, wobei d definiert ist als der Schallpegel, der ohne Einzelereignisse gemessen wird.

Ferner sei n die Anzahl der Schallereignisse, deren maximaler Schallpegel höher ist als $d + 20\,\mathrm{dB(A)}$. Dann wird die Lästigkeit der Einzelereignisse **definiert durch**

$$e(n) = \left(-1 + \frac{800}{400 + (n-20)^2}\right) \cdot 100 \quad \textbf{\% Lästigkeit} \quad \textbf{für} \quad 0 \le n \le 20$$

$$e(n) = \left(\frac{2\,000}{2\,000 + (n-20)^2}\right) \cdot 100 \quad \textbf{\% Lästigkeit} \quad \textbf{für} \quad 20 < n \le 60$$

Damit ergibt sich dann wegen $e(0) = 0\,\%$, $e(1) = 5\%$ und $e(8) = 47\%$

Szenario		22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	d	51	51	51	51	51	51	51	51
	n	1	0	0	0	0	0	0	0
	$e(n)$	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
A2	d	51	51	51	51	51	51	51	51
	n	8	0	0	0	0	0	0	0
	$e(n)$	47%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
A3	d	51	51	51	51	51	51	51	51
	n	1	1	1	1	1	1	1	1
	$e(n)$	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
A4	d	66	66	66	66	66	66	66	66
	n	1	1	1	1	1	1	1	1
	$e(n)$	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Szenarien A: Zahl der Einzelereignisse n und seine Lästigkeit $e(n)$ in %

f) Lästigkeit der Pausen zwischen Einzelereignissen
Wenn t_{max} die maximale Zeitdifferenz (in s) zwischen zwei Einzelereignissen (im Sinne der obigen Definition) ist, dann wir die Lästigkeit der maximalen Zeitdifferenz definiert durch

$$f(n, t_{max}) = \left(0.5 - 0.5 \cdot \arctan\left(\frac{t_{max} - 1\,800 \cdot \frac{n+1}{n}}{1\,200}\right)\right) \cdot 100 \quad \text{\% Lästigkeit}$$

Szenario		22:00 - 23:00	23:00 - 24:00	24:00 - 01:00	01:00 - 02:00	02:00 - 03:00	03:00 - 04:00	04:00 - 05:00	05:00 - 06:00
A1	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	t_{max}	**1740**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A2	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**8**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	t_{max}	**450**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
	$f(n, t_{max})$	**96%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
A3	d	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**	**51**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	t_{max}	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**
A4	d	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**	**66**
	n	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
	t_{max}	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**	**1740**
	$f(n, t_{max})$	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**	**52%**

Szenarien A: Lästigkeit $f(n, t_{max})$ der Pausen zwischen Einzelereignissen in %

$A1_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**47**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A1_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A1_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**51**	,	**1**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**86**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**47**	,	**96**	$)$
$A2_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A2_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**51**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**0**	,	**0**	$)$
$A3_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A3_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**51**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{22}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{23}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{00}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{01}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{02}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{03}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{04}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$
$A4_{05}(a,b,c,d,e,f)$	$=($	**77**	,	**92**	,	**98**	,	**66**	,	**5**	,	**52**	$)$

Szenarien A: Vektoren der Lästigkeit

2 Anhang und Ausblick

Natürlich gibt es bis heute (2015) ungelöste Probleme:
Wir versuchen, für einen als „typisch“ definierten Menschen zu beschreiben, wie sich „Nachtruhe“ sowie eine „Störung der Nachtruhe“ beschreiben lassen. Dafür akzeptieren wir drei verschiedene Schlafkurven, obwohl wir nur den „mittleren Schlaf“ berücksichtigen. Wir akzeptieren nicht die Schlafstadien eines REM-Schlafes, weil es viele individuelle Schlafzyklen gibt (z.B. für Kinder, Erwachsene und Alte, in Abhängigkeit vom Einschlafzeitpunkt), so dass nicht allgemein beschrieben werden kann, zu welchen Zeiten sehr laute Verkehrsgeräusche zu vermeiden sind. Wir nehmen an, dass - trotz Berücksichtigung der Sommer- und Winterzeit - insbesondere der Schlaf in der Zeit zwischen 22:00 und 06:00 Uhr geschützt werden muss.

