

Lärmtechnische Beurteilung von Verkehrsberuhigungsmassnahmen: Schwerpunkt Aufpflästerungen

Auswertung der derzeitigen Kenntnisse



November 2006

Lionel Rey
Dipl. Umweltnaturwissenschaft Universität Genf

Inhalt

1. AUSGANGSLAGE, ZIELSETZUNG	4
1.1 Kontext	4
1.2 Fragestellung / Ziele	4
1.3 Übersicht der wichtigsten Lärmmasse	5
2. LÄRMTECHNISCHE BEURTEILUNG DER PLANERISCHEN UND GESTALTERISCHEN MASSNAHMEN ZUR WOHNUMFELDVERBESSERUNG	7
2.1 Allgemeine Bemerkungen	7
2.2 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion	7
2.2.1 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion basierend auf Prognosen von Strassenlärmmodellen	8
2.2.2 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion in der Praxis bei konstanter Geschwindigkeit und Fahrdynamik	11
2.2.3 Lärmreduktion durch Geschwindigkeitsreduktion in der Praxis: Tempo-30-Zonen	12
2.2.4 Lärminderung durch einzelne Verkehrsberuhigungsmassnahmen in der Praxis	14
3. LÄRMTECHNISCHE BEURTEILUNG VON AUFPFLÄSTERUNGEN	19
3.1 Anerkannte Vor- und Nachteile von Aufpflästerungen	19
3.2 Bestehende Bewertung der Aufpflästerungen in Strassenlärmmodellen	20
3.3 Lärmmessungen an Aufpflästerungen	21
3.3.1 Übersicht der zu untersuchenden Situationen	21
3.3.2 Lärmmessungen an kurzen Aufpflästerungen (Streifen und Rampen)	23
3.3.3 Lärmmessungen an flächenhaften Aufpflästerungen	24
3.4 Lärmoptimierte Aufpflästerungen	26
3.4.1 Optimierung der Aufpflästerungen hinsichtlich Lärm	26
3.4.2 Optimierung der Aufpflästerungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit	27
3.4.3 Optimierung der Aufpflästerungen hinsichtlich Verkehrssicherheit	28
3.4.4 Fazit bezüglich Optimierung von Aufpflästerungen	28
4. BEURTEILUNG DER STÖRWIRKUNG VON PEGELVARIATIONEN UND IMPULSHALTIGEN GERÄUSCHEN	30
4.1 Definition eines impulshaltigen Geräusches	30
4.2 Wahrnehmung von Pegelvariationen und impulshaltigen Geräuschen	31
4.2.1 Intensität der Wahrnehmung bei Menschen	31
4.2.2 Wahrnehmung bei Variationen des momentanen Schalldruckpegels (L _{max})	31
4.2.3 Wahrnehmung bei Variationen des Mittelungspegels (L _{eq})	32
4.3 Von der Wahrnehmung zur Belästigung	32
4.3.1 Objektive und subjektive Faktoren der Lärmbelästigung	32
4.3.2 Beeinträchtigung der Kommunikation durch den Lärm	33
4.3.3 Physiologische und psychologische Beeinträchtigungen durch den Lärm	34
4.4 Beurteilung der Lärmbelästigung basierend auf dem Mittelungspegel	35
4.4.1 Beurteilung der Lärmbelästigung beim Strassenlärm - Problematik	35

4.4.2 Beurteilung der Lärmbelästigung anhand der EU-Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm	36
4.5 Beurteilung der Lärmbelästigung basierend auf dem Maximalpegel	37
4.5.1 Beurteilung der Lärmbelästigung durch Impulsgeräusche - Problematik	37
4.5.2 Bestehende Methoden zur Beurteilung der Impulsgeräusche beim Betriebs- und Freizeitlärm	37
4.4.3 Bestehende Methoden zur Beurteilung der Impulshaltigkeit von Strassenlärm	39
4.4.4 Umsetzung der bestehenden Methoden zur Beurteilung der Belästigung durch Verkehrsberuhigungsmassnahmen	40
4.5 Konkrete Vorschläge aus der Literatur zur Beurteilung der subjektiven Belästigung	41
4.6 Entwurf einer Beurteilungsmethode für die Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche beim Strassenlärm	44
5. LITERATURVERZEICHNIS	48
ANHANG	54
Anhang 1: Empfehlungen zum lärmbewussten Einsatz von Aufpflästerungen	55
Anhang 2: Vorbeifahrtpegel Lmax auf verschiedenen Aufpflästerungen	56
Anhang 3: Empfehlungen für Vorbeifahrtmessungen an Aufpflästerungen	57
Anhang 4: Beurteilung der subjektiven Belästigung von Aufpflästerungen	59

1. Ausgangslage, Zielsetzung

1.1 Kontext

Verkehrsberuhigungsmassnahmen werden in Wohngebieten innerorts eingesetzt, um gleichzeitig die Verkehrssicherheit und die Wohnqualität zu verbessern. Dank solcher Verkehrsberuhigungsmassnahmen ist ebenfalls ein positiver Effekt auf die Lärmimmissionen zu erwarten.

Die innerhalb von Tempo-30-Zonen eingesetzten baulichen Massnahmen bewegen die Fahrzeuglenker zu einer ruhigen und langsamen Fahrweise. Trotzdem können Veränderungen des Strassenlärms auftreten, die von den betroffenen Anwohnern als störend empfunden werden. Als Störungen werden unter anderem das Fahren im hohen Tourenbereich, Schlaggeräusche gegen quer zur Fahrbahn gerichtete Hindernisse sowie stärkere Beschleunigungen und Abbremsungen bezeichnet [27].

Ausserhalb von Tempo-30-Zonen werden oft kurze Pflasterstreifen auf Hauptverkehrsstrassen eingesetzt, um die Aufmerksamkeit der Autolenker zu erhöhen. Ohne andere bauliche Massnahmen zur Temporeduktion, wie z.B. Schwellen oder Verengungen, können diese Pflasterstreifen bei 50 km/h und mehr überfahren werden und somit mehr Lärm erzeugen als normaler Asphalt oder eine Temporeduktion auf 30 km/h. Im Allgemeinen wird die Aufpflasterung von Strassen als störend empfunden, sei es in Form von kurzen Streifen auf Hauptverkehrsachsen oder als Belag in alten Stadtzentren.

Zur Beurteilung von Verkehrsberuhigungsmassnahmen werden für gewöhnlich Verkehrserhebungen und Lärmmessungen im „Vorher-/Nachher-Zustand“ durchgeführt. Es wird unter anderem eine mittlere Geschwindigkeit, ein mittlerer Pegel und ein mittlerer Anteil an Lastwagen im Gesamtverkehr bestimmt. Nach Vergleich der Werte im Vorher-/Nachher-Zustand sind Aussagen über die Verbesserung oder die Verschlechterung der Gesamtsituation möglich.

Als Grundlage für die Beurteilung wird der Mittelungspegel über die Tag- und Nachtperiode verwendet. Für die akustische Beurteilung von lokalen Störungen (z.B. Beschleunigung, Pflaster oder andere Unebenheiten an Strassen) ist dieses Verfahren jedoch ungenügend. In der Tat ist es durchaus möglich, dass eine Verkehrsberuhigungsmassnahme störende Geräuschspitzen verursacht und gleichzeitig zu einer Minderung des Mittelungspegels führt. Dann stellt sich die Frage, ob eine solche Massnahme als lärmgünstig oder lärmungünstig zu bewerten ist.

1.2 Fragestellung / Ziele

Der Einsatz von Verkehrsberuhigungsmassnahmen verursacht neue lokale Geräuschtypen, die allerdings zurzeit nur qualitativ mit Hilfe von Fragebögen und Aussagen von Anwohnern beschrieben werden können. Der Bedarf für neue quantitative Bewertungskriterien ist jedoch gross, da lokale Pegelveränderungen, die tatsächlich eine zusätzliche Belästigung für die Anwohner zur Folge haben, frühzeitig bei der Planung von Massnahmen berücksichtigt werden sollten.

Im vorliegenden Bericht werden die vorhandenen Erkenntnisse über die lokalen und generellen Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen und Aufpflasterungen zusammengestellt. Diese Arbeit stützt sich auf die Resultate von internationalen Forschungsprogrammen, Veröffentlichungen und Lärmmessungen. Der Bericht befasst sich mit folgenden Fragen:

- 1 Wie wirken sich Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf den Lärmpegel aus?
- 2 Ist die Aufpflasterung wirklich eine Verkehrsberuhigungsmassnahme? Welchen Einfluss haben Aufpflasterungen auf die Geschwindigkeit, das Fahrverhalten und den Lärmpegel?
- 3 Welche Schalldruckpegelerhöhungen des Strassenverkehrslärms sind durch Aufpflasterungen im Vergleich zu asphaltierten Strassen zu erwarten?
- 4 Wie kann die subjektive Störung durch impulshaltige Geräusche von Belagsanschlüssen, Vertikalversätzen und Aufpflasterungen ermittelt und bei der Beurteilung in Form eines quantitativen Parameters berücksichtigt werden?

Die vorliegende Studie soll aufzeigen, welche Abnahme oder Zunahme des Lärmpegels die Aufhebung eines Pflasterstreifens an einem Messort ergeben würde. Der Fragestellung entsprechend wurde der Text folgendermassen gegliedert.

- Kapitel 1 Allgemeines
- Kapitel 2 Bewertung der Verkehrsberuhigungsmassnahmen aus lärmtechnischer Sicht
- Kapitel 3 Bewertung der Aufpflasterungen aus lärmtechnischer Sicht
- Kapitel 4 Mittel zur Berücksichtigung der Belästigung
- Anhang Empfehlungen für die Praxis

1.3 Übersicht der wichtigsten Lärmmasse

Im vorliegenden Bericht werden Messresultate aus internationalen Veröffentlichungen zusammengestellt und miteinander verglichen. Die angegebenen Pegelwerte beruhen auf folgenden Lärmmassen: Leq, Lmax, Lpk, Lden, SEL. Die drei wichtigsten Lärmmasse Leq, Lmax und SEL werden anhand eines Beispiels in der Abbildung 1.1 dargestellt.

Der Mittelungspegel "Leq":

In der Schweiz werden die gesetzlichen Grenzwerte heute nur für den Mittelungspegel, insbesondere den so genannten äquivalenten Dauerschallpegel Leq, über einen Zeitraum von 8 Stunden nachts und 16 Stunden tags festgesetzt. Beim Mittelungspegel wird die Gesamtenergie eines Ereignisses auf die gesamte Messdauer gemittelt. Mit dem Leq muss immer auch die Bezugsdauer angegeben werden (von 500ms bis zu mehreren Wochen). Kurzzeitgeräusche fallen bei der Mittelung aufgrund der logarithmischen Skalierung jedoch kaum ins Gewicht.

Bei den meisten Menschen werden hohe Einzelpegelspitzen als lästiger empfunden als ein gleichförmiges Geräusch, selbst wenn dieses eine erhebliche Lautstärke aufweist. In der Tat ist der Mensch nicht in der Lage, die Lärmwahrnehmung über 8 oder 16 Stunden wie ein Messgerät zu integrieren. Deshalb kann der Mittelungspegel die subjektive Lästigkeit eines Geräusches nicht widerspiegeln [11].

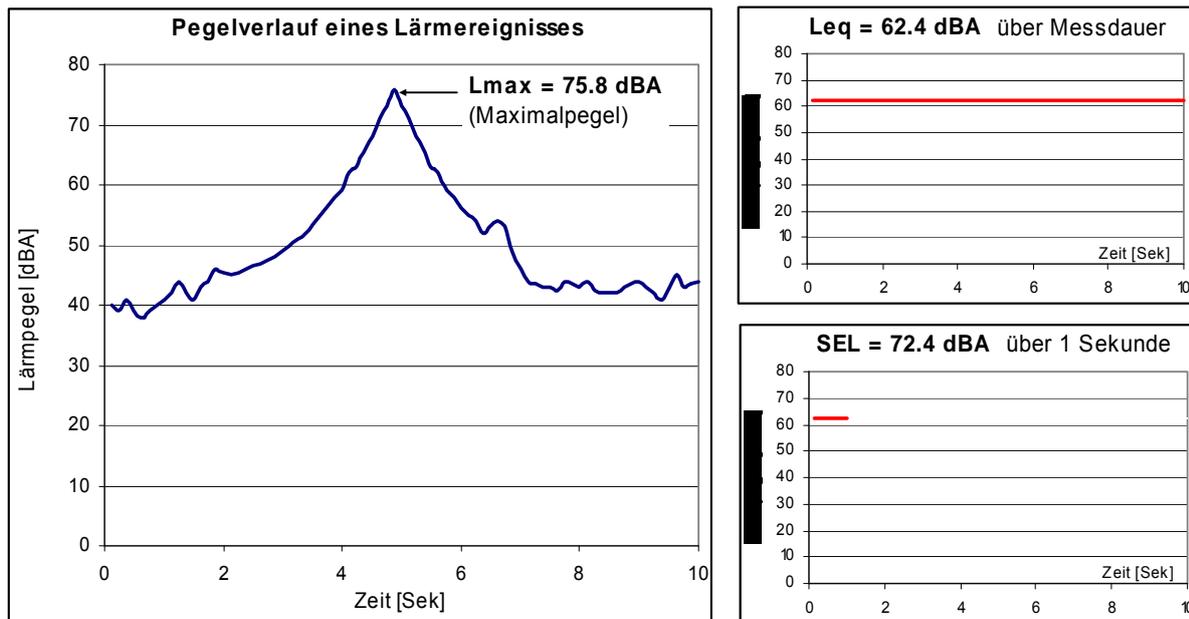


Abb.1.1: Darstellung der Lärmmasse Leq , L_{max} und SEL für ein Lärmereignis. L_{max} ist der Maximalwert während der Lärmaufnahme, Leq ist der Mittelungspegel über die gesamte Messdauer. Beim SEL wird die gesamte Schallenergie des Ereignisses auf 1 Sekunde Einwirkungszeit konzentriert.

