



Bericht zum F+E-Projekt "Neues EMPA-Modell für Strassenlärm" Teil Quellenbeschreibung

Nr. 156'479 / int. 511.1773

Ausführung: bis Januar 1997

Anzahl Seiten: 37

Inhalt

0 Zusammenfassung	2
1 Einleitung	2
2 Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Beschreibung einer bewegten Punktquelle durch den maximalen Vorbeifahrt-pegel.....	3
2.2 Ermittlung der Drehzahl aus der Zündfrequenz.....	5
2.3 Umrechnung vom maximalen Vorbeifahrtpegel auf den Leq.....	6
3 Geräuschquellen am Fahrzeug und ihre Einflussparameter.....	6
4 Messungen.....	7
4.1 Personenwagenmessungen in der Ebene	7
4.1.1 Personenwagen Einzelvorbeifahrt-Emissionsmessungen	7
4.1.2 Personenwagen Motorgeräusch-Emissionsmessungen.....	12
4.1.3 Personenwagen Rollgeräusch-Emissionsmessungen.....	15
4.2 Lastwagenmessungen in der Ebene	16
4.2.1 Lastwagen Einzelvorbeifahrt-Emissionsmessungen	16
4.3 Personenwagenmessungen an Steigungen.....	20
4.4 Lastwagenmessungen an Steigungen.....	23
5 Formulierung des neuen Emissionsmodells	26
5.1 Die Quellenstärke auf ebener Fahrbahn für konstante Geschwindigkeit	26
5.1.1 A-Pegel.....	26
5.1.2 Oktavbandauftrennung.....	28
5.2 Einfluss der Steigung.....	31
5.3 Einfluss des Belags.....	33
5.4 Resultierender Vorbeifahrtpegel	33
6 Vergleich mit anderen Ansätzen.....	34
6.1 Emissionsformel in der Ebene	34
6.2 Oktavbandauftrennung	35
6.3 Steigungszuschlag.....	36

Dübendorf, den 31. Januar 1997
Der Projektleiter

Abteilung Akustik und Lärmbekämpfung
Der Abteilungsvorsteher

A. Rosenheck

Dr. R. Hofmann

Der Sachbearbeiter

Dr. K. Heutschi

0 Zusammenfassung

Basierend auf einer umfangreichen Messkampagne wurde der Quellenteil des EMPA-Strassenlärmmodells StL-86 überarbeitet und neu formuliert. Dazu wurden in den Kategorien Personenwagen und Lastwagen Einzelvorbeifahrtmessungen am realen Verkehr vorgenommen. Durch gleichzeitige Messung der Geschwindigkeit und des maximalen Pegels konnte für konstante Fahrweise in der Ebene pro Fahrzeugkategorie ein Zusammenhang zwischen gefahrener Geschwindigkeit und Emissionspegel eines durchschnittlichen Fahrzeugs bestimmt werden. Ergänzende Messungen des Rollgeräuschs erlaubten schliesslich eine Auftrennung des Gesamtgeräuschs in einen vorwiegend vom Motor abhängigen Teil (Antriebsgeräusch) und einen vom Abrollen des Reifens auf der Fahrbahn herrührenden Teil (Rollgeräusch).

Der Einfluss einer Längsneigung der Fahrbahn auf den Emissionswert wurde mit gezielten Messungen an Steigungs- und Gefällstrecken untersucht. In Verbindung mit theoretischen Überlegungen konnte eine Korrektur für das Antriebsgeräusch gefunden werden.

Die grundlegende akustische Grösse des Emissionsmodells ist der A-bewertete Schalldruckpegel. Davon ausgehend werden Angaben zu einer Oktavbandauftrennung für die beiden Fahrzeugkategorien und die beiden Geräuschanteile geliefert.

1 Einleitung

Heute stützen sich Aussagen zu Strassenverkehrslärm immer häufiger auf Berechnungen. Im Falle von Immissionsfragestellungen gliedert sich eine rechnerische Prognose in zwei Teilaufgaben. Die erste umfasst die Umsetzung der Verkehrsdaten in einen akustischen Emissionswert, die zweite Aufgabe besteht in der Berechnung der Ausbreitungsdämpfung von der Quelle zum Immissionspunkt. Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem ersten Teilproblem, der Formulierung eines Quellenmodells, d.h. der Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Motorfahrzeugen in Abhängigkeit ihres Betriebszustandes.

Im Jahre 1986 hat die EMPA bereits ein Rechenmodell für Strassenverkehrslärm¹ herausgegeben. Das Modell hat sich in der Praxis gut bewährt und ist vielerorts quasi als Standard angenommen worden. Die diesem Modell zu Grunde liegenden Quellendaten basieren auf Messungen Anfangs der 80er Jahre. Die markanten Entwicklungen im Bereich des Automobilbaus und die immer höher werdenden Anforderungen an die Prognosegenauigkeit haben es angezeigt erscheinen lassen, mittels einer neuen Messkampagne das Quellenmodell wieder auf den neuesten Stand zu bringen.

¹ Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, StL-86. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 60. BUWAL (ehemals Bundesamt für Umweltschutz) 1987.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Beschreibung einer bewegten Punktquelle durch den maximalen Vorbeifahrtpegel

Die naheliegende Grösse zur Beschreibung der Abstrahlung einer Quelle ist deren akustische Leistung. Wenn es sich um eine Punktquelle handelt und die Bodenreflexion bekannt ist, kann die Leistung durch die Angabe des Schalldruckpegels in einem bestimmten Abstand ersetzt werden. Um reproduzierbare Verhältnisse in Bezug zur Reflexion am Boden zu schaffen, müssen der Empfängerabstand und dessen Höhe sowie die Bodenbeschaffenheit konstant gehalten werden. Im Zusammenhang mit Fahrzeugen als Quellen hat sich basierend auf ISO 362 ein Empfängerabstand von 7.5 m seitlich und eine Empfängerhöhe von 1.2 m eingebürgert.

Bei bewegten Quellen müsste das Mikrophon strenggenommen mitgeführt werden. In der Praxis kann eine solche Messung durch die Auswertung des maximalen Vorbeifahrtpegels an einem feststehenden Mikrophon ersetzt werden. Der zu messende Pegel soll den Effektivwert des Quellengeräusches beschreiben. Bei einem stochastischen Signalcharakter ist eine minimale Mittelungszeit von Nöten, um den Effektivwert genügend genau zu erfassen. Auf der anderen Seite darf diese Mittelungsdauer bei sich schnell am Mikrophon vorbeibewegenden Quellen auf Grund der kleinen zeitlichen Ausdehnung des Ereignisses nicht zu gross sein um den Quellenwert nicht zu unterschätzen. Eine gleitende Mittelung mit der Zeitkonstanten FAST (125 ms) stellt diesbezüglich einen guten Kompromiss dar.

Eine sich mit der Geschwindigkeit v im Abstand d an einem Aufpunkt vorbeibewegende Punktquelle erzeugt dort einen Schalldruckeffektivwert p in Abhängigkeit der Zeit t

$$p(t) \sim \frac{1}{\sqrt{d^2 + (vt)^2}} \quad (2.1)$$

Die Auswertung der gleitenden Mittelung mit der Zeitkonstanten RC ergibt sich zu

$$x_{\text{eff}}(t) = \sqrt{\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t p^2(\tau) e^{-\frac{\tau-t}{RC}} d\tau} \quad (2.2)$$

Der Effekt der Pegelunterschätzung wirkt sich vorwiegend bei hohen Geschwindigkeiten aus. In diesem Bereich wird bei Strassenverkehrslärm das Fahrzeuggeräusch durch das Rollgeräusch dominiert. Die obige Annahme einer Punktquelle ist daher nicht gegeben. Die Betrachtung wird in dem Sinne erweitert, dass entlang der Fahrtrichtung von zwei Punktquellen im Abstand der Fahrzeugachsen ausgegangen wird. Für Personenwagen wird dieser Abstand zu 2.2 m, für Lastwagen zu 6 m angenommen. Gl. 2.1 erweitert sich dabei zu

$$p(t) \sim \frac{1}{\sqrt{d^2 + (vt)^2}} + \frac{1}{\sqrt{d^2 + (vt + \text{Abstand})^2}} \quad (2.2.a)$$

Für einen Mikrophonabstand $d = 7.5 \text{ m}$ und einen Wert der Zeitkonstanten $RC = 125 \text{ ms}$ (FAST) ergibt die numerische Auswertung von (2.2) eine systematische Unterschätzung des Maximalpegels nach Figur 2.1. Die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit kann durch Gl. 2.3 für Personenwagen bzw. Gl. 2.4 für Lastwagen approximiert werden.

$$\text{Pegelunterschätzung [dB] (Personenwagen)} = 0.0025 v + 0.000024 v^2 \quad (2.3)$$

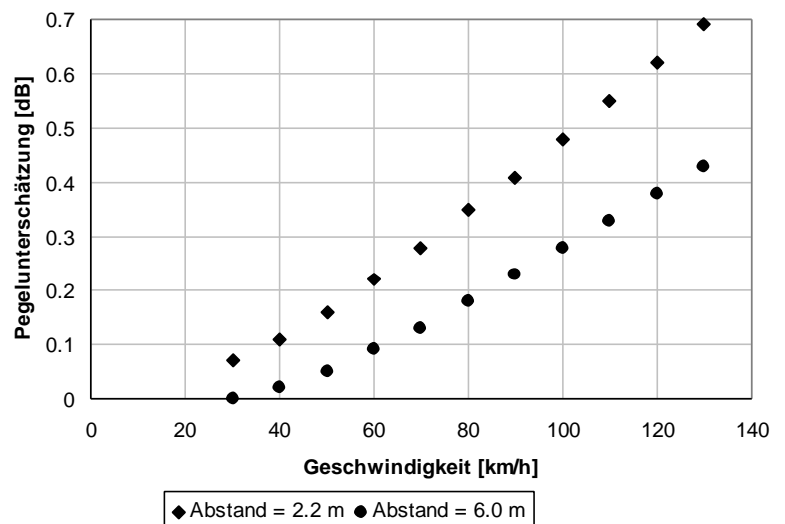
mit $v =$ Geschwindigkeit in km/h

$$\text{Pegelunterschätzung [dB] (Lastwagen)} = -0.00036 v + 0.0000306 v^2 \quad (2.4)$$

mit $v =$ Geschwindigkeit in km/h

Figur 2.1:

Pegelunterschätzung eines sich in einer Distanz von 7.5 m vorbeibewegenden Punktquellenpaars (Abstände längs der Fahrtrichtung: 2.2 m bzw. 6.0 m) in Funktion der Geschwindigkeit bei einer Messung mit der Zeitkonstanten FAST.



Die Abschätzung der Messgenauigkeit einer Effektivwertbestimmung eines stochastischen Signals führt auf die Ermittlung der Anzahl Freiheitsgrade n mit

$$n = 4 B RC \quad (2.5)$$

wobei B der Signalbandbreite und RC der Zeitkonstanten entspricht^{2,3}.

Eine einzelne Messung im Sinne einer Stichprobe liegt mit der Wahrscheinlichkeit p im Intervall I um den wahren Wert herum⁴ mit

² J. T. Broch, Principles of Analog and Digital Frequency Analysis, Tapir, 1981.

³ C. G. Wahrmann, J. T. Broch, On the Averaging Time of RMS Measurements, B&K Technical Review No. 2 (1975).

⁴ Blackman R.B., Tukey J.W. The Measurement of Power Spectra. Dover Publ. 1958.

$$l = \frac{b}{\sqrt{n-1}} \quad [\text{dB}] \quad (2.6)$$

wobei b: 16 für p = 80 %

20 für p = 90 %

29 für p = 98 %

Wenn von einer Bandbreite von 1 kHz ausgegangen wird, liegt bei einer Zeitkonstanten von 125 ms eine Stichprobe mit der Wahrscheinlichkeit von 98 % in einem Intervall von 1.3 dB um den wahren Wert herum. Das Geräusch eines vorbeifahrenden Fahrzeuges kann natürlich zusätzliche Fluktuation aufweisen, die z.B. von Bodenunebenheiten herrühren.

Alle in der Folge beschriebenen Messungen an vorbeifahrenden Fahrzeugen basieren auf dem maximalen, mit der Zeitkonstanten 125 ms (FAST) gemittelten A-Pegel. Die sich daraus ergebende systematische Unterschätzung wurde gemäss (2.3) bzw. (2.4) kompensiert. Die Messunsicherheit bei der Effektivwertbestimmung verkleinert sich durch die grosse Anzahl der Einzelmessungen deutlich und kann damit vernachlässigt werden.

2.2 Ermittlung der Drehzahl aus der Zündfrequenz

Der Hauptparameter des Antriebsgeräusches ist die Motordrehzahl. Die Drehzahl D ist bei Viertaktmotoren über die Anzahl Zylinder Z wie folgt an die Zündfrequenz F gebunden:

$$D = \frac{F \cdot 120}{Z} \quad [\text{U/min}] \quad (2.7)$$

Für Geschwindigkeiten bis etwa 60 km/h ist der Anteil des Antriebsgeräusches am Gesamtgeräusch genügend stark, so dass die Zündfrequenz eines vorbeifahrenden Fahrzeuges im Spektrum einer Schmalbandanalyse zu erkennen ist. Auf diese Weise können durch akustische Beobachtung die Drehzahlen im realen Verkehr bestimmt werden⁵. Ein Augenmerk ist auf die Dopplerverschiebung zu richten. Die massgebende Frequenz wird in dem Zeitpunkt erreicht, da das Fahrzeug gerade auf Mikrofonhöhe ist. Da dieser Übergang bei kleinem Mikrofonabstand zur Strasse sehr steil ist, wird der Wert am leichtesten aus einer Wasserfalldarstellung des Spektrums als Mittelwert der beiden Frequenzen für das sich auf das Mikrofon zu- bzw. vom Mikrofon wegbewegende Fahrzeug bestimmt.

⁵ H.-J. Giesler, A. Nolle, A. Albrecht, Geräuschemission und Motordrehzahl von PKW im Stadtverkehr. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 33, (1986) 102..108.