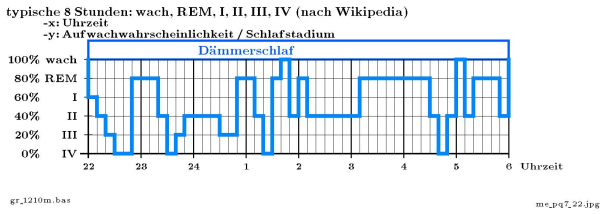

Bild A.1: ungestörter Schlaf
Schlafstadien nach Wikipedia

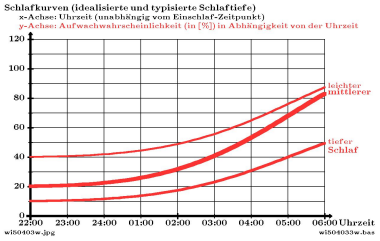

Bild A.2: ungestörter Schlaf
modellierte Schlafkurven

Der Nacht-Mittelungspegel über die 8 Nachtstunden bestimmt immer noch den Grenzwert für die nächtliche Ruhe, obwohl die Pegelhöhe und die Verteilung auf die einzelnen Nachtstunden die Nachtruhe entscheidend beeinflussen.

Wir versuchen, den Einfluss einer Güterzugvorbeifahrt auf die in *Bild A.2* dargestellte Aufwachwahrscheinlichkeit zu modellieren, um daraus erkennen zu können, zu welchen Nachtzeiten Vorbeifahrten stärker und zu welchen Zeiten weniger aufweckend wirken:

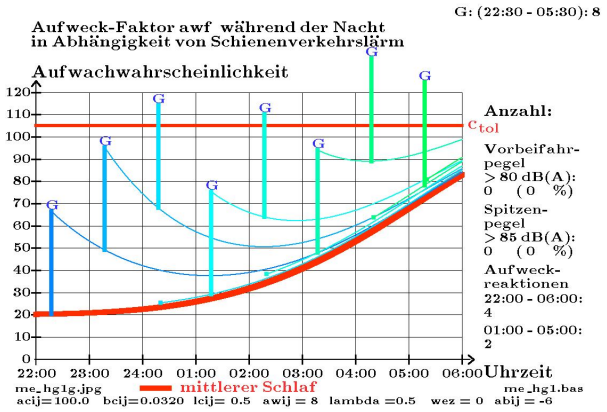

Bild A.3: Stundentakt
Aufweckreaktionen:
2 zwischen 23 und 05 Uhr
4 zwischen 22 und 06 Uhr

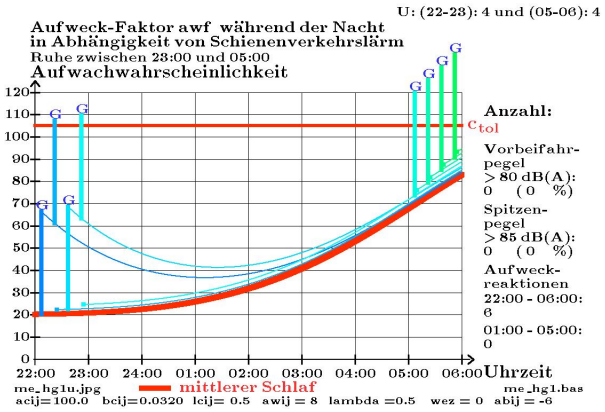

Bild A.4: 22-23 Uhr und 05-06 Uhr
Aufweckreaktionen:
0 zwischen 23 und 05 Uhr
6 zwischen 22 und 06 Uhr

Literatur

[1] ***Gesundheitsschutz 4:***
Lärmwirkungen: Gehör, Gesundheit, Leistung. **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund. 4. Aufl. 1998**

[2] **Griffiths, I.D.; Langdon, J. and Swan, M.A.:** ***Subjective effects of traffic noise exposure: reliability and seasonal effects.*** **Journal of Sound and Vibration. 71 (1980). 227-240**

[3] ***Freizeitlärm-Richtlinie.*** **Niedersächsisches Ministerialblatt (Nds.MBl) 42/1996, 1652**

[4] **suva:** ***Akustische Grenz- und Richtwerte.*** **Arbeitssicherheit Akustik. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (86048.d - 6.97). Luzern. 1997**

[5] ***Lärm und Gesundheit.*** **Eine Publikation der Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz, Basel. Brig/Zürich. 1995**

[6] **Windelberg, D.**
Zur Gleichheit von Verkehrslärm. **DAGA 1998.**

[7] **Windelberg, D.**
Evaluation of traffic noise: physical noise measurements versus response on an 'average' population. **Euro-noise, München 1998.**