Der Maximalpegel "Lmax":

Bei der Untersuchung von dynamischen Ereignissen (z.B. Vorbeifahrtmessungen) wird der Maximalpegel L_{max} angewandt. L_{max} und Leq sind gänzlich verschieden; L_{max} stellt einen bestimmten Moment dar (meistens 125ms), während sich Leq auf eine lange Zeitperiode bezieht [18].

Der Peakpegel "Lpk":

Der Peakpegel ist die höchste Spitze des Schalldruckpegels während der Beobachtungsperiode und kann unter bestimmten Bedingungen gleich gross wie der Maximalpegel L_{max} sein. Die Literatur berichtet, dass L_{pk} und L_{max} bei der Messung von impulsartigen Geräuschen mit Vorsicht zu betrachten sind, da die Messgeräte aufgrund einer ungenügenden Reaktionszeit den absoluten Maximalpegel nicht immer aufnehmen können. Dies gilt insbesondere im Falle einer schnellen Wiederholung von Impulsgeräuschen [48].

Der Tag-Abend-Nacht-Pegel "Lden":

Dieser Beurteilungspegel ist so definiert, dass er den ganzen Tag umfasst, wobei eine unterschiedliche Gewichtung einzelner Tageszeiten erfolgen kann. Er wird im Vorentwurf der EU-Richtlinie über die „Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm“ [16] verwendet. Die Abendstunden werden mit einem Zuschlag von 5 dBA und die Nachtstunden mit einem Zuschlag von 10 dBA gewichtet, um der zusätzlichen Belästigung während dieser Perioden Rechnung zu tragen. Wie beim Leq basiert der Indikator auf einem Mittelungspegel.

Der Sound-Exposure-Level "SEL":

Die Schallenergie des SEL-Pegels entspricht genau der Schallenergie des Leq -Pegels, mit dem Unterschied, dass die Einwirkung nicht auf den entsprechenden Messzeitraum energetisch gemittelt, sondern auf eine einzige Sekunde Einwirkungszeit konzentriert wird [72].

2. Lärmtechnische Beurteilung der planerischen und gestalterischen Massnahmen zur Wohnumfeldverbesserung

2.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Bezeichnung *Massnahmen zur Wohnumfeldverbesserung* umfasst alle planerischen und gestalterischen Massnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität und der Anwohnersicherheit im Innerortsbereich. Zu den *Verkehrsberuhigungsmassnahmen* gehören alle gestalterischen Massnahmen zur Minderung der Fahrgeschwindigkeit und zur Stabilisierung der Fahrdynamik.

Planerische Massnahmen zur Wohnumfeldverbesserung	Bauliche Massnahmen zur Wohnumfeldverbesserung („Verkehrsberuhigungsmassnahmen“)	
Verkehrsumlenkung	Markierungen auf der Fahrbahn	(siehe auch Kapitel 2)
Reduktion des LKW-Anteils	Einengung	
Fahrbahnoberfläche	Mittelinsel / Fahrbahnteiler	
Förderung lärmarmen Fahrzeuge	Alternierendes Parken / Versatz	
Förderung ruhigen Fahrverhaltens	Verkehrskreisel	
Geschwindigkeitsbeschränkung	Schwellen und Rampen	(siehe auch Kapitel 3-4)
	Aufpflasterung (flächenhaft)	(siehe auch Kapitel 3-4)
	Teilaufpflasterung / Pflasterstreifen	(siehe auch Kapitel 3-4)

Tabelle 2.1: Übersicht der planerischen und gestalterischen Massnahmen zur Wohnumfeldverbesserung

Als günstiger Nebeneffekt solcher Massnahmen kommt es in der Regel zu einer Verbesserung der Lärmsituation und einer Reduktion der Schadstoffemissionen. In einigen Fällen führt die Neugestaltung der Strassen jedoch im Gegenteil zu einer deutlichen Verschlechterung der Situation aus Sicht des Umweltschutzes, meistens infolge der Wiederholung von Schlaggeräuschen oder aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen. Eine Bewertung dieser besonders ungünstigen Fälle erfolgt in den Kapiteln 3 und 4 des Berichtes.

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse von Forschungsprogrammen, Studien und Messkampagnen dokumentiert. Im Sinne einer Synthese werden die Lärmeffekte aller Massnahmen aus Sicht des Lärmschutzes bewertet. Dabei werden die theoretischen und die in der Praxis erreichten Pegelminderungen systematisch getrennt angegeben. Dieser Bericht befasst sich ausschliesslich mit den Massnahmen zur Verringerung der Geschwindigkeit und zur Stabilisierung der Fahrdynamik, d.h. mit den so genannten Verkehrsberuhigungsmassnahmen.

2.2 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion

Die Untersuchung des Lärminderungspotentials einer Massnahme kann auf sehr unterschiedliche Weise erfolgen. In diesem Kapitel werden die Lärmuntersuchungen zu diesem Thema nach der angewandten Methode sortiert und bewertet.

2.2.1 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion basierend auf Prognosen von Strassenlärmmodellen

Modelle RLS-90, RVS 3.02 und STL86+

Die drei Strassenlärmmodelle RLS-90 (Deutschland), RVS 3.02 (Österreich) und STL86+ (Schweiz) werden für Strassenlärmprognosen angewandt. Obwohl diese Modelle auf den gleichen physikalischen Prinzipien beruhen, ergeben sich je nach Situation sehr unterschiedliche Resultate. Die Gründe dafür sind unter anderem der Einsatz unterschiedlicher Korrekturfaktoren (empirisch) und Fahrzeugkategorien. Bei diesen drei Modellen werden das Rollgeräusch und das Antriebsgeräusch nicht unterschieden.

In der nachfolgenden Tabelle ist das Lärminderungspotential einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h für drei typische Situationen anhand der drei erwähnten Modelle angegeben. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Wirkung einer Geschwindigkeitsreduktion ebenfalls vom Anteil an Lastwagen und Motorräder abhängig ist.

	Modell	Anliegerstrasse 50 ► 30 km/h Lkw Anteil 0%	Sammelstrasse 50 ► 30 km/h Lkw Anteil 10%	Hauptverkehrsstrasse 60 ► 40km/h Lkw Anteil 10%
Abnahme Mittelungspegel	RVS 3.02	5.8 dBA	2.2 dBA	2.9 dBA
	RLS-90	2.2 dBA	2.6 dBA	2.3 dBA
	STL 86+	2.2 dBA	1.4 dBA	1.7 dBA

Tabelle 2.2: Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion, prognostiziert mit unterschiedlichen Modellen

Die Streuung der Resultate ist sehr gross. Insbesondere das Modell RVS 3.02 ergibt unrealistische Werte bei tiefen Geschwindigkeiten ohne Lastwagen. Im Allgemeinen liegt der Gültigkeitsbereich der drei Modelle bei ca. 30 km/h. Der Grund dafür ist, dass diese Modelle das Antriebgeräusch und das Rollgeräusch nicht unterscheiden. Bereits zwischen 20-30 km/h wird das Motorengeräusch dominant und der Lärm eigentlich mehr durch die Motorendrehzahl als durch die Geschwindigkeit beeinflusst. Die Eigenschaften des Lärms bei tiefer Geschwindigkeit sind überhaupt nicht vergleichbar mit denjenigen, die für die Entwicklung der Modelle berücksichtigt wurden.

Modell MOBILEV

Die Lärminderungspotenziale verschiedener Einflussparameter wurden anhand eines Berechnungsmodells bestimmt, das die Antriebs- und Rollgeräusche getrennt vom Gesamtgeräusch auswertet [56]. Zwei typische Situationen wurden betrachtet: A. Strasse im Stadtkern, B. Hauptverkehrsstrasse, ampelgeregelt.

Der energetisch gemittelte Geräuschpegel L_{eq} wurde als Kennwert verwendet (Bezugsabstand 25 m, Höhe 4 m). Die Berechnungen erfolgten mit dem Geräuschemissionsmodell „MOBILEV“. Dieses Modell rechnet die Emissionen einer Strasse in Abhängigkeit von Strassentyp, Anzahl der Fahrstreifen, Verkehrsbelastung, Situation und Verkehrszusammensetzung [56]. Die Anteile an Roll- und Antriebgeräuschen wurden in beiden Verkehrssituationen für jede Fahrzeugkategorie berechnet. Dies ergab folgende Resultate:

	Situation	Anteil jedes Fahrzeugtyps am Gesamtlärm	Anteil jedes Geräuschtyps am Gesamtpegel	Anteil des Rollgeräusches bei jedem Fahrzeugtyp
Strasse in Stadtkern	V<50 km/h	76% Pkw	39 % Antriebsgeräusch	69% bei Pkw
	2 Fahrstreifen		(60% Pkw, 4% LNfz, 36% SNfz)	
	4% leichte Nfz	4% LNfz		67% bei LNfz
	2% schwere Nfz		61 % Rollgeräusch	
	DTV 25000	20% SNfz	(85.5% Pkw, 5% LNfz, 9.5% SNfz)	30% bei SNfz
AB 11 - Belag				
Hauptverkehrsstrasse ampegelregelt	V=50 km/h	58% Pkw	40 % Antriebsgeräusch	74% bei Pkw
	4 Fahrstreifen		(46% Pkw, 3% LNfz, 61% SNfz)	
	4% leichte Nfz	4% LNfz		72% bei LNfz
	6% schwere Nfz		60 % Rollgeräusch	
	DTV 50000	38% SNfz	(73% Pkw, 4% LNfz, 23% SNfz)	36% bei SNfz
AB 11 - Belag				

Tabelle 2.3: Anteil am Leq von Roll- und Antriebsgeräusch für zwei typische Situationen im Innerortsbereich

Bei Strassen im Stadtkern werden 52% der gesamten Geräuschmenge durch Pkw-Rollgeräusche verursacht [56]. Bei Hauptstrassen beträgt dieser Anteil 38%. Die Verkehrszusammensetzung und die angegebenen Anteile an Roll- und Antriebsgeräuschen (vgl. Tabelle 2.3) wurden für die Berechnung der erzielbaren Lärminderung durch den Einsatz von Tempo 30 statt 50 km/h verwendet. Die Resultate der Berechnungen mit MOBILEV sind in der Tabelle 2.4 aufgeführt. Die Lärminderungen werden im nächsten Abschnitt mit der gleichen Verkehrszusammensetzung mit Hilfe des Strassenlärmmodells SON ROAD berechnet.

Tempo 30 statt 50 km/h, Leq	Stadtkern	Hauptverkehrsstrasse
Rollgeräusche – Pkw/Lieferwagen	- 2.3 [dBA]	- 1.8 [dBA]
Rollgeräusche, alle Kfz	- 2.7 [dBA]	- 2.6 [dBA]
Antriebsgeräusche – Lkw	- 0.5 [dBA]	- 0.9 [dBA]
Antriebsgeräusche – alle Kfz	- 1.5 [dBA]	- 1.6 [dBA]
Gesamtgeräusch	- 2.3 [dBA]	- 2.2 [dBA]

Tabelle 2.4: Lärminderungspotenzial einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 auf 30 km/h, berechnet mit MOBILEV (mit der Verkehrszusammensetzung der Tabelle 2.3)

Mit einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h beträgt das Lärminderungspotenzial (Leq) 1.5 dBA für Nutzfahrzeuge und 2.5 dBA für Pkw gemäss Strassenlärmmodell MOBILEV.

Modell SON ROAD

In der Schweiz wird die Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und dem Gesamtgeräusch einer Strasse durch das Strassenlärmmodell STL86+ beschrieben. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist dieses Modell ungenau, da die relativen Anteile an Roll- und Antriebsgeräuschen bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Basierend auf einer umfangreichen Messkampagne wurde der Quellenteil des EMPA-Strassenlärmmodells StL-86 überarbeitet und als Modell SON ROAD neu formuliert [20].

Im Gegensatz zum Berechnungsmodell STL-86+ definiert das neuere Modell „SON ROAD“ die Emission nicht anhand der signalisierten Geschwindigkeit für einen Fahrzeugmix, sondern anhand der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit getrennt nach Personenwagen (PW) und Lastwagen (LW) [72].

Dank gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung und Messung des maximalen Pegels konnte für eine konstante Fahrweise in der Ebene pro Fahrzeugkategorie ein Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Emissionspegel eines durchschnittlichen Fahrzeugs bestimmt werden. Ergänzende Messungen des Rollgeräusches erlaubten schliesslich eine Auftrennung des Gesamtgeräusches in einen vorwiegend vom Motor abhängigen Teil (Antriebsgeräusch) und einen vom Abrollen des Reifens auf der Fahrbahn herrührenden Teil (Rollgeräusch) [20] [52]. Die Formeln zur Berechnung des Roll- und Antriebsgeräusches bei Pkw und Lkw sind in der Tabelle 2.5 enthalten. Diese Formeln gelten für eine konstante Fahrweise auf horizontaler Strasse mit Schwarzbelag.

Lärmkomponente	Lärmmass	Formel
Rollgeräusch Personenwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (RPKW)} = 9.5 + 35.0 \log (v)$
Antriebsgeräusch Personenwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (APKW)} = 62.7 + 10 \log (1 + (v/44.0)^{3.5})$
Gesamtgeräusch Personenwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (PKW)} = L_{(RPKW)} + L_{(APKW)}$
Rollgeräusch Lastwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (RLKW)} = 18.5 + 35.0 \log (v)$
Antriebsgeräusch Lastwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (ALKW)} = 76.9 + 10 \log (1 + (v/56.0)^{3.5})$
Gesamtgeräusch Lastwagen	Maximalpegel L _{max}	$L_{max (LKW)} = L_{(RLKW)} + L_{(ALKW)}$
Gesamtgeräusch Personenwagen	Mittelungspegel Leq	$Leq (PKW) = L_{max (PKW)} - 7.5 - 10 \cdot \log(v) - 10 \cdot \log(s)$
Gesamtgeräusch Lastwagen	Mittelungspegel Leq	$Leq (LKW) = L_{max (LKW)} - 7.5 - 10 \cdot \log(v) - 10 \cdot \log(s)$

Tabelle 2.5: Maximaler Vorbeifahrtpegel für Schwarzbelag in dBA in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit v in km/h für harte Böden in 7.5 m Abstand bei einer Mikrofonhöhe von 1.2 m.