2.3 Umrechnung vom maximalen Vorbeifahrtpegel auf den Leq

Unter der Voraussetzung, dass eine lange gerade Strasse von $-\infty$ bis $+\infty$ einsehbar ist und keine Zusatzdämpfungen berücksichtigt werden, kann der Leq für eine Fahrzeugpassage pro Stunde wie folgt aus dem maximalen Vorbeifahrtpegel bestimmt werden:

p_Q	maximaler Schalldruckeffektivwert bei Vorbeifahrt in 1 m Abstand
p_0	Bezugsschalldruckeffektivwert 2E-5 Pa
$L_{\max,7.5m}$	maximaler Vorbeifahrtpegel in 7.5 m Abstand
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
d	Abstand Empfänger - Fahrspur
t	Zeit

$$Leq_{1Fz/h} = 10 \log \left(\frac{1}{3600} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right)$$

$$\text{wobei } p(t) = \frac{p_Q}{\sqrt{d^2 + (vt)^2}}$$

mit $dt = \frac{dx}{v}$ wird

$$Leq_{1Fz/h} = 10 \log \left(\frac{p_Q^2}{3600 v p_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{d^2 + x^2} dx \right) = 10 \log \left(\frac{p_Q^2 \pi}{3600 v d p_0^2} \right) \quad (2.8)$$

für v in km/h wird

$$Leq_{1Fz/h} = L_{\max,7.5m} - 7.5 - 10 \log(v_{km/h}) - 10 \log(d) \quad [dB] \quad (2.9)$$

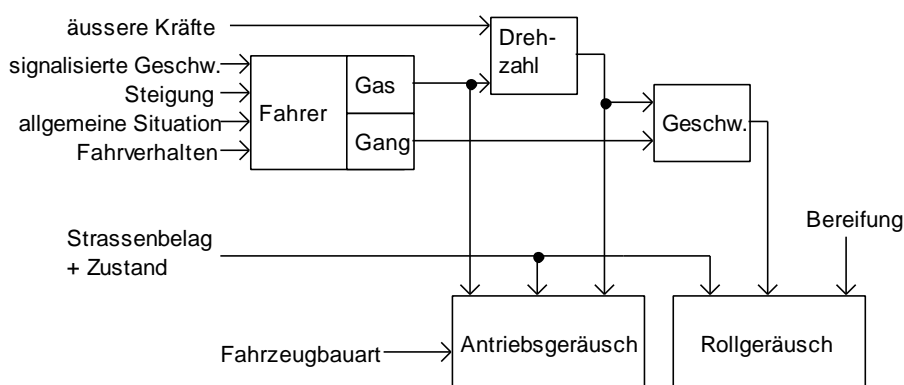
3 Geräuschquellen am Fahrzeug und ihre Einflussparameter

Die Geräusche von benzin- oder dieselmotortriebenen Motorfahrzeugen lassen sich in zwei Klassen unterteilen. Die erste Klasse bilden die Antriebsgeräusche. Diese rühren hauptsächlich vom Motor, dem Getriebe und der Auspuff- bzw. Ansauganlage her. Die Antriebsgeräusche hängen vom Motortyp und dessen Betriebszustand ab. Bei gegebenem Motor sind die Antriebsgeräusche in erster Linie von der Drehzahl und etwas schwächer von der Motorbelastung abhängig. Dagegen ist es unbedeutend, wie schnell sich der Motor auf der Strasse fortbewegt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit hat demnach keinen direkten Einfluss auf das Antriebsgeräusch. Die Rollgeräusche bilden die zweite Klasse von Fahrzeuggeräuschen. Dieser Klasse werden die Geräusche, die sich aus dem Abrollvorgang des

Reifens auf der Fahrbahn ergeben, die Strömungsgeräusche und allfällige Klappergeräusche zugeordnet, wobei die beiden letzten Geräuschquellen in der Regel eine untergeordnete Rolle spielen. Das Abrollgeräusch ist vom Fahrzeug, dem Fahrbahnbelag und der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Die wichtigsten fahrzeugbezogenen Parameter sind das Reifenprofil, die Reifenbreite und das Fahrzeuggewicht. Die wichtigsten lärmbeeinflussenden Eigenschaften des Fahrbahnbelags sind dessen Porosität und die Rauigkeit der Oberfläche unter Berücksichtigung der räumlichen Anordnung der Strukturen.

Ein Fahrzeug stellt hinsichtlich seiner Geräuschentwicklung ein sehr komplexes System dar. Neben den mess- und beschreibbaren Einflussfaktoren kommt dem Verhalten des Fahrzeuglenkers sehr grosse Bedeutung zu. Er wählt aus einer grossen zur Verfügung stehenden Bandbreite den Betriebszustand des Fahrzeugs aus. Die Spanne der vom Fahrer beeinflussbaren Geräuschentwicklung liegt dabei in der Grössenordnung von 5 .. 10 dB. Die Beschreibung von Verkehrslärm kann nur statistisch - als Mittelwert von sehr vielen Einzelfahrzeugen - erfolgen. Die Figur 3.1 zeigt als Blockbild die wichtigsten Pfade und Einflussfaktoren bei der Entstehung des Motorfahrzeuggeräusches.

Fig. 3.1 Blockbild der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Motorfahrzeuggeräusch



4 Messungen

4.1 Personenwagenmessungen in der Ebene

4.1.1 Personenwagen Einzelvorbeifahrt-Emissionsmessungen

Im Juni 1993 wurden an acht Standorten Personenwagenemissionsmessungen durchgeführt. Alle Standorte befanden sich an ebenen Strassenabschnitten, auf denen konstante Fahrweise (keine Beschleunigungsvorgänge) vorherrschte. Dabei wurde je der maximale Vorbeifahrtpegel A, Fast bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung mittels einer Radarpistole erfasst. Zur Kompensation der systematischen Unterschätzung wurde der Vorbeifahrtpegel abhängig von der Geschwindigkeit gemäss Gl. 2.3 korrigiert. In allen Fällen betrug der Mikrofonabstand von der Fahrspurachse 7.5 m, während die Höhe auf 1.2 m festgelegt wurde. Um die Variation des Bodeneinflusses zu minimieren, wurde vom Mikrofon aus gesehen immer die ferne Fahrspur ausgemessen. Damit war gewährleistet, dass die relevante Bodenfläche zwischen Fahrzeug und Mikrofon in jedem Fall

schallhart war. Wo möglich wurde die gefahrene Drehzahl anhand der Zündfrequenz ermittelt. Dies war in etwa 40% aller Vorbeifahrten möglich. Es ist zu beachten, dass daraus nicht vorbehaltlos ein repräsentativer Mittelwert abgeleitet werden kann, da die Stichproben nicht zufällig waren, sondern typischerweise Vorbeifahrten mit starkem Motorgeräusch, d.h. hoher Drehzahl ausgewertet werden konnten.

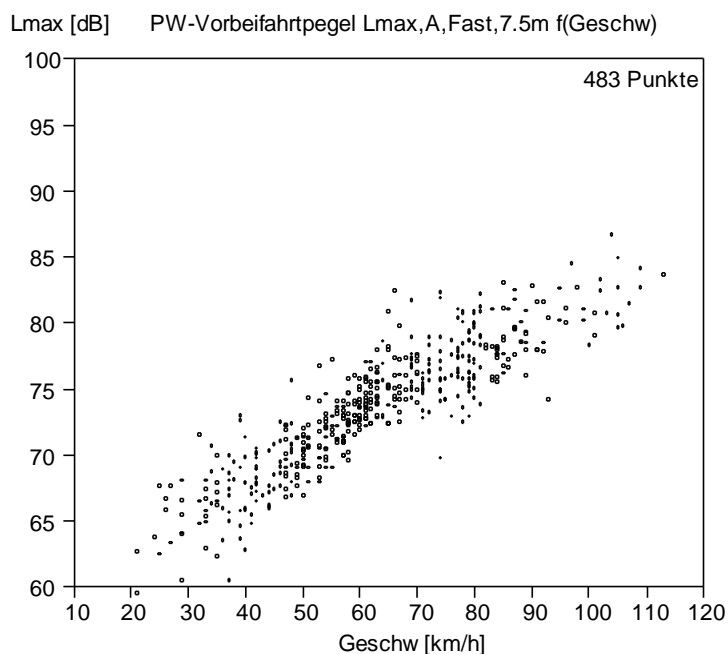
Die Tabelle 4.1 zeigt die Angaben zu den Messungen in einer Übersicht.

Messnr.	Datum	Ort	Anzahl Vorbeifahrten
1	93-06-18	Waldhof, Gutenswil 696 450 / 250 050	58
2	93-06-18	Usterstrasse, Dübendorf 690 400 / 249 900	65
3	93-06-18	Seebacherstrasse / Hürststrasse, ZH-Affoltern 682 240 / 252 500	68
4	93-06-30	Untere Zelglistrasse, Dübendorf 688 700 / 249 935	60
5	93-06-29	Altwiesenstrasse, Schwamendingen 686 635 / 250 725	59
6	93-06-30	Untere Geerenstrasse, Dübendorf 688 785 / 249 180	65
7	93-06-29	Strasse Bisikon - Illnau 695 350 / 251 700	46
8	93-06-29	Alte Winterthurerstrasse, Wallisellen - Bassersdorf 688 375 / 253 800	62
Total			483

Tabelle 4.1 Übersicht der Messreihen für die Personenwagenemissionen

Die Figur 4.1 zeigt eine Darstellung aller 483 Messwerte wobei die maximalen Vorbeifahrtpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aufgetragen sind.

Figur 4.1 Übersicht aller gemessener und nach (2.3) korrigierter maximaler Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit.



Zur Durchführung einer energetischen Mittelung wurde der gesamte Datensatz mit Ausnahme der 'Alten Winterthurerstrasse' (lauter Betonbelag) in Geschwindigkeitsklassen zu 4 km/h zusammengefasst. In jeder Klasse wurde aus den zugehörigen Pegeln der für die Geschwindigkeit repräsentative energetische Mittelwert bestimmt (Tabelle 4.2).

v [km/h]	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
Pegel [dB(A)]	61.4	65.7	65.6	67.6	67.1	68.7	68.1	70.4	71.6	72.6	74	75.1
v [km/h]	68	72	76	80	84	88	92	96	100	104	108	112
Pegel [dB(A)]	75.8	75.6	76.2	76.6	77.8	79	78.9	81.3	80	81.1	82.2	83.8

Tabelle 4.2:

Energetische Mittelwerte aller Messungen in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h.

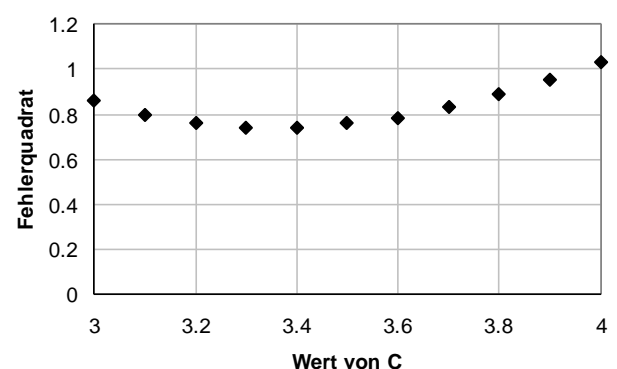
Zum Auffinden eines funktionellen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Pegel wurde ein Ansatz

$$L_{\max,7.5m} = A + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{B} \right)^C \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (4.1)$$

gewählt. Die im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate optimale Parameterkombination ergibt sich zu $A = 61.9$, $B = 27.0$ und $C = 3.3$. Eine genauere Analyse zeigt, dass das Fehlerminimum bezüglich des Parameters C nur schwach ausgebildet ist (Fig. 4.2).

Figur 4.2:

Mittlerer quadratischer Fehler in
Abhängigkeit des Parameters C bei jeweils
optimaler Anpassung von A und B.



Der flache Verlauf des Fehlers bzgl. der Variation des Parameters C (Fig. 4.2) bedeutet, dass in den Messdaten wenig Information zur Wahl von C steckt. Es erscheint daher sinnvoller, hier a priori Wissen einfließen zu lassen und C derart zu bestimmen. Es darf als sicher angenommen werden, dass für hohe Geschwindigkeiten das Gesamtgeräusch durch das Rollgeräusch dominiert wird. Der Parameter C wird demzufolge so gewählt, dass er die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollgeräusches richtig beschreibt. Zur Frage des Rollgeräusches existieren viele Untersuchungen. Praktisch alle finden einen Zusammenhang der Form $L_{\max} = x + 10 \log(v^C)$. Die Tabelle 4.3 zeigt in einer Übersicht die gefundenen Werte für C.

Quelle	PW	LKW
R. Hofmann Strassenverkehrslärm innerorts. Schlussbericht SOKO II, EMPA-Bericht 10'466, 1979	3.5	3.5
S. Ullrich Massnahmen zur Rollgeräuschminderung an Reifen und Fahrbahnen. Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik - Gesundheitsingenieur 107 (1986)	3.5	
W. Betzl Untersuchungen über das Geräuschverhalten von Kraftfahrzeugen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik Heft 267 1980	3.7	
H. W. Stumpf Linking Evaluation of Heavy Truck Tyre Noise, Measured by ISO 362, with Scale Factors for Sound Intensity. International Tire/Road Noise Conference 1990, Introc 90		3.7
Erfassung des Wissensstandes über Reifen-/Fahrbahngeräusche beim Nutzfahrzeug. Forschungsvereinigung Automobiltechnik Schriftenreihe Nr. 97, 1992		3.5 4.3 2.9
P. Nelson Transportation Noise Reference Book, Butterworth 1987	2.9 .. 4.3	
S. Ullrich Lärmindernde Strassendecken: Akustische Untersuchungen. Internationaler Erfahrungsaustausch über lärmindernde Strassendecken, Bergisch Gladbach, 1987	3.5	
J. W. Biermann Kraftfahrzeugverkehrslärm - Ursachen sowie Minderungsmöglichkeiten im Fahrzeugbereich. Habilitationsschrift RWTH Aachen 1988	3.5	3.5
L. Ahsberg The Influence of Tyre/Road Noise on Heavy Vehicle Noise During Type Approval Testing. International Tire/Road Noise Conference 1990, Introc 90, 1990		3.8
H. Steven Einfluss der Fahrweise auf die Geräuschemission eines Kraftfahrzeugs. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 30, 1983	3.3	

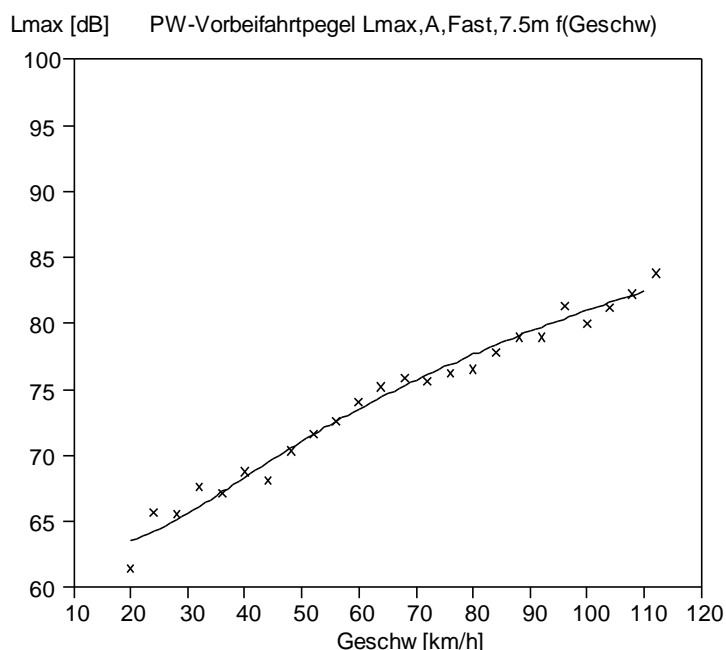
Tabelle 4.3: In der Literatur beschriebene Untersuchungen zur Rollgeräuschpegel - Geschwindigkeitsabhängigkeit und die gefundenen Exponenten C in $L_{max} = x + 10 \log(v^C)$.

Auf Grund der beschriebenen Werte für den Exponenten und der eigenen Rollgeräuschmessungen (Abschnitt 4.1.3) wird der Parameter C zu 3.5 angesetzt. Daraus ergeben sich die optimalen Werte für die verbleibenden Parameter zu A = 62.6 und B = 30.0. So wird schliesslich die Geschwindigkeitsabhängigkeit des maximalen Vorbeifahrtpegels für PW's:

$$L_{\max,7.5m} = 62.6 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{30} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (4.2)$$

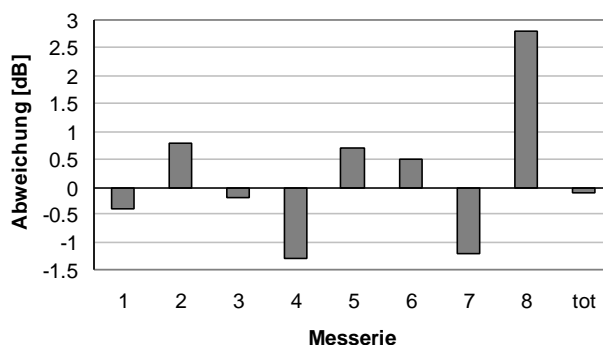
Die Figur 4.3 zeigt die auf den Messungen basierenden Klassenmittelwerte und die Beschreibung durch die Gleichung 4.2 im Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 110 km/h.

Figur 4.3:
*Energetisch gebildete
 Klassenmittelwerte aller Vorbeifahrten mit Ausnahme der Messungen auf der 'Alten Winterthurerstrasse' und Beschreibung der Pegel - Geschwindigkeitsabhängigkeit nach Gleichung 4.2.*



Um allfällige systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Messstellen zu entdecken, wurde die Gleichung 4.2 separat auf die Daten jeder Messstelle angewendet. Als Grösse wurde der SEL für die Vorbeifahrten aller gemessenen Personenwagen herangezogen. Unter der Annahme einer runden Abstrahlcharakteristik lässt sich der SEL einer Vorbeifahrt aus der Geschwindigkeit und dem maximalen Vorbeifahrtpegel berechnen (Kap. 2). Im einen Fall wurden dabei zu den gemessenen Geschwindigkeiten die gemessenen Pegel eingesetzt, im anderen Fall wurden die Pegel gemäss Gleichung 4.2 berechnet. Die Figur 4.4 zeigt die Differenzen der in diesem Sinn gemessenen und berechneten SEL Werte für jede Messerie.

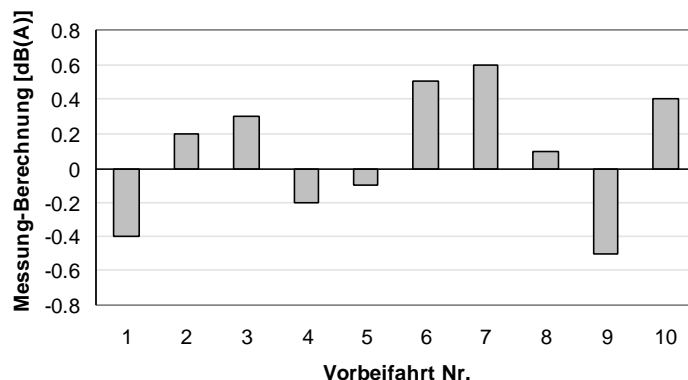
Figur 4.4:
Vergleich der SEL-Werte basierend auf den gemessenen Geschwindigkeiten und den gemessenen Pegeln bzw. auf den gemessenen Geschwindigkeiten und den gemäss Gleichung 4.2 berechneten Pegeln für die Messerien 1 .. 8 und für den totalen Datensatz.



Die Figur 4.4 zeigt, dass der SEL der Messerien 1 .. 7 mit der Gleichung 4.2 auf ± 1.3 dB genau beschrieben wird. Damit ist bestätigt, dass die Betriebszustände der Fahrzeuge bis auf die unterschiedliche Geschwindigkeit vergleichbar waren. Der Ausreisser Serie 8 ist auf den lauten Betonbelag zurückzuführen. Diese Serie wurde deshalb bei der Ableitung des Pegel-Geschwindigkeitszusammenhangs (Gl. 4.2) nicht berücksichtigt.

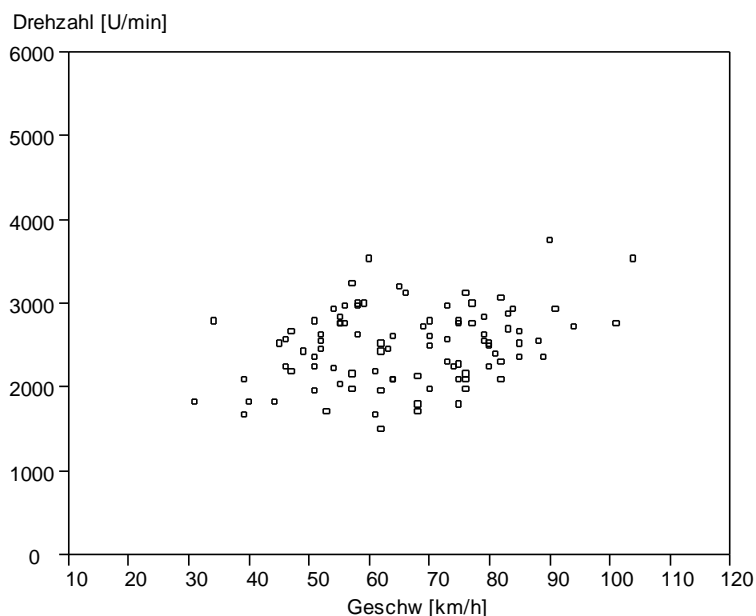
Um die Annahme der horizontal runden Abstrahlcharakteristik zu verifizieren, wurde für eine kleine Stichprobe der Messungen Waldhof nebst dem maximalen Vorbeifahrtpegel auch der SEL gemessen. Aus dem maximalen Vorbeifahrtpegel wurde dann rechnerisch ebenfalls der SEL bestimmt und mit der Messung verglichen. Die Figur 4.5 zeigt die Unterschiede. Die kleinen Differenzen bestätigen die Annahme der runden Abstrahlcharakteristik.

*Figur 4.5:
Vergleich gemessener und aus dem
maximalen Vorbeifahrtpegel
berechnete SEL-Werte für eine kleine
Stichprobe von 10 Fahrzeugen.*



Die Figur 4.6 zeigt die erfolgreichen Drehzahlmessungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aus allen Serien. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse nicht einem völlig repräsentativen Querschnitt entsprechen, da Vorbeifahrten mit tiefen Drehzahlen und dementsprechend im Vergleich zum Rollgeräusch bescheidenen Motorgeräuschanteil nur selten ausgewertet werden konnten.

*Figur 4.6:
Ausgewertete Drehzahlen in
Abhängigkeit der Geschwindigkeit
für alle Messerien*



4.1.2 Personenwagen Motorgeräusch-Emissionsmessungen

Die Motorgeräuschmessungen wurden auf dem EMPA-Areal in zwei Varianten durchgeführt. Die erste Messung wurde an stillstehenden Fahrzeugen im Leerlauf vorgenommen, bei der zweiten Messung wurden die maximalen Vorbeifahrtpegel bei Vollgas (=Vollast) erfasst. In beiden Fällen interessierte der Zusammenhang zwischen Motorgeräuschpegel und Drehzahl.

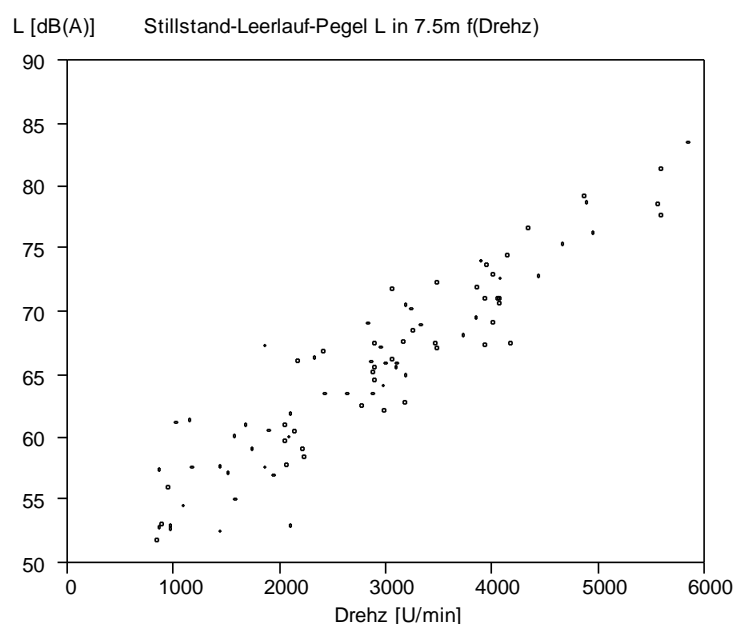
Die Messsituation war in allen Fällen identisch. Der Untergrund war schallhart. Die Mikrofonposition war immer seitlich unter 90° bzgl. der Fahrzeugachse in einem Abstand von 7.5 m und in einer Höhe von 1.2 m.

An den Leerlauf-Stillstandmessungen beteiligten sich 32 EMPA- und EAWAG-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter mit ihren Fahrzeugen. Für die Messung wurden die Motoren im Leerlauf (kein Gang eingelegt) bei ca. 2000, 3000 und 4000 U/min betrieben. Vom Mikrophonsignal wurde eine DAT-Aufnahme gemacht anhand derer anschliessend im Labor der A-Pegel und via Spektrum die exakte Drehzahl ermittelt wurde.

Für die Vollast-Vorbeifahrtmessungen standen nur 12 Fahrzeuge zur Verfügung. Die Fahrzeuge fuhrten im ersten Gang mit Vollgas (= Vollast) an der Messstelle vorbei. Mit einem Synchronisationssignal wurde auf der Aufnahme jeweils der Moment gekennzeichnet, da sich das Fahrzeug auf Mikrofonhöhe befand. Bei der Laborauswertung wurde schliesslich für diesen Zeitpunkt der A-Pegel und die Drehzahl bestimmt.

Die Figur 4.7 zeigt die Pegel-Drehzahl-Punktepaare für die Stillstand-Leerlaufmessungen.

Figur 4.7 Motorgeräusch-Pegel im Leerlauf im Abstand von 7.5 m in Abhängigkeit der Drehzahl für alle 32 untersuchten Fahrzeuge. Jedes Fahrzeug wurde bei ca. drei verschiedenen Drehzahlen betrieben.

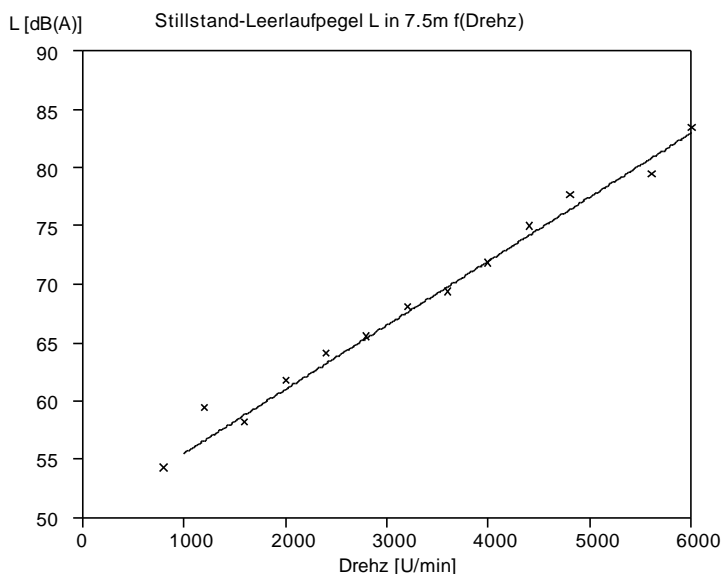


Es zeigt sich eine bemerkenswerte Streuung der Motorgeräuschpegel bei gleicher Drehzahl von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp. Zur Durchführung einer energetischen Mittelung wurde der Datensatz aus Figur 4.7 in Drehzahlklassen zu 400 U/min zusammengefasst. In jeder Klasse wurde aus den zugehörigen Pegeln der energetische Mittelwert bestimmt. Die Figur 4.8 zeigt die Klassenmittelwerte und die Beschreibung der Pegel-Drehzahl-Abhängigkeit mit der linearen Beziehung:

$$L_{7.5m} = 50.0 + 0.0055 D \quad [\text{dB(A)}] \quad (4.3)$$

wobei D der Drehzahl in U/min entspricht.

*Figur 4.8:
Energetisch gebildete Klassenmittel-
werte und Gerade nach Gleichung 4.3
für den Datensatz aus Figur 4.7.*

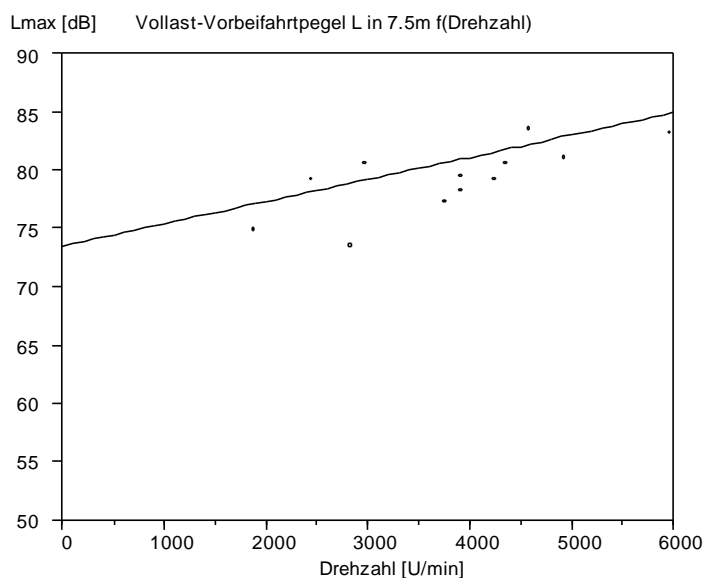


Die Drehzahl-Pegel-Punktpaare für die Vollast-Vorbeifahrtmessungen sind in Figur 4.9 dargestellt. In Ermangelung genügender Datenpunkte konnten hier keine energetischen Klassenmittelwerte gebildet werden. Die in der Figur 4.9 eingezeichnete Gerade entspricht der Beziehung

$$L_{7.5m} = 73.5 + 0.0019 D \quad [\text{dB(A)}] \quad (4.4)$$

wobei D der Drehzahl in U/min entspricht.