L_{max}: Maximalpegel in [dBA] bei der Vorbeifahrt eines Personenwagens (PKW) / Lastwagens (LKW) in 7.5m Abstand

Leq: Mittelungspegel in [dBA] für eine PKW- oder LKW-Vorbeifahrt pro Stunde in Abstand (s)

Im unteren Teil der Tabelle sind die Formeln für die Umrechnung von L_{max}-Werten in Leq-Werte angegeben. Die dadurch berechneten Leq entsprechen den Mittelungspegeln einer einzigen Vorbeifahrt innerhalb einer Stunde.

Das Lärminderungspotential einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h wurde anhand des Strassenlärm-Berechnungsmodell SON ROAD für die zwei Verkehrssituationen der Tabelle 2.3 berechnet. Somit sind die angegebenen Pegelreduktionen der Tabellen 2.4 und 2.6 direkt miteinander vergleichbar.

Tempo 30 statt 50 km/h, Leq	Stadtkern	Hauptverkehrsstrasse
Rollgeräusche – Pkw/Lieferwagen	-5.5 [dBA]	-5.5 [dBA]
Rollgeräusche, alle Kfz	-3.2 [dBA]	-5.6 [dBA]
Antriebsgeräusche – Lkw	+0.4 [dBA]	+0.4 [dBA]
Antriebsgeräusche – alle Kfz	-0.5 [dBA]	-0.1 [dBA]
Gesamtgeräusch	-2.7 [dBA]	-2.3 dBA]

Tabelle 2.6: Lärminderungspotenzial einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 auf 30 km/h, berechnet mit SON ROAD (mit der Verkehrszusammensetzung der Tabelle 2.3)

Fazit: Bei Modellen, die auf eine Trennung des Strassenlärmgeräusches in zwei Komponenten, namentlich das Antriebsgeräusch und das Rollgeräusch, verzichten, liegt das Minderungspotential einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 km/h auf 30 km/h zwischen 1.4 dBA und 2.6 dBA. Bei Modellen mit Trennung der Geräuschkomponenten liegt das Lärminderungspotential zwischen 2.2 und 2.7 dBA. Diese Modelle weisen untereinander eine grössere Übereinstimmung auf.

2.2.2 Lärminderung durch Geschwindigkeitsreduktion in der Praxis bei konstanter Geschwindigkeit und Fahrdynamik

Die nachfolgenden Untersuchungen über das Lärminderungspotential von Temporeduktionen basieren nicht auf Modellen, sondern auf Messungen von kontrollierten (Fahrzeug-)Vorbeifahrten. Dabei wird der Vorbeifahrtpegel (L_{eq} , L_{max}) von normal ausgerüsteten Fahrzeugen mit konstanter Geschwindigkeit messtechnisch erhoben. Bei dieser Methode werden die negativen Einflüsse von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen gar nicht mitberücksichtigt.

Das Projekt SYLVIE (Systematische Lärmsanierung in innerstädtischen Wohnvierteln) ist eines der vollständigsten Projekte der letzten Jahre. Zusammenfassend wurden im Rahmen dieses Projektes die Lärmauswirkungen und die Beurteilungsmittel von einzelnen Massnahmen in städtischen Gebieten untersucht [47]. Für die niedrigeren Geschwindigkeiten <50 km/h wurden von der Versuchsanstalt für Wärme- und Schalltechnik umfangreiche Vorbeifahrtmessungen durchgeführt. Bei diesen Messungen wurden der Maximalpegel L_{max} und der Mittelungspegel L_{eq} einer festgelegten Auswahl an Fahrzeugen für zwei verschiedene städtische Strukturen ermittelt. Die nachfolgenden Aussagen basieren auf den Ergebnissen dieser Messkampagne.

Schallimmissionen kontrollierter Pkws auf offener Strasse bei 30 und 50 km/h

Auf einer offenen, gerade und eben verlaufenden Strecke wurde der Schallpegel (L_{max} , L_{eq}) von mit definierter Geschwindigkeit von 30 km/h und 50 km/h vorbeifahrenden Pkws in 7.5m Abstand gemessen [47]. Der Dauerschallpegel L_{eq} wurde für eine durchschnittliche stündliche Verkehrsmenge errechnet. Die Messergebnisse zeigen, dass bei einer Verminderung der Geschwindigkeit von 50 auf 30 km/h der maximale Schallpegel um 7 dB und der äquivalente Dauerschallpegel um 5 dB abnimmt.

Schallimmissionen kontrollierter Pkws in geschlossen bebauten Strassen bei 30 und 50 km/h

In mehreren geschlossen bebauten Wiener Strassen unterschiedlicher Breite wurde in jeweils vier verschiedenen Höhen der Schallpegel bei Vorbeifahrt (jeweils drei auf beiden Spuren) von Pkws mit 30 und mit 50 km/h gemessen und der maximale Schallpegel (L_{max} -Vorbeifahrt) und der Schallereignispegel der gesamten Vorbeifahrt (L_{eq} -Vorbeifahrt) ermittelt [47]. Aus Letzterem wurde der äquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) für eine durchschnittliche stündliche Verkehrsmenge errechnet. Durch die Verringerung der Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h wurde der maximale Schallpegel um 5 bis 6 dB und der äquivalente Dauerschallpegel um 5 dB verringert.

Auch in Skandinavien wurden eine Reihe von Messungen über die Geräuschemissionen von Kraftfahrzeugen bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h durch *Hagen* und *Berge* durchgeführt. Es wurde der Maximalpegel L_{max} von Pkws bei verschiedenen, konstanten Geschwindigkeiten in 7.5 m Abstand ab Fahrbahnmitte und 1.2 m Höhe über Boden gemessen [47]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden dann mit denjenigen anderer Studien verglichen. Die erzielten Beziehungen zwischen dem L_{max} und der Geschwindigkeit in sechs unterschiedlichen Studien sind in der Abbildung 2.1 dargestellt.

Aus der Abbildung wird eine Schallpegelminderung des Maximalpegels L_{max} um 4 bis 6 dB bei einer Reduzierung der Geschwindigkeit von 50 auf 30 km/h ersichtlich. Diese Lärminderung bestätigt die Resultate des SYLVIE-Projektes. Es muss allerdings beachtet werden, dass sich alle diese Studien auf Vorbeifahrtmessungen mit kontrollierter Geschwindigkeit stützen, und daher die eher negativen Einflüsse von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen nicht erfasst werden.

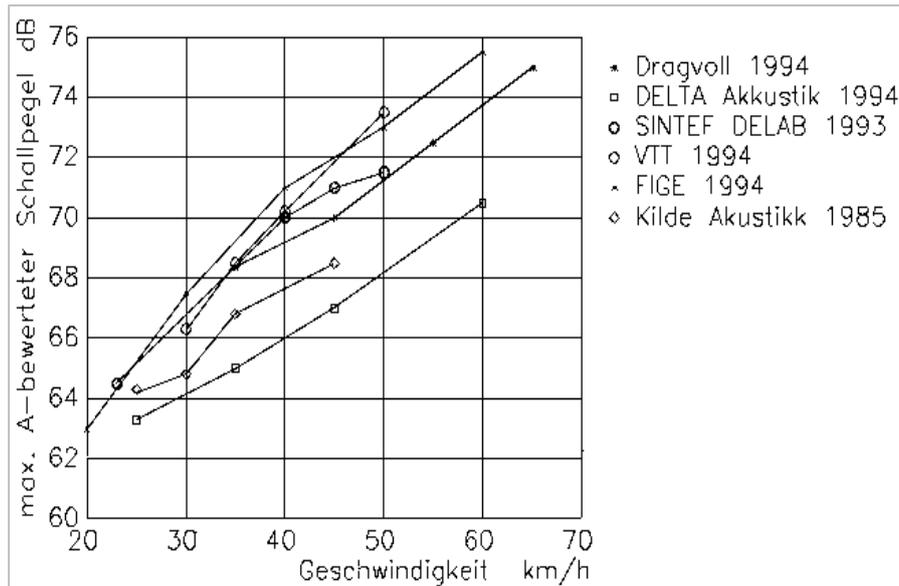


Abbildung 2.1: Zusammenhang Lmax vs. Geschwindigkeit für Pkws aus verschiedenen Studien

Schallimmissionen an der Hausfassade bei Pkw-Vorbeifahrten im üblichen Verkehr

In mehreren geschlossenen bebauten Strassen - sowohl in solchen ohne Verkehrsbeschränkung als auch in verkehrsberuhigten Strassen - wurde der Schallpegel (L_{max} und L_{eq}) bei freiem Verkehr für 60 Vorbeifahrten an der Hausfassade in 4 m Höhe über dem Boden gemessen. Durch gleichzeitiges Messen der Zeitdauer der Vorbeifahrt (an einer definierten Strecke bekannter Länge) konnte auch die Geschwindigkeit der Vorbeifahrt bestimmt werden.

Im Rahmen der Untersuchung in Wien wurde festgestellt, dass die Schallpegelwerte der einzelnen Vorbeifahrten sehr unterschiedlich sind und wesentlich mehr vom Fahrstil des Fahrers und vom Fahrzeug als von der Geschwindigkeit abhängen. Es wurde auch beobachtet, dass die maximal erlaubte Geschwindigkeit von 50 km/h in städtischen Strassen und Nebenstrassen vielfach überschritten wird. In verkehrsberuhigten Strassen liegt die Geschwindigkeit trotzdem etwas tiefer als in anderen Strassen.

Durch eine Verminderung der Fahrgeschwindigkeit von 50 auf 30 km/h kann gemäss dieser Lärmuntersuchung eine Minderung des Mittelungspegels L_{eq} von 3 bis 5 dB erzielt werden.

Fazit: Lärmmessungen von Vorbeifahrten mit kontrollierter Geschwindigkeit ergeben eine Lärmreduktion des Maximalpegels L_{max} von 4 dBA bis 7 dBA, mit Rücksicht auf unterschiedliche Beläge und städtebauliche Eigenschaften. Beim Mittelungspegel werden Pegelreduktionen von 3 bis 5 dBA erreicht. Bei diesen Messungen werden aber das Abbremsen, das Beschleunigen und die dadurch verursachten negativen Auswirkungen auf den Schallpegel nicht berücksichtigt.

2.2.3 Lärmreduktion durch Geschwindigkeitsreduktion in der Praxis: Tempo-30-Zonen

Unter einer Tempo-30-Zone versteht man eine flächenhafte Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit in einem Gebiet, mit oder ohne flankierende Massnahmen. Nachfolgend werden die Resultate von Messkampagnen in Tempo-30-Zonen in der Schweiz, Deutschland und Österreich präsentiert. Bei diesen Untersuchungen wurde der Mittelungspegel über mehrere Stunden hinweg gemessen und gleichzeitig das Verkehrsaufkommen gezählt. Aus diesem Verfahren ergibt sich der

Mittelungspegel L_{eq} . Dieser ist für die Beurteilung der Massnahmen nach den gesetzlichen Vorschriften geeignet, gibt aber keine Auskunft über die Veränderung der Pegeldynamik und deren Lästigkeit.

Tempo-30-Zonen in Deutschland

Gemäss dem Verkehrsclub Deutschland [64] hat sich in Tempo-30-Zonen gezeigt, dass die Lärmbelastung um durchschnittlich 3 dB(A) abnimmt (L_{eq}).

Der Naturschutzverband BUND hat im Jahre 2004 eine Zusammenfassung der durch die Einführung von Tempo-30-Zonen bisher erzielten Lärminderungen in mehreren Städten veröffentlicht. Gemäss der Zusammenfassung werden in geschlossenen Ortschaften mit der Herabsetzung von Tempo 50 km/h auf Tempo 30 km/h Pegelminderungen (L_{eq}) von 1,5 dB(A) bis 2,5 dB(A) erreicht [10]. Diese Aussage stützt sich grundsätzlich auf die Ergebnisse von Berlin und Rostock, welche nachfolgend im Einzelnen erklärt werden.

Auf den Strecken in Berlin wurden eine deutliche Reduktion des Verkehrsaufkommens (in der Nacht um 11-17 %) und eine Lärminderung zwischen 0,2 bis 2,7 dB(A) festgestellt. Die Differenzen ergaben sich aufgrund unterschiedlicher Verkehrsmengen, Zusammensetzung des Verkehrs sowie Geschwindigkeiten. In einem weiteren Versuch [10] [55] in der stark befahrenen Beusselstrasse in Berlin im Jahre 2002 wurden diese Ergebnisse nochmals bestätigt. Hier wurde als Folge der Einführung von Tempo 30 eine Lärminderung von 1-2 dB (A) nachgewiesen. Eine weitere Minderung von 0,5-1 dB (A) liesse sich durch eine bessere Einhaltung der Geschwindigkeit erzielen.

In Rostock [10] wurde die Auswirkung einer Geschwindigkeitsreduktion von Tempo 50 auf Tempo 30 während der Nachtstunden (22 bis 6 Uhr) in den 1,2 km langen Hauptverkehrsstrassen Dethardingstrasse und Karl-Marx-Strasse umfangreich untersucht (Verkehrs- und Lärmmessungen, Befragungen usw.). Es wurde eine Lärminderung um ca. 1 bis 1,5 Dezibel erzielt. Wobei die Umweltentlastung von den Anwohnern stärker empfunden wurde als sie messtechnisch nachgewiesen werden konnte.