*Figur 4.9:
Motorgeräusch-Pegel bei Vollast im
Abstand von 7.5 m in Abhängigkeit der
Drehzahl für alle 12 untersuchten Fahr-
zeuge und Gerade nach Gleichung 4.4.*



Die Analyse der Figuren 4.8 und 4.9 zeigt, dass sich die Motorbelastung in einer Änderung der Steigung der Geraden für den Pegel-Drehzahl-Zusammenhang manifestiert. Bei einer Drehzahl von etwa 6500 U/min laufen die Kurven zusammen mit der Konsequenz, dass für hohe Drehzahlen die äussere Motorbelastung nicht mehr von Belang ist.

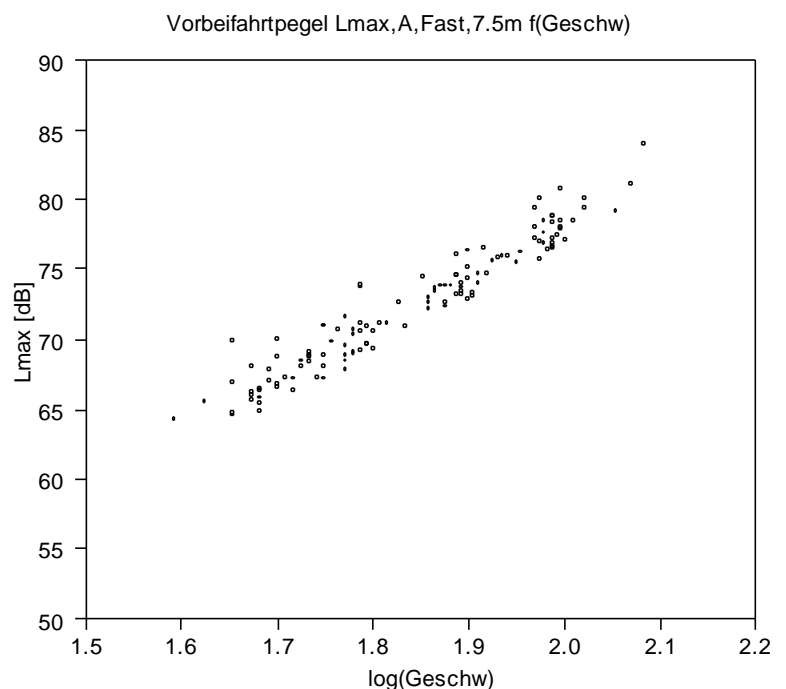
Vorläufig werden die Drehzahl-Untersuchungen nicht weiter verwendet.

4.1.3 Personenwagen Rollgeräusch-Emissionsmessungen

Am 11. Juli 1994 wurden an 14 Fahrzeugen aus der EMPA-Garage und von Mitarbeitern der Abteilung Rollgeräuschmessungen vorgenommen. Als Messstrecke diente ein asphaltiertes Strässchen zwischen Brugglen und Gutenswil oberhalb Volketswil. Das Mikrophon wurde in 7.5 m Entfernung von der Fahrspurachse in einer Höhe von 1.2 m eingerichtet. Von jedem Fahrzeug wurde für acht Vorbeifahrten bei Geschwindigkeiten zwischen 50 und 120 km/h der maximale Vorbeifahrtpegel im ausgekuppelten Zustand registriert. Der Pegel wurde bzgl. der systematischen Unterschätzung als Folge der Zeitkonstanten FAST gemäss (2.3) korrigiert. Mit einer Radarpistole wurde die Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Mikrophonpassage gemessen.

Für die Intensität des Rollgeräuschs ist auf Grund früherer Untersuchungen (Tabelle 4.2) ein exponentieller Zusammenhang mit der Geschwindigkeit zu erwarten. Nach einer logarithmischen Transformation der Geschwindigkeitswerte ist demzufolge mit einer linearen Beziehung zwischen der Pegelgrösse und $\log(v)$ zu rechnen. Damit können die Messdaten mit den Hilfsmitteln der linearen Regression untersucht werden. Die Figur 4.10 zeigt das Punktediagramm der 125 Pegel - Geschwindigkeitspaare, wobei die x-Achse der logarithmierten Geschwindigkeit entspricht.

Figur 4.10:
Übersicht aller 125 gemessener und nach (2.3) korrigierter Rollgeräuschpegel - Geschwindigkeitspaare.



Mit $x = \log(v)$ und $y = L_{Roll7.5m}$ wird die - im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate - optimale lineare Beschreibung $y = \alpha + \beta \cdot x$ gesucht. Der Schätzwert für α ergibt sich zu $a = 5.45$, jener für β wird $b = 36.45$. Der Schätzwert s für die Standardabweichung σ der vertikalen Abweichung der Werte von der Regressionsgeraden ergibt sich mit

x_i, y_i : $\log(v)$ - Rollgeräuschpegel - Paare
 n : Anzahl Messungen

$$\text{zu } s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2} = 1.22 \text{ dB.} \quad (4.5)$$

Die Grössen a und b stellen Schätzungen von α und β dar. Es interessiert nun, wie scharf oder allenfalls wie unscharf diese Schätzungen sind. Der Wert von a bzw. α bewirkt lediglich eine vertikale Verschiebung der Pegel-Geschwindigkeit-Kurve. Interessanter ist der Wert von b bzw. β zur Beschreibung der Steigung. Die Frage nach der Unsicherheit von β kann mit der Bestimmung eines Konfidenzintervalls beantwortet werden. Dabei gilt, dass β mit der Wahrscheinlichkeit $1-p$ im Bereich

$$b \pm \frac{t_{n-2, 1-p/2} \cdot s}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.6)$$

liegt. $t_{n-2, 1-p/2}$ entspricht dem Quantil der t -Verteilung. So liegt β beispielsweise mit 95 % Wahrscheinlichkeit, also mit grosser Sicherheit, im Intervall 36.5 ± 1.8 . Die Berechnung des Konfidenzintervalls für eine 68 % Wahrscheinlichkeit führt auf $\beta = 36.5 \pm 0.9$.

4.2 Lastwagenmessungen in der Ebene

4.2.1 Lastwagen Einzelvorbeifahrt-Emissionsmessungen

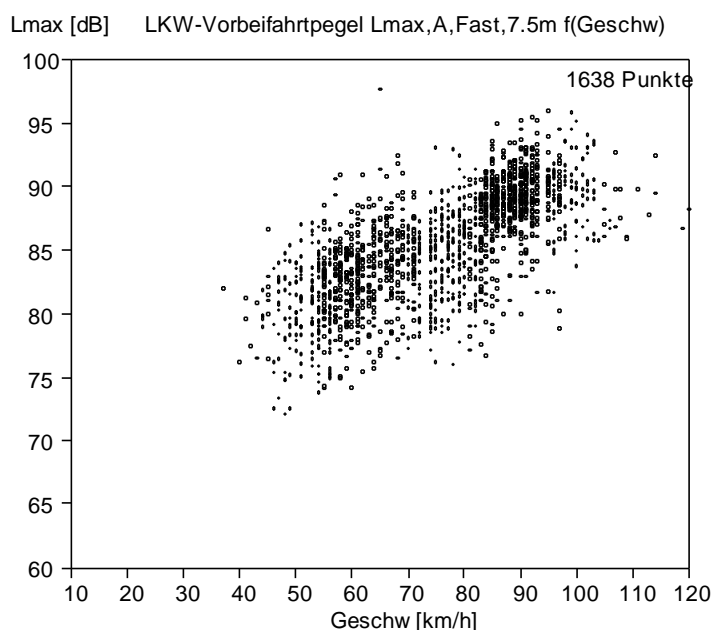
In den Monaten Mai und Juni 1994 wurden an sieben Standorten während elf Messerien à 2 Stunden Lastwagen-Emissionsmessungen durchgeführt. Dabei wurde je der maximale Vorbeifahrtpegel A, Fast bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung mittels einer Radarpistole erfasst. Die Pegel wurden bzgl. der systematischen Unterschätzung gemäss Gl. 2.4 korrigiert. In allen Fällen betrug der Mikrofonabstand von der Fahrspurachse 7.5 m, während die Höhe auf 1.2 m festgelegt wurde. Es wurde konsequent darauf geachtet, dass neben der Fahrspur auf der Mikrofonseite ein weiterer Streifen Asphalt vorhanden war. Das wurde in der Hälfte der Fälle durch Messen der fernen Fahrspur erreicht, in den übrigen Situationen konnte die nahe Fahrspur im Bereich eines Vorplatzes oder Pannenstreifens verwendet werden. Auf diese Weise wurde gleichzeitig sichergestellt, dass sich allenfalls unterschiedliche Lärmabstrahlungen der beiden Fahrzeugseiten (z.B. Auspuff) über die Serien ausmitteln. Die Tabelle 4.4 zeigt die Angaben zu den Messungen in einer Übersicht.

Messnr.	Datum	Zeit	Ort	Anzahl Vorbeifahrten
1	94-05-17	0500 .. 0700	A Wetzikon-Aathal 701 200 / 243 100	64
2	94-05-25	0530 .. 0730	B Wetzikon-Hinwil 702 850 / 241 250	73
3	94-05-25	0900 .. 1100	B Wetzikon-Hinwil 702 850 / 241 250	110
4	94-05-31	0530 .. 0730	C Wetzikon-Hinwil 703 700 / 240 800	77
5	94-05-31	0900 .. 1100	C Wetzikon-Hinwil 703 700 / 240 800	176
6	94-06-02	0515 .. 0715	D Nordring Büssisee 680 900 / 253 800	299
7	94-06-02	0850 .. 1050	D Nordring Büssisee 680 900 / 253 800	371
8	94-06-08	0520 .. 0720	E Wetzikon 701 750 / 242 550	92
9	94-06-08	0930 .. 1130	F Aathal 700 600 / 243 600	140
10	94-06-28	0500 .. 0700	G Aubrugg 685 700 / 251 800	94
11	94-06-28	0945 .. 1130	G Aubrugg 685 700 / 251 800	142
Total				1638

Tabelle 4.4 Übersicht der Messreihen für die Lastwagenemissionen

Die Figur 4.11 zeigt eine Darstellung aller 1638 Messwerte wobei die maximalen Vorbeifahrtpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aufgetragen sind. Die Figur zeigt gegenüber den PW-Messungen eine wesentlich ausgedehntere Punktwolke mit einer grossen Spanne der Pegel bei gleicher Geschwindigkeit. Dies ist vor allem auf die breit gefasste Kategorie Lastwagen zurückzuführen. Das herangezogene Klassenkriterium der Doppelbereifung reicht von schweren Lieferwagen bis hin zu den grossen 16 Tönnern.

Figur 4.11:
Übersicht aller 1'638 gemessener und nach (2.4) korrigierter maximaler Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit.



Zur Durchführung einer energetischen Mittelung wurde der gesamte Datensatz in Geschwindigkeitsklassen zu 4 km/h zusammenfasst. In jeder Klasse wurde aus den zugehörigen Pegeln der für die Geschwindigkeit repräsentative energetische Mittelwert bestimmt (Tabelle 4.5).

v [km/h]	40	44	48	52	56	60	64	68
Pegel [dB(A)]	79.1	81.4	80.9	82.2	82.7	83.2	85.4	85.3
v [km/h]	72	76	80	84	88	92	96	100
Pegel [dB(A)]	84.5	85.5	86.5	88.2	89.5	90.2	89.8	90.6

Tabelle 4.5:

Energetische Mittelwerte aller LKW-Messungen in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h.

Zum Auffinden eines funktionellen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Pegel wurde wie im Falle der PW's ein Ansatz

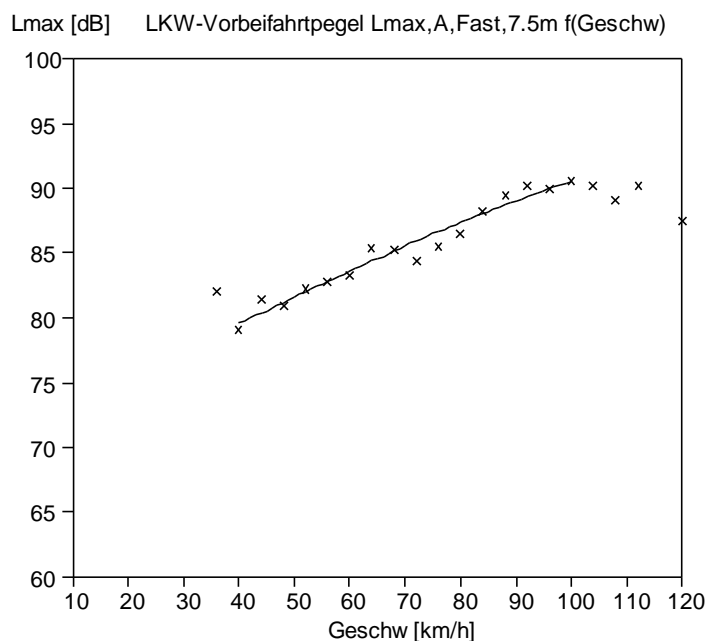
$$L_{\max,7.5m} = A + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{B} \right)^C \right) \quad [\text{dB(A)}]$$

gewählt. Die im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate optimale Parameterkombination ergibt sich zu $A = 78.5$, $B = 50.0$ und $C = 4.0$. Wie bei den PW's ist das Fehlerminimum bzgl. des Parameters C nur schwach ausgebildet. Aus den gleichen Überlegungen heraus wurde deshalb für C ein Wert von 3.5 angesetzt. Daraus ergeben sich die optimalen Werte für die verbleibenden Parameter zu $A = 76.8$ und $B = 41.0$. So wird schliesslich die Geschwindigkeitsabhängigkeit des maximalen Vorbeifahrtpegels für LKW's:

$$L_{\max,7.5m} = 76.8 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{41} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (4.7)$$

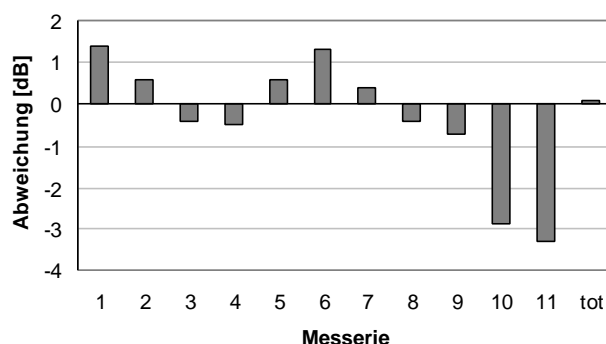
Die Figur 4.12 zeigt die auf den Messungen basierenden Klassenmittelwerte und die Beschreibung durch die Gleichung 4.7 im Geschwindigkeitsbereich von 40 bis 100 km/h.