Tempo-30-Zonen in Österreich

Ein Modellversuch Tempo 30/50 in Graz begann 1992 mit einer Testphase für 2 Jahre; 1994 wurde aufgrund der insgesamt positiven Ergebnisse der Modellversuch als Dauermassnahme installiert. In Graz gilt für alle Hauptstrassen Tempo 50 und alle Nebenstrassen Tempo 30. In einer umfangreichen wissenschaftlichen Begleituntersuchung wurde der Einfluss auf das Verkehrsverhalten im Strassenraum, Verkehrsmittel- und Routenwahl, Schadstoffemissionen, Treibstoffverbrauch und Verkehrslärm ermittelt. Die Untersuchungen ergaben: Eine Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsverhaltens, eine nur kleine Abnahme der mittleren Geschwindigkeit und ein homogenerer Verkehrsfluss [47]. Aus akustischer Sicht ist die Lärmstörung dank Tempo 30 spürbar gesunken, mit einer Schallpegeländerung in den Tempo-30-Strassen von +0,4 bis -1,9 dB.

Der Wiener Lärmbericht 1997 [47] bezieht sich auf deutsche Erfahrungen der achtziger Jahre und behauptet, dass die Vorbeifahrtpegel (d.h. L_{max}) an stärker belasteten deutschen Strassen nach Einführung von Tempo-30-Zonen im Durchschnitt um bis zu 5 dB abgenommen habe. Der äquivalente Dauerschallpegel (d.h. L_{eq}) an diesen Strassen habe sich infolge veränderten Fahrverhaltens im Schnitt um etwa 3 dB vermindert.

Tempo-30-Zonen in der Schweiz

Die Auswirkungen von Zonensignalisationen (Tempo 30) in Wohngebieten wurden einerseits in einer Studie von der EMPA im Jahre 2000 [46] und andererseits in einer weiteren Untersuchung von Koy T. [83] im Jahre 2001 untersucht. Im Rahmen dieser Studien wurden zahlreiche Informationen zu einzelnen Tempo-30-Zonen in der Schweiz in einer Befragung der Kantone gesammelt: Geschwindigkeit vorher/nachher, Unfälle vorher/nachher, genaue Beschreibungen der eingesetzten Massnahmen, usw. Zusammenfassend ergibt sich, dass Tempo-30-Zonen ohne bauliche Massnahmen nur zu einer geringfügigen Geschwindigkeitsreduktion von 2 km/h führen. Mit flankierenden Massnahmen kann mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeitsreduktion von 7 km/h gerechnet werden. Diese entspricht einer durchschnittlichen Wirkung von ca. 1 bis 1.5 dBA.

Fazit: Eine Minderung des Mittelungspegels (Leq) von 1 dBA bis 1.5 dBA ist häufig. Bei Tempo-30-Zonen mit baulichen Massnahmen liegt die durchschnittliche Wirkung in der Schweiz in diesem Bereich. Die besten Ergebnisse geben eine mögliche Reduktion des Dauerschallpegels Leq um 3 dBA an.

2.2.4 Lärminderung durch einzelne Verkehrsberuhigungsmassnahmen in der Praxis

In Abschnitt 2.2.3 wurde die Wirkung von Tempo-30-Zonen auf die Lärmbelastung dokumentiert. Unter Tempo-30-Zonen versteht man in der Regel eine Zusammenstellung mehrerer Massnahmen, die eine Reduktion der durchschnittlichen Geschwindigkeit bewirken. Im folgenden Abschnitt wird versucht, die Wirkung der einzelnen Massnahmen (Verkehrsberuhigungsmassnahmen) zu beschreiben. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Wirkungen der nachfolgend erwähnten Massnahmen nicht einfach addiert werden können. Mit anderen Worten ist es wichtig, Massnahmen nicht nur in ihrer einzelnen Wirkung, sondern den Strassenraum in seiner Gesamtheit und in Verbindung mit dem Umfeld zu betrachten.

Die folgenden Erwägungen stützen sich auf Ergebnisse aus insgesamt 192 Schall- und Geschwindigkeitsmessreihen an 96 Standorten (Vorher/Nachher-Messungen) in deutschen Städten [70]. Diese Auswertung umfasst Messungen von über 29000 Fahrzeugen. Die Autoren der Studie haben die erzielte Lärmreduktion für jede Massnahmenkategorie statistisch berechnet. Zu Vergleichszwecken wurden die erzielten Geschwindigkeitsreduktionen aller Massnahmen anhand des Strassenlärmmodells SON ROAD in theoretische Pegelreduktionen umgerechnet.



Bewertung von Markierungen auf der Fahrbahn

Geschwindigkeitsreduktion	-2 km/h
Resultierende Lärmreduktion	< 1 dBA
Fahrdynamik	gleichmässig
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	nein
Impulsgeräusche	nein
Kosten	gering
Städtebauliche Einbindung	neutral

Tabelle 2.7: Wirkung von Markierungen auf der Fahrbahn in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Mit der Markierung auf der Fahrbahn wird der Fahrer durch den optischen Eindruck zu einer niedrigen Geschwindigkeit und zu einem ruhigen Fahren bewegt. In Anbetracht der geringen Investitionskosten ist die Wirksamkeit der Massnahme gut.

<i>Bewertung von Einengungen</i>	
Geschwindigkeitsreduktion	- 5 km/h
Resultierende Lärmreduktion	- 1.3 dBA
Fahrdynamik	teilweise beeinträchtigt
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	nein
Impulsgeräusche	nein
Kosten	mittel
Städtebauliche Einbindung	sehr gut



Tabelle 2.8: Wirkung von seitlichen Einengungen in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Verengungen und seitliche Einengungen der Fahrbahn erlauben die Vorbeifahrt zweier sich entgegengerichteter Fahrzeuge nur mit tiefer Geschwindigkeit. Bei Begegnungen zweier Fahrzeuge sind Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge häufig, was im Grunde genommen nicht besonders lärmgünstig ist.

Bei im Durchschnitt gleichen Verkehrsbedingungen und einer nutzbaren Fahrbahnbreite von nur 4 m für den Zweirichtungsverkehr treten im Mittel um ca. 5 km/h niedrigere 85%-Geschwindigkeiten der Pkws auf, als bei nutzbaren Fahrbahnbreiten von 7 m [70]. Oberhalb einer Fahrbahnbreite von etwa 7 bis 7.5 m steht der Einfluss dieses Faktors auf die Fahrgeschwindigkeit hinter der allgemeinen Verkehrsbedeutung einer Strasse deutlich zurück, so dass kein weiterer Anstieg der entsprechenden Regressionsgeraden für den Zusammenhang zu verzeichnen ist. Bei Einbahnstrassen stellt sich der Zusammenhang zwischen der nutzbaren Fahrbahnbreite und der 85%-Geschwindigkeiten der Fahrzeuge noch deutlicher dar.

Einengungen sollten nicht an beliebigen Stellen angebracht werden, sondern an gestalterisch oder verkehrstechnisch wichtigen Punkten. Die maximale Abschnittslänge zum nächsten verkehrsberuhigenden Element sollte bei 50-100m liegen, um übermässige Beschleunigungen zu vermeiden.

<i>Bewertung Schwellen und Rampen</i>	
Geschwindigkeitsreduktion	bis -25 km/h
Resultierende Lärmreduktion	siehe Kapitel 3
Fahrdynamik	unregelmässig
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	ja beim Typ mit Pflaster
Impulsgeräusche	ja, bei meisten Typen
Kosten	niedrig-mittel
Städtebauliche Einbindung	schlecht



Tabelle 2.9: Wirkung von Schwellen und Rampen in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Durch die Anhebung der Fahrbahn über eine kurze Distanz wird der Fahrer gezwungen, die Geschwindigkeit herabzusetzen. Verallgemeinernd lässt sich auf Wohnstrassen feststellen, dass mittelmässig oder steil angerampelte Aufpflasterungen (etwa 1:10 oder steiler) in einer Abfolge von weniger als 50 m in der Regel zu einem 85%-Geschwindigkeitsniveau von ca. 25 km/h führen. Die Überfahrgeschwindigkeit der Elemente liegt bei ca. 20 bis 25 km/h [70].

Bei einem Elementabstand zwischen 50 und 150 m steigt die Fahrgeschwindigkeit nahezu linear mit wachsender Distanz zwischen den verkehrsberuhigenden Elementen an. Fahrdynamisch wirksame Elemente in Abständen von 150 m und mehr rufen im dazwischen liegenden Streckenabschnitt prak-

tisch keine Geschwindigkeitsreduktion hervor und sind sogar unter dem Gesichtspunkt des ungleichmässigen Fahrverhaltens zwischen den Elementen bei Beschleunigung hinter und Abbremsen vor den Hindernissen als ungünstig im Hinblick auf die Lärmentwicklung und auf die Verkehrssicherheit im Strassenraum einzuschätzen.

Auf Hauptsammel- und örtlichen Hauptstrassen ist es zur Erzielung von 85%-Fahrgeschwindigkeiten von 40 bis 45 km/h nicht sinnvoll angerampfte Teil- oder Kissen-Aufpflasterungen im Fahrbahnraum anzubringen. Vielmehr besteht hier die Möglichkeit durch geeignete Fahrbahnversätze oder Fahrbahnverschwenke entsprechende Geschwindigkeitsreduktionen zu fördern.

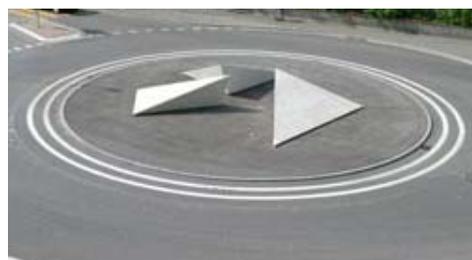


Bewertung von Mittelinseln / Fahrbahnnteilern

Geschwindigkeitsreduktion	- 5 km/h
Resultierende Lärmreduktion	- 1.4 dBA
Fahrdynamik	sehr gut
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	nein
Impulsgeräusche	nein
Kosten	hoch
Städtebauliche Einbindung	sehr gut

Tabelle 2.10: Wirkung von Mittelinseln / Fahrbahnnteilern in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Der Einbau einer Verkehrsinsel ist besonders dann sinnvoll, wenn die Strassenüberquerung für die Fussgänger vereinfacht werden soll. Für sich genommen hat eine Insel keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit. Kombiniert mit anderen Massnahmen, wie zum Beispiel einem Horizontalversatz oder einer Fahrbahneinengung, ist jedoch eine deutliche Verringerung der Geschwindigkeit zu erwarten. Ausserdem müssen andere Massnahmen in einem Abstand von maximal 100m folgen, um Beschleunigungen zu verhindern. Die erzielte Geschwindigkeitsreduktion beträgt ohne zusätzliche Massnahmen im Durchschnitt 5 km/h [70].



Bewertung von Verkehrskreiseln

Geschwindigkeitsreduktion	bis -25 km/h
Resultierende Lärmreduktion	ca. 1 bis 3 dBA
Fahrdynamik	gut, besser als Kreuzung
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	nein
Impulsgeräusche	nein
Kosten	hoch
Städtebauliche Einbindung	sehr gut

Tabelle 2.11: Wirkung von Verkehrskreiseln in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Nach Inbetriebnahme einer Kreiselanlage ergab eine Langzeitlärmmessung (Leq, 2 Wochen) in Hedingen [34] eine Pegelabnahme um 1,1 dBA tags und 1,7 dBA nachts. Gemäss [14] könnte ein Kreisell in Verbindung mit anderen Verkehrsberuhigungsmassnahmen zu einer Pegelabnahme von 2 bis 4 dB(A) führen. Eine solche Lärmreduktion ist als realistisch zu betrachten. Eine Untersuchung von Prof. Schew-Ram Mehra an der Universität Stuttgart [10] konnte z.B. nachweisen, dass die Umwandlung von lichtsignalgeregelten Kreuzungen in Kreisellverkehrsanlagen eine Senkung des Mittelpegels um etwa 3 dB (A) bewirken kann. In Basel ergab eine Vorher-/Nachhermessung eine Pegelabnahme von 1.7 dBA für die Tagperiode [82].



Bewertung von alternierendem Parken / Fahrbahnversätzen

Geschwindigkeitsreduktion	-5 km/h
Resultierende Lärmreduktion	-1.4 km/h
Fahrdynamik	eher ungünstig
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	nein
Impulsgeräusche	nein
Kosten	mittel
Städtebauliche Einbindung	schlecht

Tabelle 2.12: Wirkung von alternierendem Parken / Fahrbahnversätzen in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Fahrbahnversätze und alternierende Parkplätze am Strassenrand verhindern die Durchsicht über die ganze Strasse. Durch die Anordnung der Parkplätze und die enge Fahrbahn wird die Begegnung zweier Fahrzeuge erschwert. Dadurch kann es zu übermässigen Abbrems- und Beschleunigungsmanöver kommen.



Bewertung von Teilaufpflasterungen / Pflasterstreifen

Geschwindigkeitsreduktion	kaum
Resultierende Lärmreduktion	keine, siehe Kapitel 3
Fahrdynamik	neutral
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	ja
Impulsgeräusche	ja
Kosten	mittel bis hoch
Städtebauliche Einbindung	sehr gut

Tabelle 2.13: Wirkung von Teilaufpflasterungen / Pflasterstreifen in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

Die Unterbrechung des normalen Belages mit Pflastersteinen soll die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöhen und ihn zu einer niedrigen Geschwindigkeit bewegen. Flache Pflasterstreifen sind Massnahmen ohne grosse fahrdynamische Wirkung. Ausserdem sind bei Verwendung solcher Massnahmen negative Begleiterscheinungen im Hinblick auf die Lärmbelastung zu erwarten. So steigt der Vorbeifahrtpegel beim Überrollen der Pflasterbänder ohne deutliche Geschwindigkeitsreduktion an. Erst in Verbindung mit einer gleichzeitigen deutlichen Reduzierung des Fahrbahnquerschnittes können derartige Schwellen oder Fahrbahnbelagswechsel eine Geschwindigkeitsreduktion bewirken [70].



Bewertung von Aufpflasterungen als Fahrbahnbelag

Geschwindigkeitsreduktion	bis – 20 km/h
Resultierende Lärmreduktion	siehe Kapitel 3
Fahrdynamik	unregelmässig
Lärmerhöhende Strassenoberfläche	ja
Impulsgeräusche	ja
Kosten	sehr hoch
Städtebauliche Einbindung	sehr gut

Tabelle 2.14: Wirkung von Aufpflasterungen als Fahrbahnbelag in Bezug auf Verkehr, Lärm und anderes

In Kombination mit flankierenden Massnahmen (siehe Tabelle 2.15) können Aufpflasterungen zu einer deutlichen Verringerung der Geschwindigkeit führen. Dennoch wird die Gesamtlärsituation aufgrund der schlechten akustischen Eigenschaften der Pflastersteine erheblich verschlechtert. Pflastersteine sollten nur auf Strassenabschnitten mit extrem tiefen Geschwindigkeiten (20 km/h und weniger) eingesetzt werden.

<i>Teilaufpflästerungen + Verengung + Horizontalversatz</i>	Geschwindigkeitsreduktion*	-4.5 km/h
Bei leichten Fahrgassenversätzen, punktuellen Engstellen im Strassenraum und flach angehobenen Teilaufpflästerungen.		
<i>Abfolgen angehobener Teilaufpflästerungen + Engstellen + Horizontalversätze</i>	Geschwindigkeitsreduktion*	-8 km/h
Diese Kategorie umfasst vor allem regelmässige, aber nicht sehr dichte Abfolgen angehobener Teilaufpflästerungen, oftmals verbunden mit Fahrgassenversätzen und punktuellen Strassenverengungen [70]		
<i>Dichte Abfolge angehobener Teilaufpflästerungen oder Pflasterkissen</i>	Geschwindigkeitsreduktion*	-10 km/h
Bei „dichter Abfolge“ stehen die Hindernisse (steil angehobene Teilaufpflästerungen oder Pflasterkissen) 40 bis 60 m voneinander entfernt [70].		
<i>Voll aufgepflasterte Mischflächenabschnitte</i>	Geschwindigkeitsreduktion*	-20 km/h
In dieser Gruppe sind Massnahmen wie voll aufgepflasterte Mischflächenabschnitte in Strassen zu finden, deren 85%-Geschwindigkeitsniveau überwiegend im Bereich von 30 km/h liegt [70]. Noch geringere Fahrgeschwindigkeiten von etwa 25 und weniger km/h für den 85%-Tempo-Wert der Pkws können registriert werden, wenn die Mischflächenabschnitte der Strassen intensiv gestaltet sind, zum Aufenthalt einladen und vor allem von Fussgängern und Radfahrern in erhöhtem Masse genutzt werden (Mischflächenkonzept, das für Spiele und Aufenthalte im Strassenraum genutzt wird).		

* Reduzierung des 85%-Geschwindigkeitsniveau von Pkws

Tabelle 2.15: Wirkung von Aufpflästerungen aller Arten in Kombination mit flankierenden Massnahmen.

Die wirksamsten Massnahmen zur Reduzierung der Geschwindigkeit sind im Grunde steile Rampen. Aus akustischer Sicht sind diese Massnahmen allerdings die schlechtesten, da bei Aufpflästerungen und Rampen Störeffekte wie z.B. Schläge, ungünstige Belagseigenschaften und Beschleunigungen dominant sind (siehe Kapitel 3). Mit anderen Worten wird die erzielte Lärmabnahme infolge einer Reduzierung der Geschwindigkeit in den meisten Fällen durch die zusätzlichen Geräusche der Pflastersteine und der Fahrzeuge infolge einer ungünstigen Fahrdynamik kompensiert. Insbesondere bei Rampen ist die Pegelzunahme infolge der Beschleunigung nach dem Hindernis (siehe Kapitel 3) grösser als die erzielte Lärmreduktion durch die Verkehrsverlangsamung.

Im Unterschied zu den Aufpflästerungen sind die angegebenen Lärminderungspotentiale von Verengungen, Horizontalversätzen und Inseln realistisch, da bei solchen Massnahmen keine neuen Geräuschtypen durch den Belag oder die Fahrweise erzeugt werden.

3. Lärmtechnische Beurteilung von Aufpflästerungen

3.1 Anerkannte Vor- und Nachteile von Aufpflästerungen

Aufpflästerungen werden als Verkehrsberuhigungsmassnahmen zur Verlangsamung des Verkehrs oder aus ästhetischen Gründen eingesetzt. Für eine Aufpflästerung sprechen folgende positive Eigenschaften [71] [17]:

- Verminderung der Durchschnittsgeschwindigkeit
- Verringerung des Schwerverkehrsanteils
- Erleichterung der Strassenüberquerung für Fussgänger
- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Erschweren von Überholmanövern
- Erhaltung des historischen Kulturgutes
- Verschönerung von Strassen
- Natursteine sind leicht wieder verwendbar und sind deshalb ökologisch
- Gut eingebaute Aufpflästerungen sind dauerhaft (Bei schlechter Arbeit können aber auch gepflasterte Strassen nach 2-3 Jahren unbrauchbar werden!)
- Traditionelle Aufpflästerungen sind wasserdurchlässig (Fugen von lärmoptimierten Aufpflästerungen sind gestopft und deshalb wasserdicht!)
- Der Einbau von Pflastersteinen verschafft Arbeit



Abb.3.1: Beispiel von Pflastersteinen auf Rampe

Auf der anderen Seite führen Aufpflästerungen zu schweren Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit und des Komforts sowie zu erhöhten und manchmal unerwarteten Umweltbelastungen:

- Lärmbelästigung durch scharfes Abbremsen und Beschleunigen bei punktuellen Massnahmen [30]
- Lärmbelästigung durch Überrollen der Pflastersteine
- Erhöhte Schadstoffemissionen
- Gefährdung von Radfahrern, Fussgängern mit Nadelabsätzen und Rollstühlen, wegen offener Fugen.
- Traditionelle Pflastersteine sind rutschig
- Erschwerte Bedingungen für Rettungsfahrzeuge
- Behinderung von Strassenreinigung und Winterdienst
- Verschleiss von Autoteilen und Schäden am Fahrzeug
- Die Aufpflästerung einer Strasse kostet dreimal mehr als Asphalt
- Das Überrollen von traditionellen Pflastersteinen verursacht Erschütterungen an Gebäuden
- Grobe und unregelmässige Pflastersteine beeinträchtigen die Strassenmarkierung



Abb.3.2: Beispiel von breiten und für Fahrräder gefährlichen Fugen

Flächenhafte Aufpflästerungen führen meistens zu einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (für kurze Pflasterstreifen, siehe Kapitel 2). Gleichzeitig erzeugt das Abrollen auf Pflastersteinen übermässigen Lärm ausserhalb aber auch innerhalb des Fahrzeugs. Der Lärm im Fahrzeug hat einen psychologischen Effekt auf die Fahrweise der Autolenker und ist zum grossen Teil für die erzielte

Geschwindigkeitsreduktion verantwortlich [17]. Ironischerweise stellen Pflastersteine nur dann eine Massnahme zur Verlangsamung des Verkehrs dar, wenn sich die Autofahrer(-innen) durch den Lärm ihres eigenen Fahrzeuges gestört fühlen.

3.2 Bisherige Bewertung der Aufpflasterungen in Strassenlärmmodellen

In Europa verfügt fast jedes Land über ein eigenes Berechnungsmodell für die Strassenlärmprognosen. Emissionen und Immissionen werden als Mittelungspegel L_{eq} für eine Tag- und eine Nachtperiode ermittelt. Obwohl alle Modelle auf den gleichen akustischen Grundsätzen beruhen, unterscheiden sie sich hinsichtlich der Wahl der Parameter, die bei der Berechnung betrachtet werden (z.B. Konstante, Anzahl der Fahrzeugkategorien, Gefälle, Bodeneffekte, usw.). Aufgrund solcher unterschiedlicher Annahmen sind die Pegelwerte verschiedener Modelle nicht immer direkt miteinander vergleichbar [9]. Basiswerte für den energieäquivalenten Dauerschallpegel einer Pkw-Vorbeifahrt sind in der folgenden Tabelle für verschiedene Rechenverfahren zu Vergleichszwecken angegeben:

Rechenverfahren	Leq (1 Fz/h)	
	1 m	25 m
Deutschland	46.5	31
Schweiz	45	31
Niederlande	44.7	31
Skandinavien	48	34
Österreich	47	33

Der in der Tabelle dargestellte Wert ist der äquivalente Dauerschallpegel einer Pkw-Vorbeifahrt pro Stunde für den angegebenen Abstand ab Strasse und bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf Asphaltbeton-Belag.

Tabelle 3.1: Vergleich des äquivalenten Dauerschallpegels einer Pkw-Vorbeifahrt in verschiedenen Modellen

Der mit dem gängigen schweizerischen Strassenlärmmodell STL 86+ berechnete Mittelungspegel für einen Pkw bei 50 km/h in 1 m Abstand liegt ca. 1.5 dBA unter dem deutschen Wert (RLS-90) und ca. 2 dBA unter demjenigen aus Österreich (RVS 3.02). In 25 m Abstand lassen sich keine Differenzen zwischen dem deutschen und dem schweizerischen Modell mehr feststellen.

In jedem Modell werden unter anderem die akustischen Auswirkungen von besonderen Strassenbelagstypen in Form eines Korrekturfaktors berücksichtigt. Diese Korrekturfaktoren stützen sich auf die Messungen und Erfahrungen der verschiedenen Länder. Die Pegelzuschläge oder -abzüge für die Belagseigenschaften werden als Differenz zu einem lärmneutralen Belag angegeben (ISO-Belag in EU-Ländern oder Asphaltbeton in der Schweiz). Die jeweiligen Belagskorrekturen für Aufpflasterungen in der Schweiz, Deutschland, Österreich und in den Europa-Richtlinien sind in der Tabelle 3.2 aufgeführt und werden nachfolgend kommentiert.

SCHWEIZ: Im neuen schweizerischen Strassenlärmmodell SON ROAD wird angenommen, dass die Belagsvariationen das Rollgeräusch direkt beeinflussen können. In Ermangelung eigener Messungen wurde auf die Daten der deutschen RLS-90 zurückgegriffen. Diese wurden so umgerechnet, dass die Korrektur für den Belag sich nur auf die Rollgeräuschkomponente bezieht. Für Aufpflasterungen (grob) beträgt die Belagskorrektur auf das Rollgeräusch unabhängig von der Geschwindigkeit +8 dBA. Bei besonderen Belägen muss die Belagskorrektur durch Messungen ermittelt werden [20] [52].

Land / Modell	Pflastertyp	Geschwindigkeit (km/h) und Korrekturzuschlag (dBA)		
		30	40	50
Schweiz (SON ROAD)	Flache Pflastersteine	+ 8 (auf Rollgeräusch alleine)		
	Kopfsteinpflaster			
Deutschland (RLS 90)	Flache Pflastersteine	+ 2	+ 2.5	+ 3
	Kopfsteinpflaster	+ 3	+ 4.5	+ 6
Europa-Richtlinien	Flache Pflastersteine	+ 3		
	Kopfsteinpflaster	+ 6		
Österreich (RVS 3.114)	Flache Pflastersteine	+ 8		
	Kopfsteinpflaster			

Tabelle 3.2: Korrekturfaktoren für Aufpflasterungen in Strassenlärmmodellen verschiedener Länder

DEUTSCHLAND: Gemäss der deutschen Richtlinie für den Lärmschutz an Strassen (RLS 90) werden unterschiedliche Korrekturwerte für das Gesamtgeräusch (Fahrgeräusch) in Abhängigkeit von Geschwindigkeit (30, 40 und 50 km/h) und Pflasterart berücksichtigt (flache Pflastersteine mit Fugenbreite < 5 mm und Kopfsteinpflaster mit Fugenbreite > 5 mm) [72].

EUROPA: In der europäischen Richtlinie werden für die Lärmabnahme folgende Korrekturfaktoren berücksichtigt: bei Geschwindigkeiten unter 60 km/h; + 3 dBA für Pflaster mit glatter Oberfläche und + 6 dBA für Pflaster mit rauer Oberfläche [53].

ÖSTERREICH: Die Ermittlung der Lärmimmissionen erfolgt nach den Richtlinien und Vorschriften für Strassenbau (RVS 3.114) sowie den Normen ÖNORM S5021 und ÖAL 23. Die Korrektur für den Fahrbahnbelag beträgt für Pflaster + 8 dB. Ausserdem wurde mit Berücksichtigung der Tempo-30-Strassen eine Korrekturfunktion extrapoliert [2].

Die Korrekturzuschläge für Pflastersteine sind je nach Modell extrem unterschiedlich. Wenn man erreichen möchte, dass die Pflastersteine akustisch schlecht abschneiden, nimmt man einen hohen Zuschlag.

Fazit: Für flächenhafte Aufpflasterungen scheinen die Zuschläge des deutschen Modells RLS-90 die realistischsten zu sein. Für flache und angehobene Pflasterstreifen, und im Allgemeinen für lokale Unebenheiten an Strassen (seien es Kanaldeckel, Schwellen, Fugen, usw.) liegen zurzeit keine Belagskorrekturen und kein Beurteilungsmittel vor.

3.3 Lärmmessungen an Aufpflasterungen

3.3.1 Übersicht der zu untersuchenden Situationen

Die durchschnittlichen Veränderungen der Schall- und Geschwindigkeitsniveaus können anhand von Vorher-/Nachhermessungen bestimmt werden. Bei solchen Untersuchungen wird der Mittelungspegel Leq verwendet, gemessen über einen längeren Zeitraum (mehrere Stunden, 24 h oder 1 Woche) bei einem festgelegten Punkt im Nahbereich einer Strasse oder an der Fassade einer Liegenschaft.