*Figur 4.12:
Energetisch gebildete
Klassenmittelwerte aller Vorbeifahrten
und Beschreibung der Pegel -
Geschwindigkeits - Abhängigkeit nach
Gleichung 4.7.*



Um allfällige systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Messstellen zu entdecken, wurde die Gleichung 4.7 separat auf die Daten jeder Messerie angewendet. Als Grösse wurde der SEL für die Vorbeifahrten aller gemessenen Lastwagen herangezogen. Im einen Fall wurden dabei zu den gemessenen Geschwindigkeiten die gemessenen Pegel eingesetzt, im anderen Fall wurden die Pegel gemäss Gleichung 4.7 berechnet. Die Figur 4.13 zeigt die Differenzen der in diesem Sinn gemessenen und berechneten SEL Werte für jede Messerie.

*Figur 4.13:
Vergleich der SEL-Werte basierend auf den
gemessenen Geschwindigkeiten und den
gemessenen Pegeln bzw. auf den gemessenen
Geschwindigkeiten und den gemäss
Beziehung 4.7 berechneten Pegeln für die
Messereien 1 .. 11 und für den totalen Daten-
satz.*



Die Figur 4.13 zeigt, dass der SEL der Messereien 1 .. 9 mit der Beziehung 4.7 auf ± 1.4 dB genau beschrieben wird. Zum einen wurde offensichtlich jeweils ein genügend repräsentativer Fahrzeugmix erfasst, zum anderen waren die Betriebszustände der Fahrzeuge - bis auf die Geschwindigkeit - vergleichbar. Ein Belageinfluss kann nicht festgestellt werden, da die Streuungen zwischen zwei Messungen am gleichen Standort bereits in der Grössenordnung von 1 dB liegen. Die Messreihen 10 und 11 (Autobahn Aubrugg) liegen im Pegel um etwa 3.5 dB tiefer als die Prognosen mit der Gleichung 4.7 ergeben würden. Dies muss auf einen abweichenden Betriebszustand der Fahrzeuge

zurückzuführen sein. Da sich der Messpunkt bei leichtem Gefälle im Bereich einer Kurve befand, wurde vermutlich von vielen Fahrern das Gas zurückgenommen.

4.3 Personenwagenmessungen an Steigungen

Im Zeitraum September 1994 bis November 1995 wurden an 11 Standorten Personenwagenemissionsmessungen an Steigungs- und Gefällstrecken durchgeführt. Dabei wurde für jede Vorbeifahrt der maximale Pegel A, Fast bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung mittels einer Radarpistole erfasst. Die systematische Pegelunterschätzung wurde gemäss (2.3) korrigiert. In allen Fällen betrug der Mikrofonabstand zur Fahrspurachse 7.5 m, die Mikrofonhöhe war 1.2 m. Der Boden zwischen Fahrzeug und Mikrofon war in allen Fällen hart. Dies wurde meistens dadurch erreicht, dass die ferne Fahrspur verwendet wurde. Die Tabelle 4.6 zeigt eine Übersicht der Messorte.

Messnr.	Datum	Steigung [%]	Ort	Anzahl Vorbeifahrten
1	94-09-06	+ 6	Illnau-Volketswil	51
2	94-09-06	- 6	Illnau-Volketswil	74
3	95-10-11	+ 8	Gsteigstrasse Zürich-Höngg	97
4	95-10-11	- 8	Gsteigstrasse Zürich-Höngg	90
5	95-10-11	+ 5	Tierklinik, Dübendorf-Gockhausen	100
6	95-10-16	+7	Albis-Hausen	91
7	95-10-16	- 6	Albis-Hausen	95
8	95-11-01	+ 7.5	Bözberg, Umiken	72
9	95-11-01	- 6.5	Bözberg, Effikon	81
10	95-11-01	+ 8	Bözberg	97
11	95-11-07	+ 8	Staffelegg	116

Tabelle 4.6 Übersicht der Messreihen für die Personenwagenemissionen an Steigungs- und Gefällstrecken.

Zur weiteren Auswertung wurden alle Messungen an Steigungen im Bereich +6 .. +8 % und im Bereich -6 .. -8 % je zusammengefasst. Die Figuren 4.14 a und b zeigen die einzelnen Messungen, in den Figuren 4.15 a und b wurde die Klassenbildung in Geschwindigkeitsbereiche à 4 km/h vorgenommen. Die Klassenmittelwerte sind überdies in den Tabellen 4.7 a und b gezeigt.

v [km/h]	24	32	36	40	44	48	52	56
Pegel [dB(A)]	76.3	69.5	71.6	73.9	75	73.7	74.1	74.5

v [km/h]	60	64	68	72	76	80	88	96
Pegel [dB(A)]	77.2	76.2	77.4	77.7	78.6	79.8	79	83.5

Tabelle 4.7 a:

Energetische Mittelwerte aller PW-Messungen im Steigungsbereich +6 .. +8% in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h .

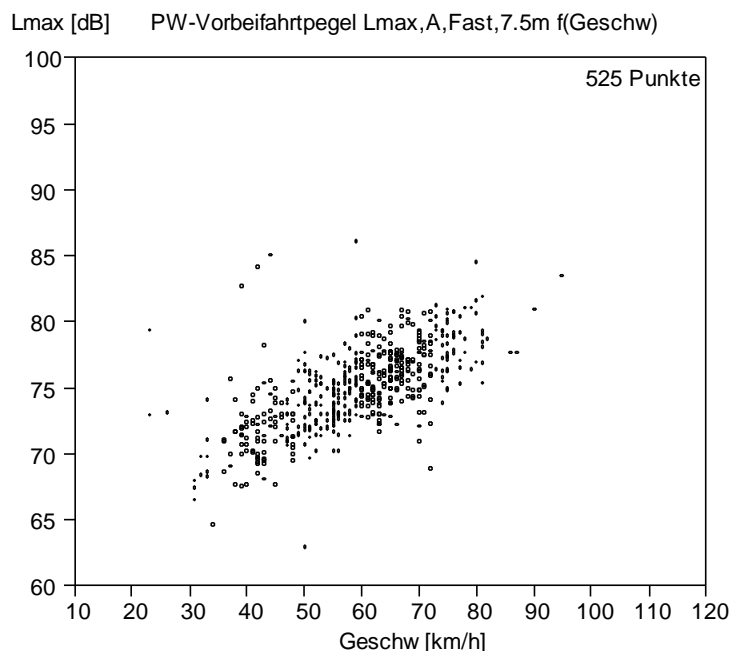
v [km/h]	36	40	44	48	52	56	60	64
Pegel [dB(A)]	69.6	71.4	71.9	72.3	72.7	73.5	73.3	74.6

v [km/h]	68	72	76	80	84	88	92	96
Pegel [dB(A)]	75.4	75.8	76.2	76.9	77.2	77.8	78.1	79.6

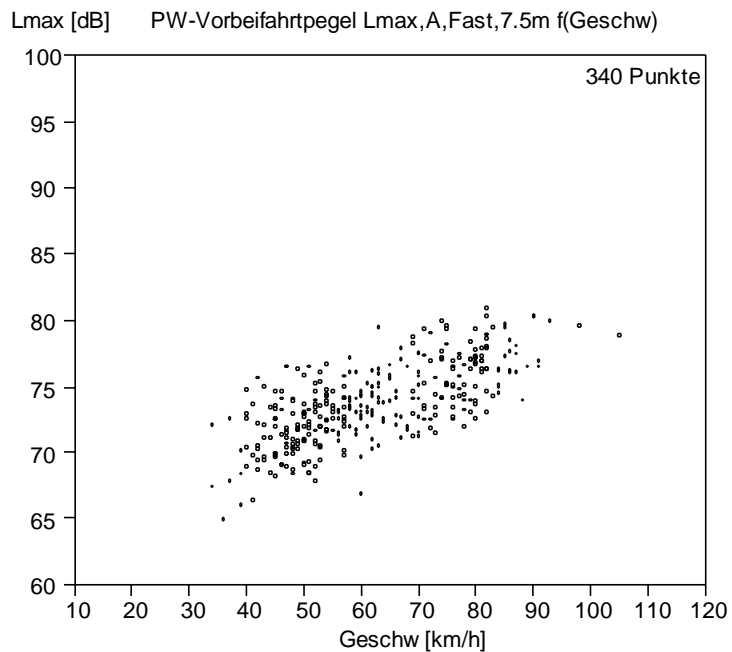
Tabelle 4.7 b:

Energetische Mittelwerte aller PW-Messungen im Steigungsbereich -6 .. -8% in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h .

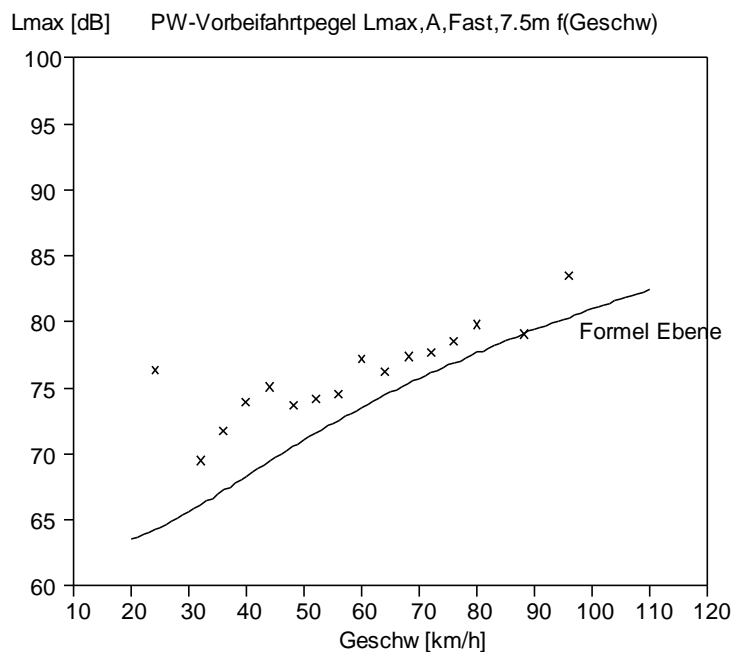
Figur 4.14.a:
Übersicht aller gemessener und nach (2.3) korrigierter maximaler Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für Steigungen im Bereich +6 .. + 8 %.



*Figur 4.14.b:
Übersicht aller gemessener und nach
(2.3) korrigierter maximaler
Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in
Abhängigkeit der gefahrenen
Geschwindigkeit für Steigungen im
Bereich -6 .. -8 %.*

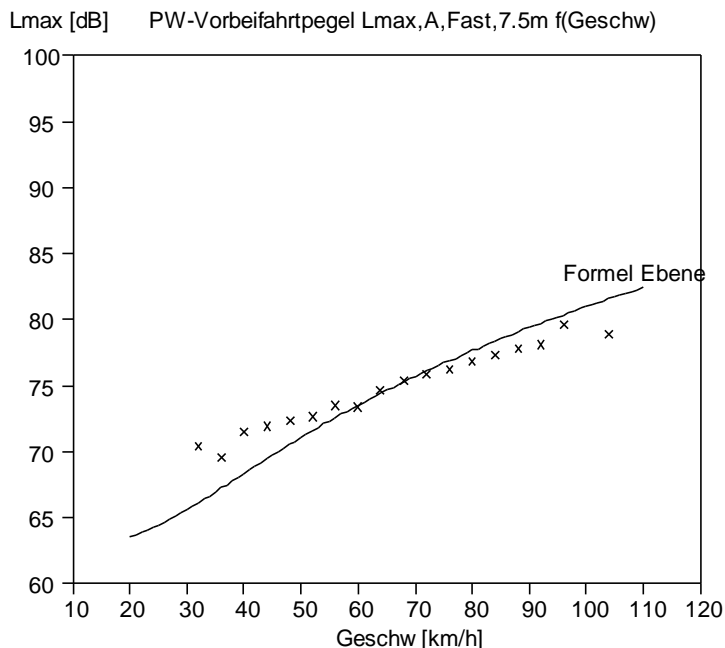


*Figur 4.15.a:
Energetisch gebildete Klassenmittel-
werte aller Vorbeifahrten im Stei-
gungsbereich +6 .. +8%. Die Kurve
zeigt die Pegel-Geschwindigkeitsbe-
ziehung für die Ebene.*



Figur 4.15.b

Energetisch gebildete Klassenmittlwerte aller Vorbeifahrten im Steigungsbereich -6 .. -8%. Die Kurve zeigt die Pegel-Geschwindigkeitsbeziehung für die Ebene.



4.4 Lastwagenmessungen an Steigungen

Im Zeitraum September 1994 bis November 1995 wurden an 11 Standorten Lastwagenemissionsmessungen an Steigungs- und Gefällstrecken durchgeführt. Dabei wurde für jede Vorbeifahrt der maximale Pegel A,Fast bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung mittels einer Radarpistole erfasst. Die Pegel wurden bzgl. der systematischen Unterschätzung gemäss Gl. 2.4 korrigiert. In allen Fällen betrug der Mikrofonabstand zur Fahrspurachse 7.5 m, die Mikrofonhöhe war 1.2 m. Der Boden zwischen Fahrzeug und Mikrofon war in allen Fällen hart. Dies wurde meistens dadurch erreicht, dass die ferne Fahrspur verwendet wurde. Die Tabelle 4.8 zeigt eine Übersicht der Messorte.

Messnr.	Datum	Steigung [%]	Ort	Anzahl Vorbeifahrten
1	94-09-06	+ 6	Illnau-Volketswil	9
2	94-09-06	- 6	Illnau-Volketswil	8
3	95-10-11	+ 8	Gsteigstrasse Zürich-Höngg	26
4	95-10-11	- 8	Gsteigstrasse Zürich-Höngg	15
5	95-10-11	+ 5	Tierklinik, Dübendorf-Gockhausen	11
6	95-10-16	+7	Albis-Hausen	12
7	95-10-16	- 6	Albis-Hausen	8
8	95-11-01	+ 7.5	Bözberg, Umiken	73
9	95-11-01	- 6.5	Bözberg, Effikon	64
10	95-11-01	+ 8	Bözberg	48
11	95-11-07	+ 8	Staffelegg	32

Tabelle 4.8 Übersicht der Messreihen für die Lastwagenemissionen an Steigungs- und Gefällstrecken.