Die Messung des Dauerschallpegels Leq erlaubt keine Aussage zur Pegeldynamik. Dafür wird in Ergänzung zum Mittelungspegel ebenfalls der Maximalpegel L_{max} innerhalb der Messdauer verwen-

det. In diesem Kapitel werden die Resultate von Messungen an Aufpflästerungen in folgenden typischen Situationen präsentiert:

Situation	Rahmenbedingungen
1 Flache Pflasterstreifen auf Strassen (als VB-Massnahme)	Hauptverkehrsstrassen, $v = 50$ km/h
2 Angehobene Pflasterstreifen (als VB-Massnahme)	Innerhalb der Ortschaften und Wohngebiete, $v = 30$ km/h
3 Flächenhafte Aufpflästerungen (als Belag)	Innerhalb der Ortschaften, $v = 30-50$ km/h

VB-Massnahme: Verkehrsberuhigungsmassnahme

Tabelle 3.3: Typische Situationen mit lästigen Geräuschemissionen bei lokalen Aufpflästerungen

In der Literatur sind Messresultate für die beiden ersten Situationen sehr selten. Die meisten Forschungsprogramme und Messkampagnen konzentrieren sich auf die akustischen Eigenschaften von Aufpflästerungen als Strassenbelag und nicht als Verkehrsberuhigungsmassnahme. Für Pflastersteine als Belag sind die Resultate (Vorbeifahrtpegel L_{max} bei 30 und 50 km/h auf verschiedenen Oberflächen) einer umfangreichen Studie des Amtes für Umweltschutz der Stadt Rostock (Deutschland) in Anhang 2 zusammengestellt [78].

Im Unterschied zu längeren gepflasterten Strassen ist bei kurzen Pflasterstreifen zu beachten, dass die *Emissionserhöhung* nicht identisch mit der *Immissionserhöhung* ist [52]. Die Immission wird in diesem Fall durch 3 Lärmquellen verursacht: den Strassenabschnitt vor der Aufpflästerung, die Aufpflästerung und den Strassenabschnitt danach. Je kürzer die Aufpflästerung und je weiter der Empfänger von der Strasse entfernt ist, umso geringer wirkt sich die durch eine Aufpflästerung verursachte Pegelerhöhung auf die Lärmimmission aus, da der Aspektwinkel des lautesten Abschnitts geringer wird.

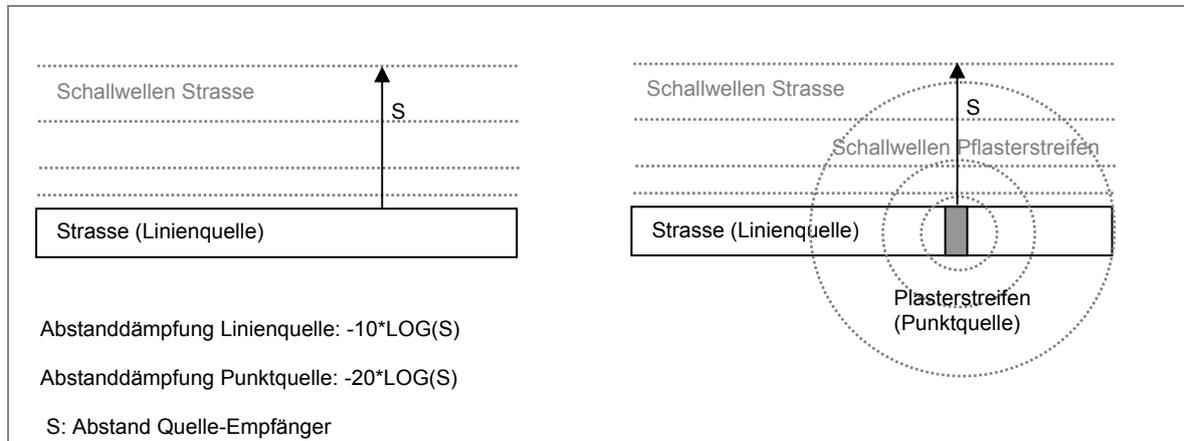


Abbildung 3.3: Darstellung der Lärmquellen in Situationen mit dauerndem Verkehr.

Im Unterschied zu Strassen mit durchgehendem Verkehr sind kurze Pflasterstreifen keine Linienquellen, sondern Punktquellen. Demzufolge nimmt bei zunehmender Entfernung der Lärm eines Pflasterstreifens schneller ab als der Lärm einer Strasse. Bei geringem Verkehr und insbesondere in der Nacht wäre es jedoch auch korrekt, die Strasse als Punktquelle zu betrachten, da der Strassenlärmpegel zu einem bestimmten Zeitpunkt oft durch ein einziges Fahrzeug erzeugt wird.

In der Literatur sind zwar viele Aussagen, aber nur wenige Messdaten zu Pflastersteinen vorhanden. Bei vielen Untersuchungen bleiben wichtige Informationen zum Messverfahren und zu den Messbedingungen ungeklärt. Die Aussagen dieses Kapitels stützen sich deshalb grundsätzlich auf Forschungsarbeiten, in denen die Lärmbelastung für unterschiedliche Pflastersteine und bei unterschied-

lichen Geschwindigkeiten gemessen wurde. Die Schlussfolgerungen dieser Studien werden anschliessend mit den Ergebnissen von einigen weniger beachteten Studien verglichen.

3.3.2 Lärmmessungen an kurzen Aufpflästerungen (Streifen und Rampen)

In Deutschland wurde der Vorbeifahrtpegel auf Querstreifen mit verschiedenen Pflasterarten gemessen. Neben der Ermittlung des Maximalpegels L_{max} wurde die Dynamik des Pegelverlaufes während folgender Lärmphasen beschrieben: Auffahrt auf die Pflastersteine, Überfahrt und Beschleunigungsphase nach dem Pflasterstreifen. Der Maximalpegel L_{max} wurde in 7.5 m Abstand ab Fahrbahnmitte und 1.5 m Höhe gemessen [71].

	Art der Massnahme	Ergebnisse Lärm	Ergebnisse Geschwindigkeit
Standort 1	Niveaugleiche Aufpflästerung (Streifen) Länge 5m, Höhe 0cm V=50km/h	Bei der Auffahrt auf die Aufpflästerung: Erhöhung um + 10 dBA in 0.4 Sek.. Maximalpegel L_{max} = 84 dBA	Konstante Geschwindigkeit, kein Abbremsen
Standort 2	Angehobene Aufpflästerung (Rampe), Länge 5.6m, Höhe 20cm V=30km/h	Überfahrt verursacht keinen Pegelsprung sondern die anschliessende Beschleunigung bis + 9 dBA Maximalpegel L_{max} über 85 dBA	Ungleichmässiger Geschwindigkeitsverlauf
Standort 3	Grobes Kopfsteinpflaster (Rampe) Länge 4m, Höhe 10cm V=30km/h	Bei konstanter Geschwindigkeit, Erhöhung um ca. 3dBA. Durch Beschleunigung nach der Aufpflästerung Pegelanstieg von bis zu 10 dBA	Ungleichmässiger Geschwindigkeitsverlauf
Standort 4	Grobes Kopfsteinpflaster (Rampe) Länge 4m, Höhe 10cm V=30km/h	Bei konstanter Geschwindigkeit Erhöhung um ca. 5 dBA. Durch Beschleunigung nach der Aufpflästerung Pegelanstieg von bis zu 10 dBA	Ungleichmässiger Geschwindigkeitsverlauf

Tabelle 3.4: Beschreibung des Pegelverlaufs bei der Überfahrt von verschiedenen Pflasterstreifen

Bei angehobenen Pflasterstreifen verursacht die Beschleunigung nach der Aufpflästerung mehr Lärm als die Überfahrt. Alle untersuchten Pflasterstreifen wurden mit 30 km/h überfahren. Die systematische Beschleunigung nach dem Querstreifen führte zu einem Pegelanstieg von 10 dBA.

Bei der Auffahrt auf die flachen Pflasterstreifen sind die Impulsgeräusche am stärksten, da grosse Texturvariationen bei der Übergangszone Belag/Pflaster auftreten.

Fazit: Mit konstanter Geschwindigkeit beträgt der Pegelanstieg bei der Auffahrt auf die flachen Pflasterstreifen 10 dBA gegenüber dem angrenzenden Belag, mit einem Maximalpegel L_{max} von 84 dBA in 7.5m Abstand und einer Wirkzeit von 0.4 Sekunden. Auf niveaugleichen Pflastersteinen wird nicht abgebremst. Die Fahrzeuge können ohne Beeinträchtigung mit 50 km/h fahren.

3.3.3 Lärmmessungen an flächenhaften Aufpflästerungen

In Anhang 2 sind die Vorbeifahrtpegel L_{max} mehrerer Aufpflästerungstypen zusammengestellt

Schweiz

In Herisau wurden an zwei 100m langen Teststrecken (Schwarzbelag und Aufpflästerung aus Kleinpflastersteinen) Vorbeifahrtmessungen mit kontrollierter Geschwindigkeit durch das Tiefbauamt des Kantons Appenzell A.Rh. durchgeführt. Dabei wurden die SEL-Werte der Vorbeifahrten in 4m Abstand gemessen und nachträglich als Mittelungspegel Leq umgerechnet [52].

Fahrzeugkategorie	Geschwindigkeit (km/h) / Pegeldifferenzen (dBA)							
	25	30	35	40	45	50	55	60
PKW		+ 3		+ 4	+ 4.5		+ 5	
LKW	+ 1	+1.5	+2.5	+3.5			+ 4	

Tabelle 3.5: Pegeldifferenz (Pflaster-Belag) für zwei Fahrzeugkategorien bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Bei Pkws besteht der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Pegel anscheinend nur im Bereich von 30 bis 50 km/h. Darunter und darüber scheinen die Pegeldifferenzen zwischen dem normalen Belag und der Aufpflästerung relativ stabil zu sein. Die Lärmerhöhung durch die Aufpflästerung, bezogen auf den Mittelungspegel Leq , beträgt bis zu 4 dBA bei Lkws und 5 dBA bei Pkws. Es ist darauf zu achten, dass diese Messung ohne Motorgeräusch und bei konstanter Geschwindigkeit durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse von Belagsgütermessungen werden regelmässig in die Belagsdatenbank des Ingenieurbüros Grolimund & Partner AG eingetragen und ausgewertet. Gemäss dieser Datenbank liegen die Geräuschemissionen der meisten Aufpflästerungen zwischen 0 und +3 dBA über denjenigen eines lärmneutralen Belages (Asphaltbeton). Sicher ist, dass die in der Datenbank erfassten Aufpflästerungen nicht zu den lautesten Belägen gehören (keine Kopfsteinpflaster z.B.).

Österreich

Im Rahmen des österreichischen SYLVIE-Projektes wurde in einer Messserie zum Einfluss der Fahrbahnoberfläche in städtischen Strassen die Geschwindigkeit und der Schallpegel bei Vorbeifahrt von Pkws und Lkws in verschiedenen geschlossen bebauten Wiener Strassen (Höhe der Bebauung drei bis vier Geschosse) gemessen [47]. Bei den untersuchten Strassenbelägen handelt es sich um Rauasphalt, Beton und Aufpflästerungen mit Gross- und Kleinsteinpflaster.

Fahrzeugkategorie / Belag		Geschwindigkeit (km/h) / Pegeldifferenzen (dBA)	
		30	50
PKW	Aufpflästerung (Pelzgasse)	+3	-
	Grosssteinpflaster (Antonigasse)	+5	(+2)
	Kleinsteinpflaster (Lacknergasse)	+4	+5

Tabelle 3.6: Erhöhung des Mittelungspegels Leq gegenüber einem lärmneutralen Belag für verschiedene Aufpflästerungen.

Es wurde sowohl der Maximalpegel L_{max} bei der Vorbeifahrt als auch der Schallereignispegel SEL (Grundlage für die Berechnung des äquivalenten Dauerschallpegels) für eine grosse Zahl von Pkws im normalen Verkehr gemessen.

Mit einer Pegelzunahme von 3 bis 4 dBA bei 30 km/h und 5 dBA bei 50 km/h liegen die Werte des Wiener-Projektes und diejenigen der Messung in Herisau sehr nahe beieinander.

Deutschland

Im Jahre 2004 erarbeitete das Amt für Umweltschutz der Stadt Rostock eine Reihe von Planungsempfehlungen für den Einsatz von Pflastersteinen in der Strassengestaltung [78]. Diese Empfehlungen basieren auf umfangreichen Messungen der Geräuschemissionen von ebenen und unebenen Aufpflästerungen in elf Stadtstrassen (siehe Anhang 2). Die verwendeten Bezeichnungen „eben“ und „uneben“ beziehen sich auf die Art der Steinoberflächen. Nachfolgend werden die ermittelten Abweichungen des Maximalpegels L_{max} gegenüber dem Referenzbelag (Messung auf Asphaltbeton) für zwei übliche Referenzgeschwindigkeiten angegeben.

Fahrzeugkategorie / Belag		Geschwindigkeit (km/h) / Pegeldifferenzen (dBA)	
		30	50
PKW	Bei ebenen Pflastern	+6 bis +7	+6 bis +7
	Bei unebenen Pflastern	+9 bis +12	+9 bis +13

Tabelle 3.7: Erhöhung des Maximalpegels L_{max} gegenüber einem lärmneutralen Belag für verschiedene Aufpflästerungen.

Die „ebenen Pflaster“ führen bezogen auf die untersuchte Asphaltbeton-Referenzdeckschicht zu einer viermal höheren Geräuschemission (Pegelerhöhungen um 6-7 dBA im Vgl. zu Asphaltbeton). Die „unebenen Pflaster“ führen bezogen auf die untersuchte Asphaltbeton-Referenzdeckschicht zu einer 8 bis 16-fach höheren Geräuschemission (Pegelerhöhungen um 9-12 dB (A) im Vgl. zum Asphaltbeton) Dies entspricht in etwa einer Verdopplung der subjektiv empfunden Lautstärke. Die angegebenen Werte beziehen sich ausschliesslich auf den Maximalpegel L_{max} und nicht auf den Mittelungspegel.