Zur weiteren Auswertung wurden alle Messungen an Steigungen im Bereich +6 .. +8 % und im Bereich -6 .. -8 % je zusammengefasst. Die Figuren 4.16 a und b zeigen alle Messpunkte, in den Figuren 4.17 a und b wurde die Klassenbildung in Geschwindigkeitsbereiche à 4 km/h vorgenommen. Die Klassenwerte sind überdies in den Tabellen 4.9 a und b gezeigt.

v [km/h]	20	24	28	32	36	40	44	48
Pegel [dB(A)]	85.7	84.4	82.4	84.8	82.6	83.8	84.7	84.6

v [km/h]	52	56	60	64	68	72	76	80
Pegel [dB(A)]	83.8	87.4	88.9	86.2	87.4	86.6	84.8	83.8

Tabelle 4.9 a:

Energetische Mittelwerte aller LKW-Messungen im Steigungsbereich +6 .. +8% in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h .

v [km/h]	28	32	36	40	44	48	52	56
Pegel [dB(A)]	77.9	79.7	78.6	84.2	78.6	81.2	79.8	82.9

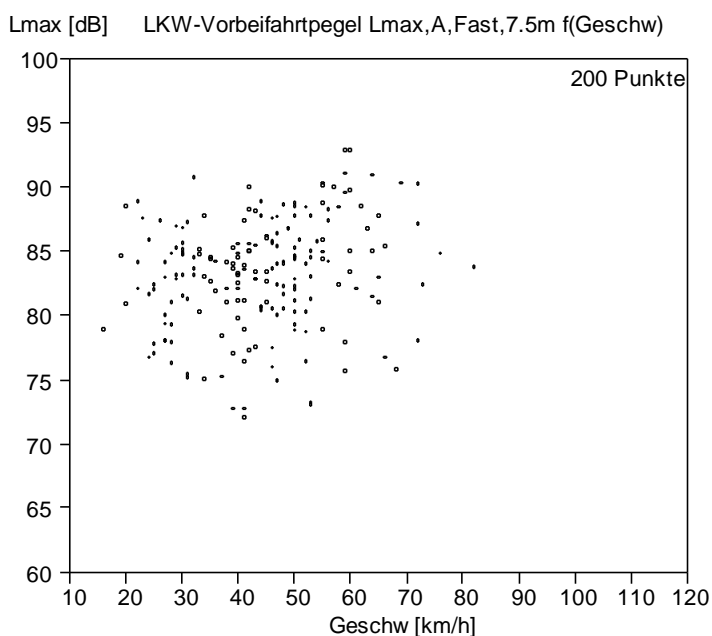
v [km/h]	60	64	68	72	76	80	84	88
Pegel [dB(A)]	82	84.5	85.6	84.5	81.1	86.4	78.7	89.9

Tabelle 4.9 b:

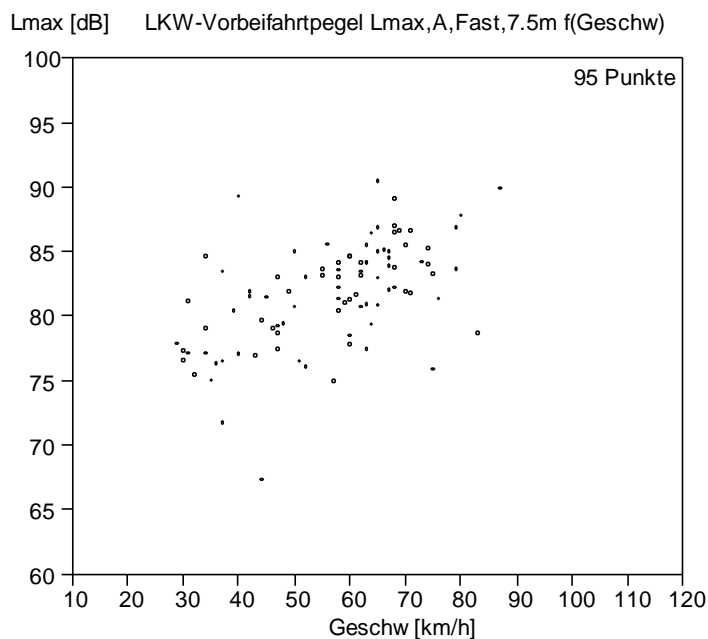
Energetische Mittelwerte aller LKW-Messungen im Steigungsbereich -6 .. -8% in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h .

Figur 4.16.a:

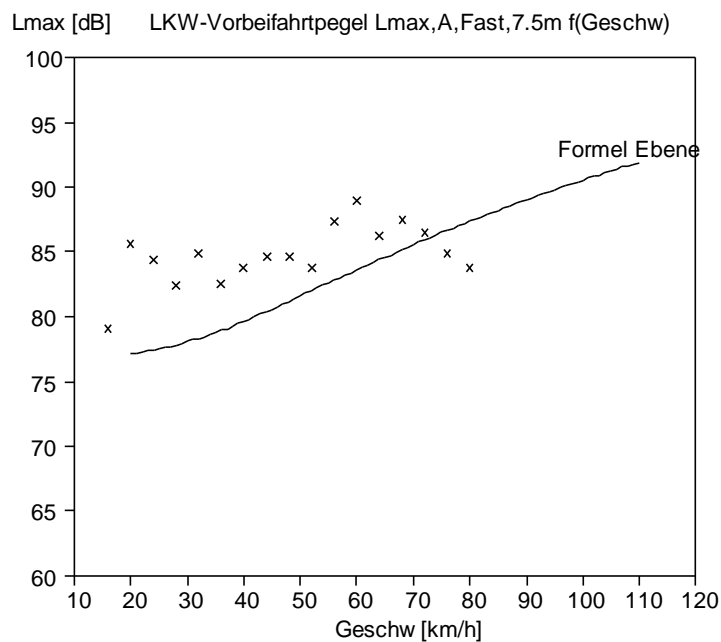
Übersicht aller gemessener und nach (2.4) korrigierter maximaler Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für Steigungen im Bereich +6 .. + 8 %.



*Figur 4.16.b:
Übersicht aller gemessener und nach
(2.4) korrigierter maximaler
Vorbeifahrtpegel (A, Fast, 7.5 m) in
Abhängigkeit der gefahrenen Ge-
schwindigkeit für Steigungen im Bereich -
6 .. -8 %.*

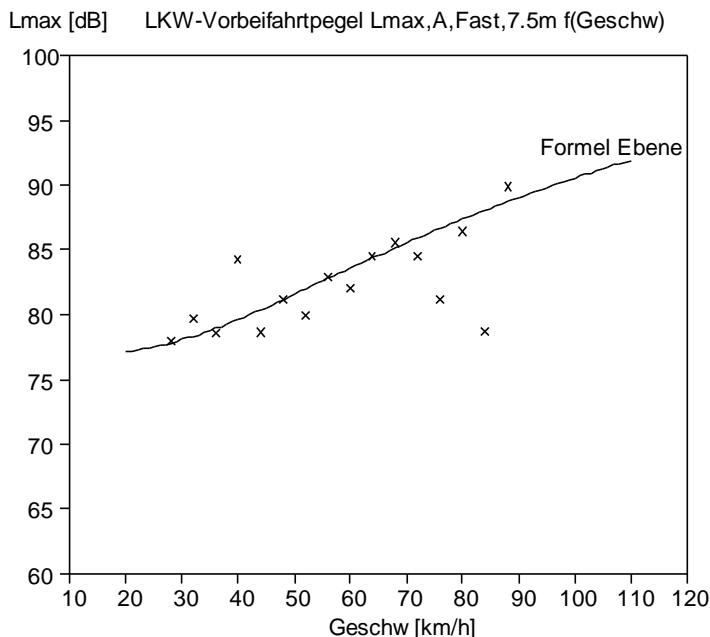


*Figur 4.17.a:
Energetisch gebildete Klassenmit-
telwerte aller Vorbeifahrten im Stei-
gungsbereich +6 .. +8%. Die Kurve
zeigt die Pegel-Geschwindigkeitsbe-
ziehung für die Ebene.*



Figur 4.17.b:

Energetisch gebildete Klassenmittelwerte aller Vorbeifahrten im Steigungsbereich -6 .. -8%. Die Kurve zeigt die Pegel-Geschwindigkeitsbeziehung für die Ebene.



5 Formulierung des neuen Emissionsmodells

5.1 Die Quellenstärke auf ebener Fahrbahn für konstante Geschwindigkeit

5.1.1 A-Pegel

Das neue Modell basiert mit der Unterteilung in die beiden Fahrzeugkategorien PW und LKW und der jeweiligen Auftrennung in die Anteile Antriebs- und Rollgeräusch auf vier verschiedenen Quellenangaben. Als Quellenwerte werden die maximalen Vorbeifahrtpegel in einem seitlichen Abstand von 7.5 m bezüglich der Fahrzeugachse und einer Höhe von 1.2 m über Boden verwendet. Es wird nach wie vor angenommen, dass das Fahrzeug als Punktquelle in einer Höhe von 80 cm über der Strassenoberfläche modelliert werden kann. Mit dieser Annahme ist bei Lastwagen mit hoch gelegener Auspufföffnung insbesondere bei der Abschätzung der Wirkung einer Lärmschutzwand Vorsicht geboten.

Die oben beschriebenen Messergebnisse der Einzelvorbeifahrtpegel des Gesamtgeräusches als Funktion der Geschwindigkeit stellen die Basisgrössen dar. Die Auftrennung in die Anteile Antriebs- und Rollgeräusch stützt sich auf die eigenen Rollgeräuschmessungen an Personenwagen und auf Resultate fremder Untersuchungen^{6,7}. Die Ergebnisse lassen auf einen generellen Rollgeräuschpegel - Geschwindigkeitszusammenhang der Form $x + 35 \log(v)$ schliessen. Unter dieser Voraussetzung wird die einzige verbleibende Unbekannte x für die beiden Kategorien Personenwagen und Lastwagen so bestimmt, dass die Differenz des Gesamtgeräusches und des Rollgeräusches auf einen 'sinnvollen' Antriebsgeräusch - Geschwindigkeitszusammenhang führt. Dabei bedeutet 'sinnvoll', dass

⁶ S. Ullrich, Massnahmen zur Rollgeräuschminderung an Reifen und Fahrbahnen. Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik - Gesundheits - Ingenieur 107 Heft 1 S. 23-28 (1986).

⁷ H. W. Stumpf, Linking Evaluation of Heavy Truck Tyre Noise, Measured by ISO 362, with Scale Factors for Sound Intensity Proceedings of the International Tire/Road Noise Conference 1990.

- das Antriebsgeräusch mit der Geschwindigkeit zunimmt und
- bei tiefen Geschwindigkeiten das Antriebsgeräusch dominiert, währenddem bei hohen Geschwindigkeiten das Rollgeräusch überwiegt.

Für die Kategorie Personenwagen führt ein Wert von x im Bereich 8 .. 10.5 dB zu einem 'sinnvollen' Antriebsgeräusch-Geschwindigkeitsverlauf, für Lastwagen ein Wert von x im Bereich 18 .. 20 dB. Das auf den ersten Blick salopp wirkende Kriterium 'sinnvoll' erweist sich damit als recht scharf, so dass bei der Wahl von x eine Unsicherheit von lediglich 2 bis 2.5 dB verbleibt. Ein weiterer Anhaltspunkt liefert der Steigungszuschlag. Es wird davon ausgegangen, dass ein Zuschlag nur beim Antriebsgeräusch erfolgt. Durch Anpassung bzgl. der Emissions-Messungen an Steigungen ergeben sich die optimalen Werte von x zu 9.5 für PW's und 18.5 für LKW's.

Für konstante Fahrweise auf der geraden Strasse ergeben sich folgende Geschwindigkeitsabhängigkeiten:

Rollgeräusch

$$\text{Personenwagen: } L_{\max, \text{PW Roll}, 7.5\text{m}} = 9.5 + 35 \log(v) \quad [\text{dB(A)}], \quad v \text{ in km/h} \quad (5.1)$$

$$\text{Lastwagen: } L_{\max, \text{LKW Roll}, 7.5\text{m}} = 18.5 + 35 \log(v) \quad [\text{dB(A)}], \quad v \text{ in km/h} \quad (5.2)$$

Antriebsgeräusch

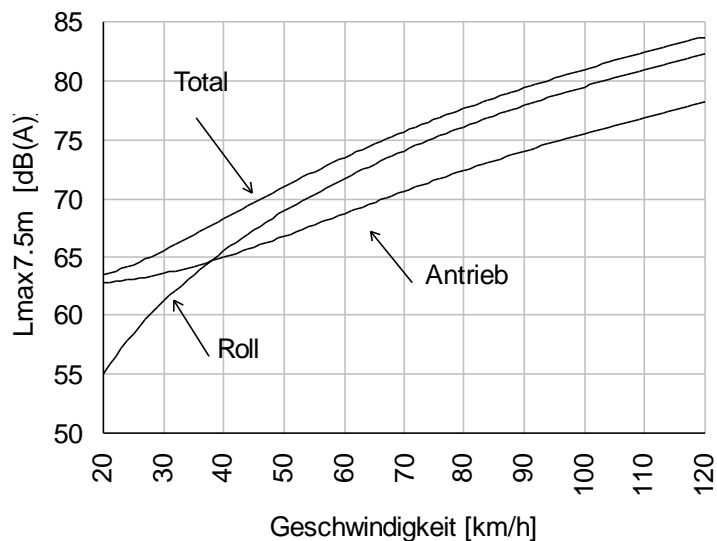
$$\text{Personenwagen: } L_{\max, \text{PW Antrieb}, 7.5\text{m}} = 62.7 + 10 \log\left(1 + \left(\frac{v}{44.0}\right)^{3.5}\right) \quad [\text{dB(A)}], \quad v \text{ in km/h} \quad (5.3)$$

$$\text{Lastwagen: } L_{\max, \text{LKW Antrieb}, 7.5\text{m}} = 76.9 + 10 \log\left(1 + \left(\frac{v}{56.0}\right)^{3.5}\right) \quad [\text{dB(A)}], \quad v \text{ in km/h} \quad (5.4)$$

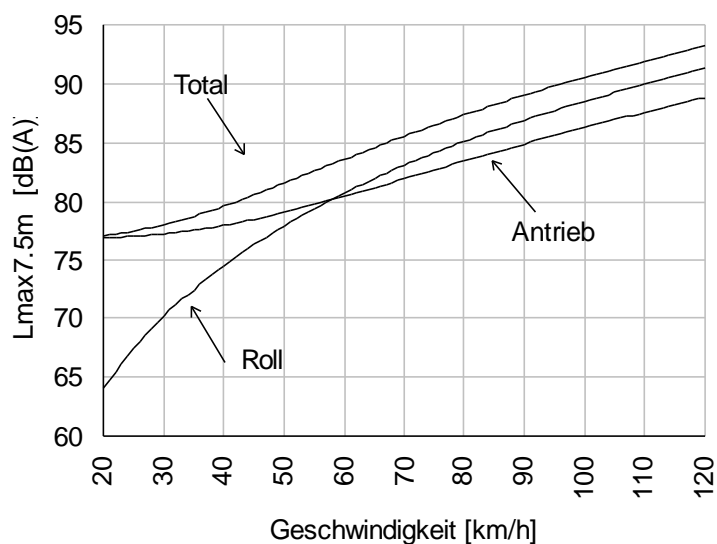
Die energetischen Summen der jeweiligen Roll- und Antriebsgeräuschanteile entsprechen auf 0.1 dB genau den Curve-Fit Beschreibungen des Gesamtgeräusches (4.2 und 4.7).

Die Figuren 5.1 und 5.2 zeigen für die beiden Kategorien Personenwagen und Lastwagen das Roll- und Antriebsgeräusch sowie das Gesamtgeräusch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Man beachte die befriedigende Übereinstimmung mit den PW-Rollgeräuschmessungen aus Abschnitt 4.1.3.

Figur 5.1 Geräuschanteile in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Personenwagen

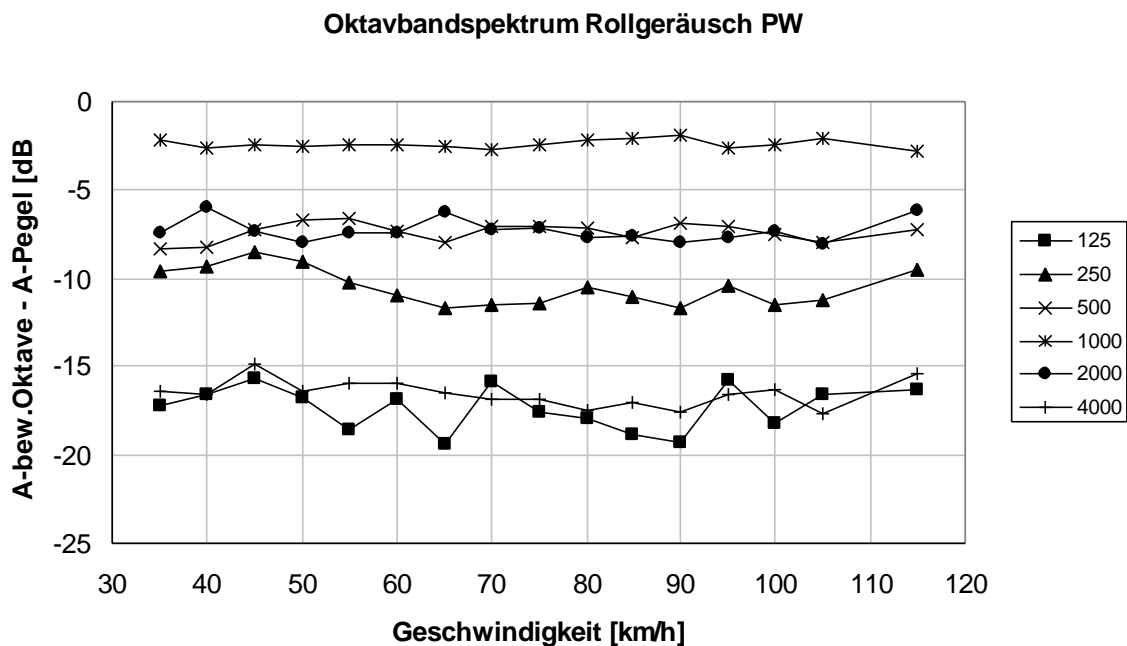


Figur 5.2 Geräuschanteile in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Lastwagen



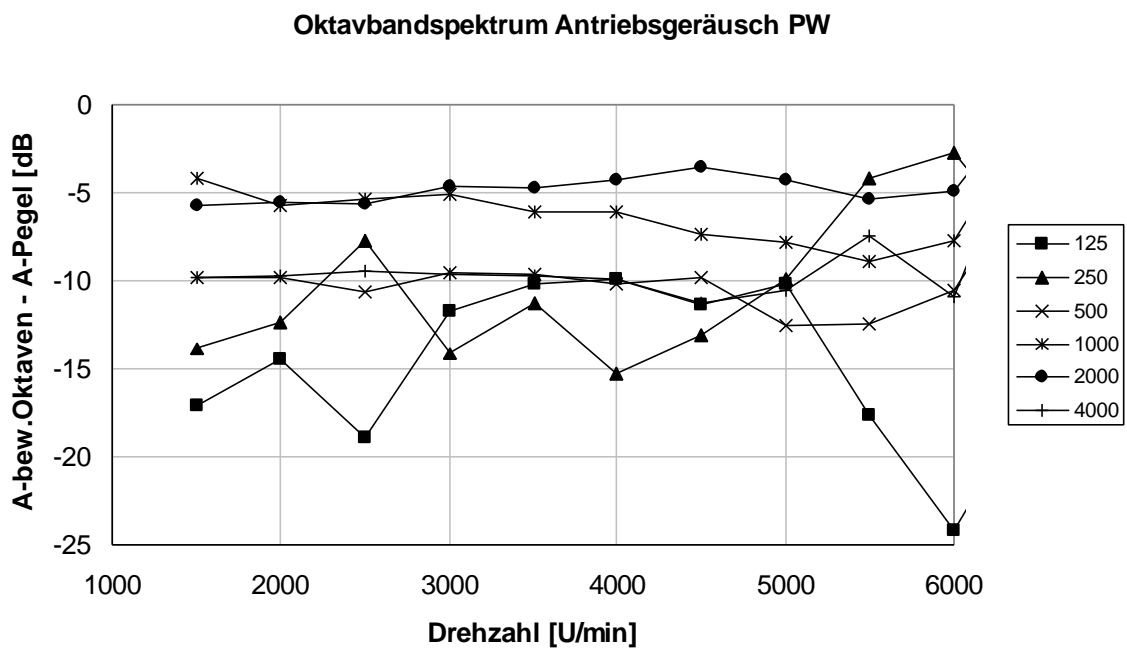
5.1.2 Oktavbandauftrennung

Um eine frequenzabhängige Ausbreitungsrechnung zu ermöglichen, wurden die bis anhin als A-Pegel angegebenen Emissionswerte in Oktaven aufgliedert. Dazu wurden die 125 Rollgeräuschmessungen an PW's, die 50 Motorgeräuschmessungen an PW's und eine Stichprobe von 125 Gesamtgeräuschmessungen an LKW's in Oktavbändern analysiert. Die Figuren 5.3 .. 5.5 zeigen die Oktavbandspektren in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bzw. der Drehzahl.



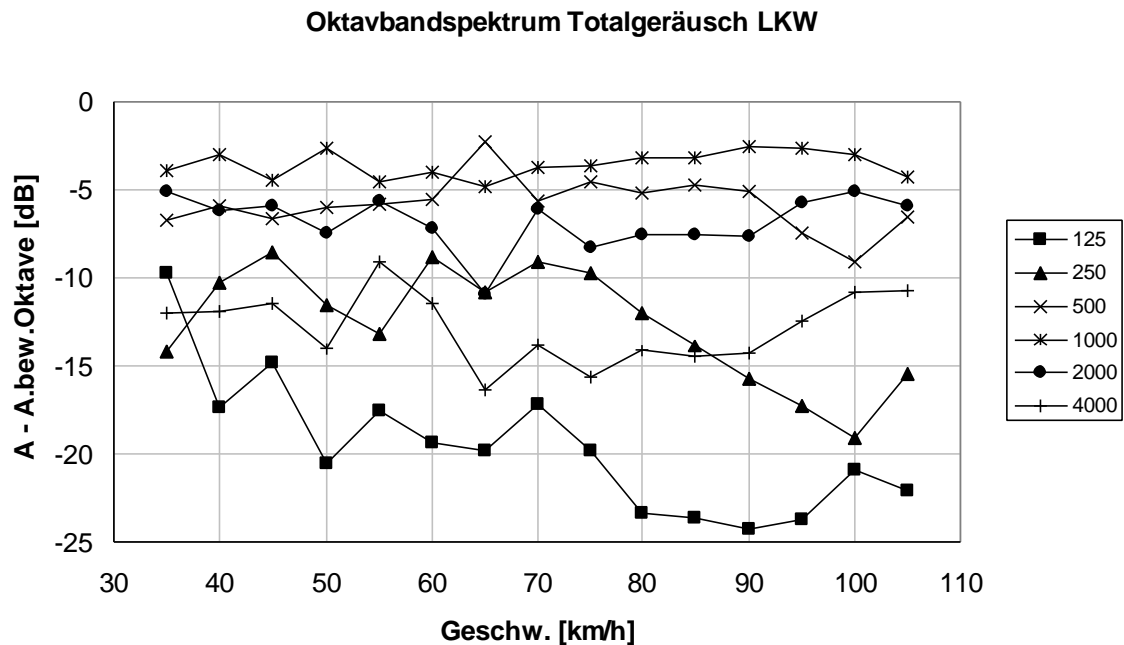
Figur 5.3:

A-bewertetes Oktavbandspektrum bzgl. des A-Pegels für das Rollgeräusch bei PW's in Funktion der Geschwindigkeit.



Figur 5.4:

A-bewertetes Oktavbandspektrum bzgl. des A-Pegels für das Antriebsgeräusch bei PW's in Funktion der Drehzahl.



Figur 5.5:

A-bewertetes Oktavbandspektrum bzgl. des A-Pegels für das Gesamtgeräusch bei LKW's in Funktion der Geschwindigkeit.

Wie die Figuren 5.3 und 5.4 zeigen, kann für das Antriebs- und Rollgeräusch bei PW's eine geschwindigkeitsunabhängige Oktavbandauftrennung angesetzt werden. Bei den LKW's (Fig. 5.5) zeigen die Oktaven 125 und 250 Hz eine deutliche Geschwindigkeitsabhängigkeit, die jedoch auf Grund des geringen Anteils dieser Oktaven am Gesamtpegel von untergeordneter Bedeutung ist.

Die Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse als A-bewertete Oktavbandpegel bzgl. dem totalen A-Pegel. Man beachte, dass die Summe jeder Zeile = 0 dB ergibt. Da bei den LKW's keine Messungen getrennt nach Antriebs- und Rollgeräusch zur Verfügung standen, wurde das Spektrum des Totalgeräusches für beide Geräuscharten verwendet.

	A-bewertete Oktavbandpegel bzgl. A-Pegel [dB]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
PW: Rollgeräusch	-18	-12	-7.5	-2.5	-7.5	-18
PW: Antriebsgeräusch	-12	-12	-9	-5	-5	-10
LKW: Rollgeräusch	-18	-12	-5.5	-4	-7	-13
LKW: Antriebsgeräusch	-18	-12	-5.5	-4	-7	-13

Tabelle 5.1 A-bewertete Oktavbandemissionspegel bzgl. des A-Pegels.

5.2 Einfluss der Steigung

Eine Steigung führt in der Regel zu einem veränderten Betriebszustand der Fahrzeuge. Dabei ändert sich typischerweise die Geschwindigkeit, die Drehzahl und die Motorbelastung. Die Geschwindigkeitsänderung wird dadurch berücksichtigt, dass in die Emissionsformeln die echten Werte eingesetzt werden. Die Auswirkungen auf die Drehzahl und die Motorbelastung werden durch eine geschwindigkeitsunabhängige Korrektur ΔStg des Antriebsgeräusches angerechnet.

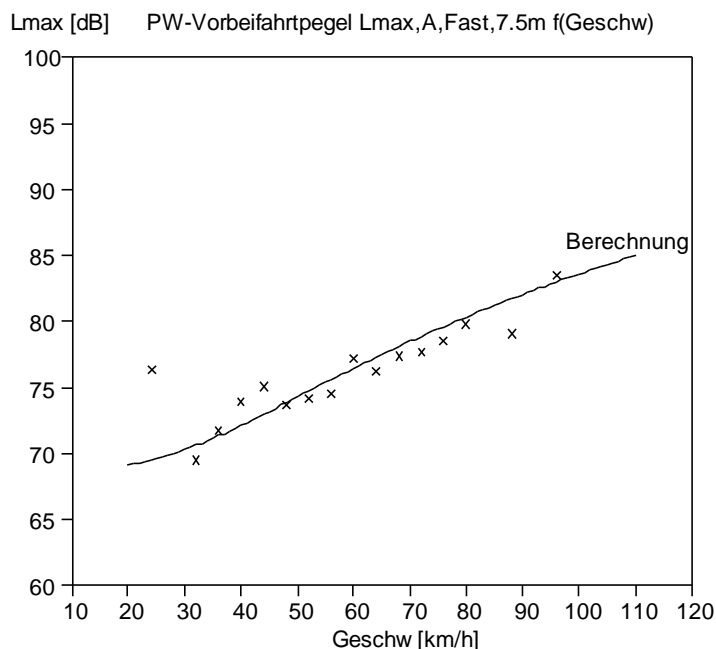
Auf Gefällstrecken lieferten die Messungen keinen Hinweis auf eine Korrektur des Emissionswerts (siehe Figuren 4.15b und 4.17b).

Zum Auffinden der Korrektur an Steigungsstrecken wurden alle Messungen im Bereich +6 .. +8% zusammengefasst und als repräsentativ für eine Steigung von 7% erachtet. Durch Variation des Parameters A in der Antriebsgeräuschformel

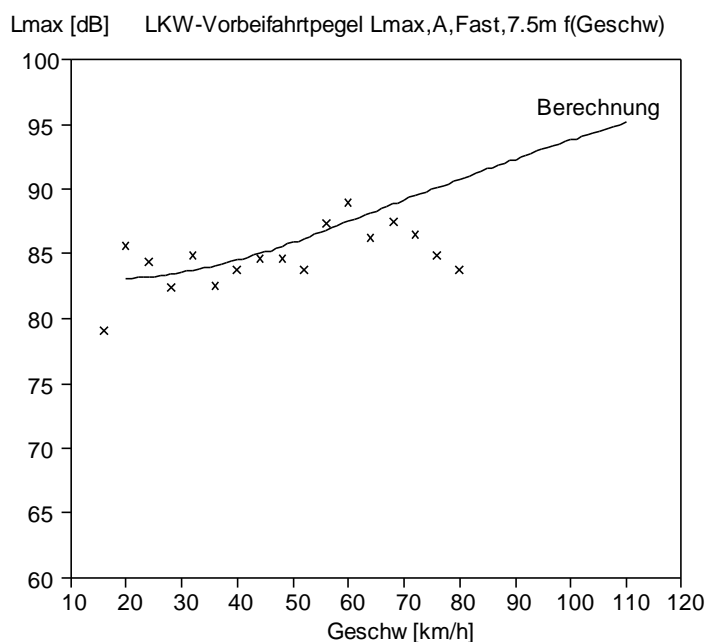
$$A + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{B} \right)^{3.5} \right)$$

wurde die beste Kurvenanpassung bestimmt. Für PW's ergibt sich der optimale Wert von A zu 68.7 (62.7 flach), für LKW's zu 82.9 (76.9 flach). Die Figuren 5.6 und 5.7 zeigen die Messwerte in Geschwindigkeitsklassen zu 4 km/h zusammengefasst im Vergleich mit den korrigierten Quellenformeln.