Pegelerhöhung im Fahrzeug

Das Überfahren von Pflastersteinen verursacht ausserdem einen erheblichen Pegelanstieg im Innenraum eines Fahrzeugs. Um dieses Phänomen besser zu verstehen, wurden im Rahmen einer Studie [8] die Lärmemissionen eines einzelnen Fahrzeugs bei 10, 20, 30, 40 und 50 km/h gemessen, mit drei Messungen pro Geschwindigkeitsniveau. Dabei wurde die Vorbeirollmethode mit abgeschaltetem Motor angewendet. Zur Erfassung der Schalldruckemission im Innenraum diente ein Messmikrofon in Ohrposition des Beifahrers. Drei Pflastertypen wurden untersucht und mit einem Referenzbelag verglichen:

- A. Sehr grobes Pflaster mit unregelmässiger Form und Höhe, durchschnittliche Pflastergrösse 200 x 200 mm
- B. Grobes Pflaster, durchschnittliche Pflastergrösse 150 x 100 mm
- C. Basaltpflaster, gleichmässige Höhe und Abmessungen, durchschnittliche Pflastergrösse 100 x 100
- D. Mittelrauer Asphalt Korngrösse ca. 8-12 mm

Bei einer Geschwindigkeit von $v = 50$ km/h unterscheiden sich die Maximalpegel L_{max} auf den Fahrbahnen A und D um 16.9 dB, d.h. A wird als 49-mal so laut empfunden wie D.

Bei einer Geschwindigkeit von $v = 30$ km/h wird der Belag A als ca. 43-mal so laut empfunden wie D. Gemäss dieser Studie dürfte der Effekt einer Geschwindigkeitsreduktion von 50 auf 30 km/h zum Zwecke der Lärmreduktion daher nur marginal sein.

Fazit: Bei flächenhaften Aufpflästerungen besteht eine direkte aber nicht lineare Beziehung zwischen den Lärmemissionen und der Geschwindigkeit. Vor allem im Bereich von 30 bis 50 km/h kann

eine leichte Geschwindigkeitserhöhung eine deutliche Pegelzunahme zur Folge haben. Die Erhöhung des Mittelungspegels L_{eq} beträgt ca. 3 bis 4 dBA bei 30 km/h und ca. 5 dBA bei 50 km/h gegenüber einem lärmneutralen Belag (aufs Gesamtgeräusch). Je nach Pflastertyp und Geschwindigkeit liegt die Zunahme des Maximalpegels zwischen 6 dBA (ebene Pflastersteine, 30 km/h) und 13 dBA (unebene Pflastersteine, 50 km/h).

3.4 Lärmoptimierte Aufpflasterungen

Für praktische Empfehlungen zum lärmbewussten Einbau von Pflastersteinen, siehe Anhang 1.

3.4.1 Optimierung der Aufpflasterungen hinsichtlich Lärm



Im Rahmen der Sanierung einer Asphaltdecke in der Ortsdurchfahrt hat sich die Gemeinde Zell bei Würzburg für ein Betonsteinpflaster des Typs Carat der Firma Schmitt & Weitz entschieden. Ausschlaggebend waren die Planungsvorgaben, den Verkehrslärm zu drosseln und dem Denkmalschutz Rechnung zu tragen [36].

Die in Zell bei Würzburg eingesetzten Steine haben eine Grösse von 19,5 x 13 cm, eine Fugenbreite von 3 bis 5 mm und sind scharfkantig.

Abb. 3.4. Lärmarme Pflastersteine in Zell bei Würzburg

Eine Kontrollmessung sollte nachweisen, dass die neu eingebauten Pflastersteine keine Lärmzunahme verursachen. Die Schmitt & Weitz Baustoffwerke GmbH & Co. KG, Kleinostheim, haben im Sommer 2000 bei der TÜV Automotive GmbH, Herzogenrath, ein lärmtechnisches Gutachten am Carat-Pflaster im Vergleich zu einem Asphaltbetonbelag und einem gebräuchlichen Pflasterbelag in Auftrag gegeben. Alle drei Beläge befinden sich in unmittelbarer Nähe des Marktplatzes in Zell. Die Vergleichsmessungen, die mit Hilfe eines VW-Golfs durchgeführt wurden, wiesen für die Carat-Betonsteine sowohl bei 30 km/h und 50 km/h als auch bezüglich der Rollgeräusche faktisch die gleichen Geräuschwerte auf wie beim Asphaltbeton.

Dass Lärm bei Pflastersteinen reduziert werden kann, bestätigt eine Studie vom Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen (FIGE), in der die Lärmimmissionen von 12 Pflastertypen untersucht wurden [40]. Das Hauptziel dieser Studie war die Ermittlung der Faktoren, die ein lärmarmes Pflaster beeinflussen. Untersucht wurden unter anderem der Einfluss der maximalen Breite der Fugen und Fasen sowie derjenige des Pflasterverbandes auf die Geräuschentwicklung. Das FIGE zieht folgende Schlussfolgerungen:

- ▶ Die Gesamtbreite der Fuge und Fase muss weniger als 8 mm beim Läuferverband und weniger als 12 mm beim Diagonalverband betragen.
- ▶ Es müssen Pflastersteine mit fein strukturierter Oberfläche ausgewählt werden.

Folgende Pflastertypen mit niedrigen Geräuschpegeln werden von der FIGE empfohlen:

- Gralinie-Pflaster (Hansebeton / Lauenburg): Die besten Ergebnisse wurden mit dem Steinformat 20 x 30 cm und durch eine Verlegung im 45°-Diagonalwinkel erzielt.
- Planolit-Pflaster (Kann Baustoffwerk / Bendorf): Die Rauhgigkeit der Pflasteroberfläche beeinflusst den pneumatischen Effekt beim Reifen-Boden-Kontakt positiv. Eine weitere Reduktion der Rollgeräusche erfolgt durch die Diagonalverlegung des Pflasters. Alle Steine haben eine Stärke von 8 cm. Die Geräuschentwicklung lässt sich bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h mit den Emissionen eines Asphaltbelages vergleichen.
- Tavolo-Pflaster (FC Nüdling Betonelemente GmbH / Fulda): Eine scharfe Kantenausbildung und eine ebene Fläche mindern die Abrollgeräusche.

Andere Quellen bestätigen [3] [73] [74] [75], dass Aufpflasterungen mit grossen Steinen, mit einer fein strukturierten Oberfläche ohne Fase und mit schmalen Fugen, bei 30 und 50 km/h gleich laut wie der deutsche Bezugsbelag der RLS-90 (Asphaltbeton mit 11 mm Grösstkorn) sein können [73] [74] [75]. Die Lärmbewertung von optimierten Pflastersteinen gegenüber dem Referenzbelag sollte zwischen 0 und +3.5 dBA liegen (Korrekturfaktor für den Mittelungspegel L_{eq} gegenüber dem Referenzbelag Asphaltbeton 0/11).

Mitsubishi Kagaku Sanshi Corp, eine Filiale von Mitsubishi Chemical Corp., hat ein neues Harz zur Verbesserung der Oberflächentextur von Pflastersteinen ausgearbeitet [58]. Diese Erfindung sollte in der Lage sein, die Lärmemissionen von Aufpflasterungen noch weiter zu reduzieren.

3.4.2 Optimierung der Aufpflasterungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit

Im Rahmen der Optimierung der akustischen Eigenschaften von Pflastersteinen wurden gute Ergebnisse mit einer Anordnung der Steine im 45°-Diagonalwinkel erzielt. Was die Stabilität einer Aufpflasterung anbelangt, bringt diese Anordnung zusätzliche Vorteile [25].

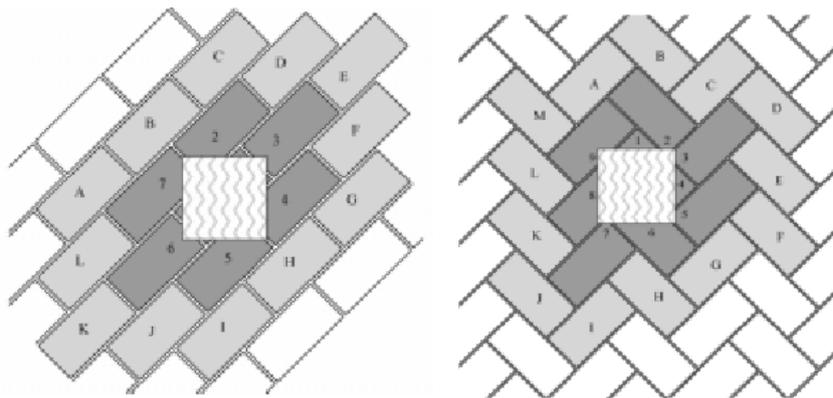


Abbildung 3.5: Stabile und dauerhafte Verlegung von Pflastersteinen

Bei einer 45°-Winkel-Anordnung ist die Lastenverteilung günstiger und der auf die Tragschicht ausgeübte Druck schwächer [25], weil die Kontaktfläche zwischen dem Reifen und der Belagsoberfläche auf viele Pflastersteine verteilt wird.

Die geforderte Druckfestigkeit und der Reibungswiderstand werden nur erzielt, wenn die Pflastersteine dicht gelegt werden und die Fugen eine stabile Verbindung herstellen [25]. Die Fugen müssen also den folgenden Anforderungen genügen:

- ▶ eng
- ▶ in vollem Umfang gefüllt
- ▶ gefüllt mit einem dichten, stabilen und widerstandsfähigen Material

Die Fuge muss eine Mindestbreite aufweisen, um sie mit Sand von entsprechender Korngrösse füllen zu können. Der benutzte Sand muss der Abnutzung gut standhalten.

3.4.3 Optimierung der Aufpflasterungen hinsichtlich Verkehrsicherheit

Verkehrsberuhigungsmassnahmen müssen die Anforderungen an die Verkehrssicherheit aller Verkehrsteilnehmer jederzeit erfüllen. Die verwendeten Materialien sollen dabei die negativen Auswirkungen der Bodenversiegelung reduzieren, jedoch die natürlichen Ressourcen (z.B. Grundwasser) schonen [67] [68]. Sie dürfen auch keine übermässige Lärmbelastung verursachen.

Die fein strukturierte Oberfläche, die Form und die Regelmässigkeit der Beton-Pflastersteine erhöhen die Sicherheit und den Komfort der Fussgänger [25]. Die Gestaltung von gepflasterten Zonen mit grossen Pflastersteinen aus Beton und mit engen Fugen (<2mm) kann zu einer gewaltigen Verbesserung des Komforts und der Sicherheit beim Radfahren führen.

Gegenüber Asphaltstrassen erlauben die gepflasterten Strassen einen besseren Wasserfluss bei Regen [58]. Diese Eigenschaft kann aber auch zu einer Verschmutzung der Böden führen. Wenn eine bessere Wasserdurchlässigkeit erwünscht ist, müssen die Fugen mit Sand und nicht mit Mörtel gefüllt werden.

3.4.4 Fazit bezüglich einer Optimierung von Aufpflasterungen

Mit der Wahl der richtigen Pflastersteine können die akustischen Eigenschaften, die Verkehrsicherheit und die Lebensdauer einer Aufpflasterung deutlich verbessert werden. Die wichtigsten Parameter zur Optimierung von Aufpflasterungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt [52] [28] [58] [25] [67] [68] [36] [73] [74] [75] [40]:

Parameter	Anforderungen
1 Steinformat	Grosse Steinformate mit scharfen Kanten
2 Oberfläche	Ebene / feinrauhige Oberfläche / Ohne Fasen
3 Fugen	Schmale Fugen (< 8mm), mit einem dichten, stabilen und widerstandsfähigen Material gefüllt (Sand)
4 Anordnung	Pflastersteine im 45°Winkel in Fahrtrichtung angeordnet; ebenfalls halbrunde, diagonale oder Fischgrat-Anordnungen / keine Reihen-Anordnung der Pflastersteine, die rechtwinklig überfahren werden
5 Widerstandsfähigkeit	Keine defekten Aufpflasterungen mit losen Steinen / Schmale Fugen / Anordnung mit einem 45°-Winkel in Fahrtrichtung oder Fischgrat-Anordnung.
6 Belagsanschluss	Kein Vertikalversatz zwischen der Aufpflasterung und dem angrenzenden Belag

Tabelle 3.8: Parameter zur Optimierung der Aufpflasterungen.

Bei flach angeordneten Pflastersteinen muss kein Vertikalversatz zwischen dem Pflaster und dem angrenzenden Belag vorhanden sein. Tatsächlich wurde im Rahmen mehrerer Untersuchungen festgestellt, dass flach gelegte Pflastersteine auch bei hohen Geschwindigkeiten befahrbar sind (50 km/h). Ein schlechter Belagsanschluss verursacht ein unnötiges impulshaltiges Geräusch ohne Verlangsamung der Geschwindigkeit.

Erheblich störend sind ebenfalls periodische Übergänge zwischen dem Asphaltbelag [28]. Der Naturschutzverbund Thüringen macht darauf aufmerksam, dass es bereits bei Geschwindigkeiten ab 20/30 km/h auf Pflaster zu erhöhten Verkehrsgläuschen kommen kann [10]. Bei Aufpflästerungen sollte man ebenfalls nicht vergessen, dass die Klappergeräusche durch Aufbauten bei Nutzfahrzeugen und Lastwagen ebenfalls zu einer zusätzlichen Lärmbelastung beitragen [52].

4. Beurteilung der Störwirkung von Pegelvariationen und impulshaltigen Geräuschen

Die wichtigsten Erkenntnisse dieses Kapitels sind in Anhang 4 zusammengestellt

4.1 Definition eines impulshaltigen Geräusches

Das Fahren auf Pflastersteinen und allgemein das Überrollen von quer zur Fahrbahn gerichteten Strukturen verursacht Pegelspitzen (siehe Abbildung 4.1), die von Anwohnern als besonders störend empfunden werden. Impulshaltige Geräusche werden nachfolgend definiert.