*Figur 5.6:
Energetisch gebildete Klassenmittelwerte der PW-Messungen an Steigungen zwischen +6 und +8% (Kreuze) und berechneter Quellenwert als Summe des Rollgeräuschanteils und des um die Steigungskorrektur von 6.0 dB erhöhten Antriebsgeräusches.*



*Figur 5.7:
Energetisch gebildete Klassenmittelwerte der LKW-Messungen an Steigungen zwischen +6 und +8% (Kreuze) und berechneter Quellenwert als Summe des Rollgeräuschanteils und des um die Steigungskorrektur von 6.0 dB erhöhten Antriebsgeräusches.*



Vereinfachend wird ein linearer Zusammenhang zwischen Steigung und Steigungszuschlag in dB angenommen. Aus den oben aufgeführten Werten folgt sowohl für PW's als auch LKW's ein Zuschlag von 0.8 dB pro Steigungsprozent:

$$\text{PW und LKW:} \quad \Delta\text{Stg [dB]} = 0.8 \cdot g \quad \text{für } g > 0 \% \quad (5.5)$$

wobei g: Steigung der Strasse in %

In anderen Modellen werden Steigungskorrekturen sehr oft erst ab einer gewissen Schwelle (z.B. 3% beim StL-86) berücksichtigt. Dies entspricht der Erfahrungstatsache, dass bei kleinen Steigungen häufig keine Emissionspegelerhöhung gegenüber der flachen Situation festgestellt werden kann. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei kleinen Steigungen oftmals die mittlere gefahrene Geschwindigkeit etwas zurückgeht und somit den erhöhten Leistungsbedarf des Motors kompensiert. Die aktuelle Formulierung des Modells basiert jedoch immer auf der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Aus diesem Grund ist bereits bei kleinsten Steigungen ein Zuschlag vorzusehen. Die Grössenordnung von 0.8 dB pro Steigungsprozent lässt sich z.B. auch aus der Literatur ableiten. Dazu wird angenommen, dass bei kleinen Steigungen die Motordrehzahl konstant bleibt (kein Schaltvorgang), sich also lediglich das Drehmoment erhöht. Die Geräuschemission eines Verbrennungsmotors nimmt pro Verdopplung des Drehmoments um etwa 3 dB(A) zu⁸. Bei mittleren Geschwindigkeiten im Bereich zwischen etwa 40 und 100 km/h führt eine Steigung von 1% zu einer Drehmomenterhöhung um etwa 20%⁹. Diese Werte führen auf eine Erhöhung des Motorgeräusches von 0.8 dB. Damit ist die Annahme einer linearen Funktion $\Delta\text{Stg}(g)$ zusätzlich unterstützt.

⁸ J. W. Biermann, Kraftfahrzeugverkehrslärm - Ursachen sowie Minderungsmöglichkeiten im Fahrzeugbereich. Habilitationsschrift, RWTH Aachen, 1988.

⁹ H. Steven, Einfluss der Fahrweise auf die Geräuschemission eines Kraftfahrzeuges, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, **30**, 67-72 (1983).

5.3 Einfluss des Belags

Belagsvariationen schlagen sich vorwiegend in Änderungen des Rollgeräusches nieder. Bei offenporigen Asphalten ist als Folge des erhöhten Schallschluckvermögens zusätzlich mit einer kleinen Beeinflussung des Antriebsgeräusches zu rechnen. Dieser Effekt wird hier allerdings ignoriert. Da vorerst eigene Belagsmessungen fehlen, stützen sich die anschliessenden Belagskorrekturen auf die Angaben aus der RLS-90¹⁰.

Bezogen auf das Gesamtgeräusch kommt der Belagseinfluss erst bei höheren Geschwindigkeiten zum Tragen. Aus diesem Grund werden in der RLS-90 die Korrekturen für drei Geschwindigkeitsklassen angegeben. Der neue Ansatz des Emissionsmodells berücksichtigt diesen Effekt implizit, indem die Belagskorrektur nur am Rollgeräusch vorgenommen wird. Auf diese Weise genügt eine Einzahlangabe ΔBelag gemäss Tabelle 5.2 zur Charakterisierung eines Belags.

*Tabelle 5.2:
Rollgeräusch-Belags-
korrektur*

Belagstyp	Belagskorrektur des Rollgeräusches ΔBelag [dB(A)]	Übereinstimmung mit RLS-90 bei 10 % LKW-Anteil [dB(A)]
Gussasphalt	0	0
Beton, rau	3	± 0.5
Pflästerung	8	± 1.0
Drainasphalt	-5	± 1.0

Bei besonderen Belägen kann die Belagskorrektur durch eigene Messungen ermittelt werden.

5.4 Resultierender Vorbeifahrtpegel

Die obigen Abschnitte zusammenfassend lässt sich der maximale Vorbeifahrtpegel (als A-Pegel) unter Berücksichtigung des Steigungs- und Belageinflusses wie folgt angeben:

$$L_{PW,7.5m} = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{PWAntrieb,7.5m} + \Delta\text{Stg}}{10} \right)} + 10^{\left(\frac{L_{PWRoll,7.5m} + \Delta\text{Belag}}{10} \right)} \right) \quad (5.6)$$

$$L_{LKW,7.5m} = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{LKWAntrieb,7.5m} + \Delta\text{Stg}}{10} \right)} + 10^{\left(\frac{L_{LKWRoll,7.5m} + \Delta\text{Belag}}{10} \right)} \right) \quad (5.7)$$

¹⁰ Richtlinie für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn, 1990.

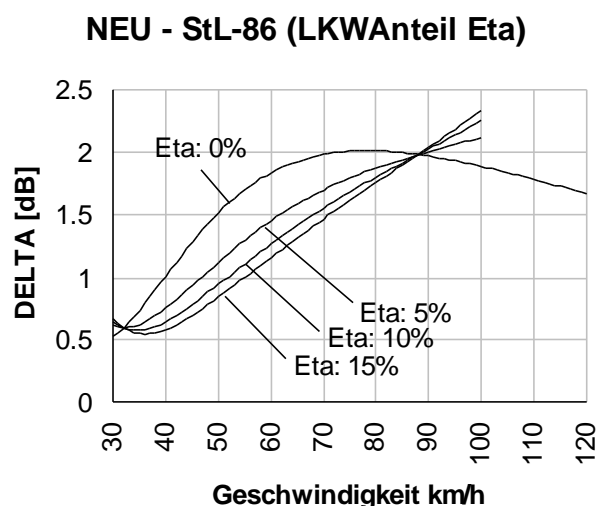
6 Vergleich mit anderen Ansätzen

In der Folge werden die neuen Emissionsformeln mit anderen Ansätzen verglichen. Dabei ist zu beachten, dass bezüglich der einzusetzenden Geschwindigkeit eine gewisse Unsicherheit besteht. Zum Teil basieren die Quellenformeln auf signalisierten Geschwindigkeiten - d.h. es steckt bereits ein gewisses Wissen bezüglich des Verkehrsverhaltens drin - zum Teil erwarten die Formeln die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit oder klammern diese Frage einfach aus. Die anschliessenden Vergleiche ignorieren diese Unsicherheit und betrachten lediglich die Pegel, die sich für eine bestimmte Geschwindigkeit ergeben.

6.1 Emissionsformel in der Ebene

In der Figur 6.1 ist der Vergleich des neuen Ansatzes mit StL-86 für die Fahrt in der Ebene angegeben. Da StL-86 die Emissionswerte nicht separat für PW's und LKW's ausweist, ist der Vergleich für verschiedene LKW-Anteile Eta dargestellt. Hier zeigt sich, dass die neue Emissionsformel leicht vom LKW-Anteil abhängig zu rund 1 bis 1.5 dB höheren Pegeln führt. Für den Vergleich wurde im neuen Ansatz angenommen, dass PW's und LKW's die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. StL-86 basiert auf nur einer Geschwindigkeitsangabe. Allfällig in der Formel enthaltenes Wissen über das Geschwindigkeitsverhalten von PW's gegenüber LKW's führt damit zu Unstimmigkeiten. In einer kürzlich veröffentlichten Mitteilung zur Lärmschutzverordnung¹¹ wurde eine Korrektur der StL-86 Quellenformel vorgenommen in dem Sinne, dass der Emissionspegel generell um 1 dB zu erhöhen ist. Damit sind die Unterschiede zum neuen Ansatz weitgehend ausgeräumt.

Figur 6.1:
Vergleich der neuen Emissionsformel mit StL-86 für verschiedene LKW-Anteile.



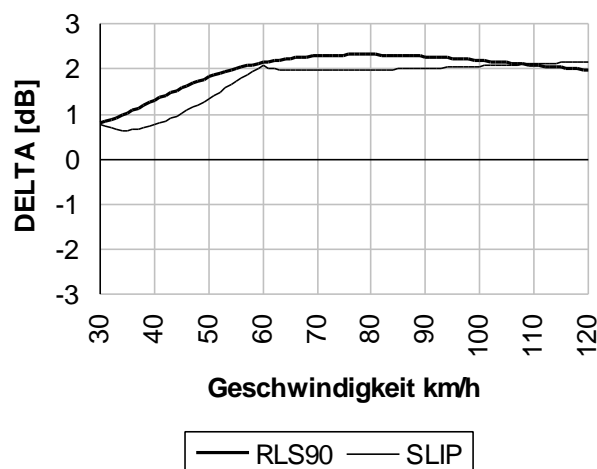
Die Figur 6.2 zeigt den Vergleich der neu vorgeschlagenen Emissionsformel für Personenwagen mit der deutschen Richtlinie für den

¹¹ Mitteilung zur Lärmschutzverordnung (LSV) Nr. 6, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 3003 Bern (1995).

Lärmschutz an Strassen RLS-90¹² und mit dem Ansatz des Computerprogramms SLIP¹³. Gegenüber RLS-90 nimmt die neue Formel nahezu geschwindigkeitsunabhängig rund 1.5 dB höhere Werte an.

Figur 6.2:

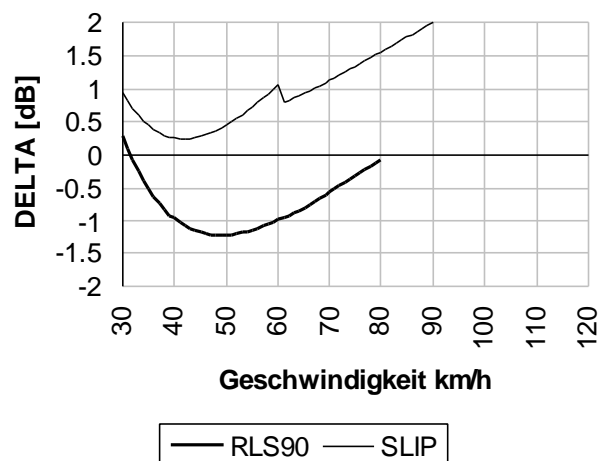
Vergleich der neuen PW-Emissionsformel mit RLS-90 und SLIP



Die Figur 6.3 vergleicht die neue Emissionsformel für Lastwagen mit der RLS-90 und mit SLIP. Hier zeigt sich, dass der neue Ansatz gegenüber der RLS-90 von einem leicht tieferen Emissionspegel ausgeht.

Figur 6.3:

Vergleich der neuen LKW-Emissionsformel mit RLS-90 und SLIP



6.2 Oktavbandauftrennung

Die Oktavbandauftrennung aus Abschnitt 5.1.2 wird mit dem Strassenverkehrslärmspektrum für städtische Verhältnisse aus der ISO Norm 717-1¹⁴ verglichen (Tabelle 6.1). Für Innerortsgeschwindigkeiten kann angenommen werden, dass das Antriebs- und Rollgeräusch etwa gleichbedeutend sind. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass sich die Geräuschanteile von PW und LKW etwa die Waage halten. Unter diesen Annahmen kann aus den vier Komponenten Antriebsgeräusch PW,

¹² Richtlinie für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn, 1990.

¹³ SLIP, Programm für die Berechnung von Strassenlärm-Immissions-Prognosen, Grolimund & Petermann AG 1992.

¹⁴ ISO 717-1 Einzahlangaben für die Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen.

Rollgeräusch PW, Antriebsgeräusch LKW, Antriebsgeräusch LKW (Tabelle 5.1) der Mittelwert gebildet werden. Das so erhaltene A-bewertete Oktavbandspektrum ist in Tabelle 6.2 wiedergegeben. Der Vergleich der beiden Tabellen 6.1 und 6.2 zeigt eine gute Übereinstimmung.

	125	250	500	1000	2000	4000
A-bewerteter Oktavbandpegel [dB]	-14	-10	-7	-4	-6	-11

Tabelle 6.1:

Auf 0 dB normiertes A-bewertetes Oktavbandspektrum für städtischen Strassenverkehrslärm gemäss ISO 717-1.

	125	250	500	1000	2000	4000
A-bewerteter Oktavbandpegel [dB]	-16	-12	-7	-4	-6	-13

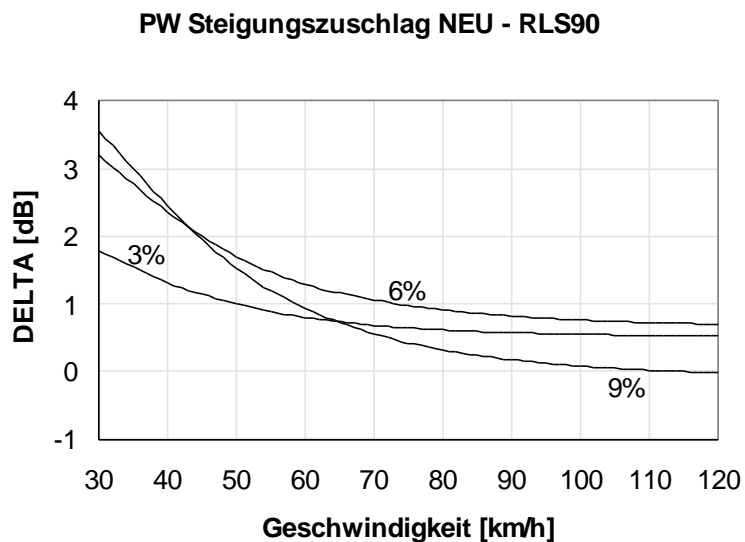
Tabelle 6.2:

Auf 0 dB normiertes A-bewertetes Oktavbandspektrum gemittelt aus den Komponenten der Tabelle 5.1 gemäss Abschn. 5.1.2.

6.3 Steigungszuschlag

Der neue Steigungszuschlag wird exemplarisch mit dem Ansatz aus der RLS-90 verglichen. Die RLS-90 unterscheidet sich diesbezüglich nur geringfügig vom StL-86. Die RLS-90 vergibt geschwindigkeitsunabhängig pro Steigungsprozent über 5 einen Zuschlag von 0.6 dB auf das Gesamtgeräusch. Da der Zuschlag im neuen Ansatz nur auf das Antriebsgeräusch wirkt, entsteht eine Geschwindigkeitsabhängigkeit. Die Figuren 6.4 und 6.5 zeigen die Differenzen der Steigungszuschläge für PW's und LKW's. Die Steigungszuschläge im neuen Ansatz sind durchwegs höher als bei der RLS-90. Dies mag mindestens z.T. damit zusammenhängen, dass bei Steigungen oft die gefahrene Geschwindigkeit etwas zurückgeht. Durch die konsequente Verwendung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit im neuen Ansatz nimmt dadurch der resultierende Emissionspegel weniger stark zu als der Steigungszuschlag dies erwarten liesse.

Figur 6.4:
Unterschied des Steigungszuschlags Neues Modell - RLS-90 bei PW's für drei Steigungen 3, 6 und 9 %.



Figur 6.5:
Unterschied des Steigungszuschlags Neues Modell - RLS-90 bei LKW's für drei Steigungen 3, 6 und 9 %.