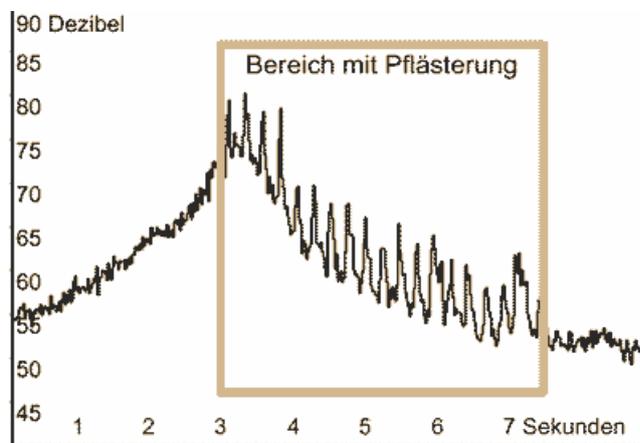


Abb. 4.1: Beispiel eines Pegelverlaufs: Vorbeifahrt eines Pkws auf Pflastersteinen

Im Allgemeinen handelt es sich bei kurzzeitigen Geräuschspitzen um Maximalwerte des Schalldruckpegels, die durch Einzelereignisse hervorgerufen werden [12].

Kurzzeitige Geräuschspitzen werden für gewöhnlich durch den Maximalpegel L_{max} des Schalldruckpegels beschrieben. Eine präzisere Definition eines impulshaltigen Geräusches erfordert eine detaillierte Beschreibung der Wiederholbarkeit und der Amplitude des Tones.

In Frankreich werden ihrer Dauer entsprechend zwischen „sich schnell wiederholenden impulsiven Tönen“ („sons impulsionnels“, unter 300 Millisekunden), impulsiven Tönen (weniger als eine Sekunde) und kontinuierlichen Tönen (mehr als eine Sekunde) unterschieden [19]. Im Staat Minnesota (USA) wird der impulsive Ton nicht nur durch die Dauer des Ereignisses bestimmt, sondern auch durch die Eigenschaften des Pegelverlaufes: Impulsgeräusche sind einzelne oder mehrere Pegelspitzen, deren Anstiegszeit, Dauer und Abstand jeweils weniger als 200 ms betragen [48]. Andere Staaten definieren Impulsgeräusche einfach als einzelne oder mehrfache Geräuschfälle, die eine Sekunde oder weniger dauern.

In vielen Situationen und insbesondere bei Pegelverläufen mit feiner Auflösung sind kurze Pegelvariationen zu beobachten, die keine Störung verursachen und deshalb nicht als Impulsgeräusche bezeichnet werden. Bei der Beurteilung von Geräuschspitzen spielt also die Differenz zwischen dem Maximalwert und dem Grundgeräusch eine bedeutende Rolle. Eine Geräuschspitze ist entsprechend dann impulshaltig, wenn der Maximalpegel mehr als 5 dB über den mittleren Pegel des übrigen Geräusches steigt [79].

Der Pegelverlauf eines impulsiven Tones kann je nach Situation einem der drei folgenden Typen zugeordnet werden [48]:

1. Schock-Impulsgeräusch: Eine scharfe, hohe positive Druckspitze, die von einer langen, niedrigen negativen Spitze begleitet wird (Beispiel: Das Schiessen).
2. Sinusförmiges Impulsgeräusch: Nahe der Quelle hat die Schalldruckkurve einen scharfen Aufstieg, gefolgt von einem langsamer fallenden Pegel; oft als N-Kurve bezeichnet, ähnlich wie das ideale Schock-Impulsgeräusch. Es handelt sich um periodische Impulsgeräusche, die in einer Frequenz von 1 bis 10mal pro Sekunde auftreten können (Beispiel: Das manuelle Hämmern).
3. Verfallendes Sinusoid: Es handelt sich hierbei um stark periodische, halbkontinuierliche Impulsgeräusche (mehr als 10 pro Sekunde). Diese Impulsgeräuschart ist hauptsächlich in der Industrie zu finden (Beispiel: Pneumatisches Hämmern).

Fazit: Impulsgeräusche sind Pegelspitzen, die mehr als 5 dB über den mittleren Pegel des übrigen Geräusches steigen und deren Dauer weniger als 1 Sekunde beträgt.

4.2 Wahrnehmung von Pegelvariationen und impulshaltigen Geräuschen

4.2.1 Intensität der Wahrnehmung bei Menschen

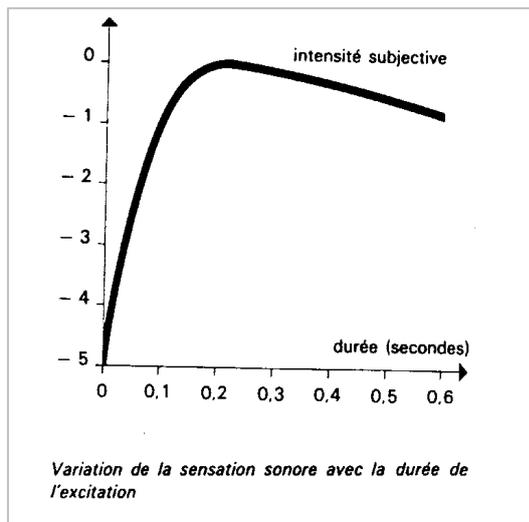


Abb.4.2 : Darstellung der subjektiven Intensität der Wahrnehmung in Abhängigkeit der Ereignisdauer

Beim Lärm lassen sich zeitliche Lücken ab einer Dauer von ca. 5 ms sicher detektieren [41]. Begrenzt wird die Zeitauflösung durch die Vor- und Nachverdeckung, d.h. ein Testsignal kann ab ca. 10 ms vor und bis zu 200 ms nach einem (lauteren) Maskierungssignal nicht mehr gehört werden. Das liegt an der Trägheit des zentralen Hörsystems bei der Anpassung an einen neuen Pegel.

Ausserdem variiert die subjektive Intensität der Wahrnehmung in Abhängigkeit der Dauer eines Lärmereignisses. In Abbildung 12 wird ersichtlich, dass die maximale Intensität bei 200 ms liegt. Oberhalb und besonders unterhalb dieser Ereignisdauer nimmt die subjektive Intensität der Wahrnehmung ab. Verglichen mit einem 100 ms langen Lärmsignal wird ein ähnliches Signal mit einer Dauer von 200 ms als lauter wahrgenommen.

4.2.2 Wahrnehmung bei Variationen des momentanen Schalldruckpegels (L_{max})

Die subjektive Beurteilung von Schalldruckpegelveränderungen lässt sich, basierend auf dem momentanen Schalldruckpegel (oder dem Maximalpegel L_{max}), wie folgt beschreiben [72]:

Pegeldifferenz	Wahrnehmung
0 – 2 dBA	Nicht wahrnehmbare Veränderung: liegt innerhalb der Messgenauigkeit, von daher oft bedeutungslos
2 – 5 dBA	Gerade wahrnehmbare, kleine Veränderung
5 – 10 dBA	Deutlich wahrnehmbare Veränderung; eine Veränderung von 10 dBA wird subjektiv in etwa als doppelt resp. halb so laut empfunden
10 – 20 dBA	Grosse und überzeugende Veränderung
> 20 dBA	Überaus grosse und sehr bedeutende Veränderung

Tabelle 4.1: Wahrnehmung von Variationen des Maximalpegels L_{max}

Die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung bei kleinen Pegelveränderungen sind noch ungeklärt. Die Einen setzen diese Grenze bei 2 dBA [72] fest, während andere Autoren [50] eine Pegelreduktion bei Strassenverkehrslärm erst ab 3 dBA als wahrnehmbar beurteilen.

4.2.3 Wahrnehmung bei Variationen des Mittelungspegels (L_{eq})

Die oben erwähnte subjektive Beurteilung von momentanen Pegelveränderungen (L_{max}) kann nicht ohne weiteres auf Differenzen beim Mittelungspegel L_{eq} übertragen werden. Offenbar ist die Wahrnehmung von Variationen des Mittelungspegels L_{eq} sensibler [72].

Die akustische Wirkung von Massnahmen ist einzeln betrachtet an der Quelle häufig nicht sehr gross, teilweise sogar kleiner als 1 dBA. Eine Wirkung von 1 bis 2 dBA wird oft unterschätzt und als „nicht wahrnehmbar“ bezeichnet. Nicht selten verschiebt sich das Geräuschspektrum so, dass der Schallanteil im tiefen Frequenzbereich zunimmt. Untersuchungen belegen, dass Differenzen von 1 dBA bei gemittelten Pegeln (L_{eq}) bereits subjektiv wahrnehmbar sind, und dass man eine L_{eq} -Veränderung von 2 dBA bereits als wahrnehmbare Veränderung bezeichnen kann [27]. In der Praxis werden Variationen des Mittelungspegels von 1 dBA und mehr als wahrnehmbar beurteilt.

Fazit: Die Wahrnehmung eines Geräusches hängt von seiner Dauer und seiner Intensität ab. Für das menschliche Ohr werden Variationen des Maximalpegels L_{max} über 100 ms am besten und als am lautesten wahrgenommen. Das Ausmass der Wahrnehmung wird durch die Differenz zwischen dem Grundgeräusch und der momentanen Pegelspitze wiedergegeben. Momentane Pegeldifferenzen von über 5 dBA werden als deutlich wahrnehmbar beurteilt und können je nach Person und Situation zu einer Belästigung führen.

4.3 Von der Wahrnehmung zur Belästigung

4.3.1 Objektive und subjektive Faktoren der Lärmbelästigung

In Berechnungsmodellen erfolgt die objektive Beschreibung der Lärmbelastung im Allgemeinen über den energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} . Störende Geräuscheigenschaften wie Impuls-, Ton- oder Informationshaltigkeit werden mit Hilfe von Korrekturen des Immissionswerts berücksichtigt [62]. In der Praxis werden also objektive, gemessene oder berechnete Pegelwerte, an einem Immissionspunkt mit einem im Gesetz definierten Pauschalzuschlag korrigiert, der das Belästigungspotential eines Geräusches wiedergibt.

Dennoch ist die Lästigkeit von Geräuschen weniger vom absoluten Schallpegel als von der Differenz zwischen Grundpegel und Störschallpegel abhängig [72]. Eine Lärmstörung ist das Ergebnis eines komplexen Wahrnehmungs- und Bewertungsvorganges des Menschen und daher eine subjektive

Empfindung. Für eine objektive Beurteilung der Lärmsituation kann sie nicht herangezogen werden. Neben den akustischen Eigenschaften des Geräusches (siehe Abs. 4.1 und 4.2) spielen auch physiologische und psychologische Faktoren mit [62]. Ising et al [37] haben diese Faktoren und deren Auswirkungen in Abbildung 4.3 zusammengefasst.

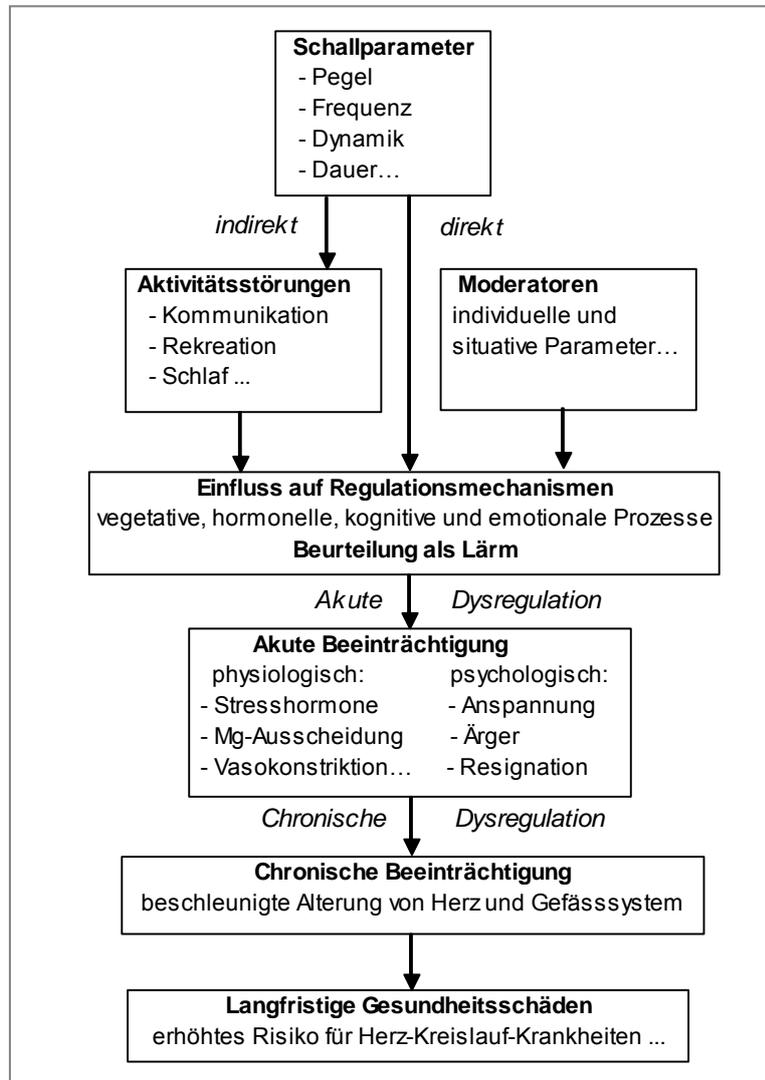


Abb. 4.3 : Schematische Darstellung direkter und indirekter Lärmwirkungen, gemäss [37].

In Kapitel 4.1 und 4.2 wurde geklärt, welche Schallparameter die Aufmerksamkeit und die Wahrnehmung der Menschen beeinflussen können. Die Art und Weise, wie die Töne das Verhalten und die Aktivitäten der Menschen beeinflussen, wird nachfolgend kurz kommentiert. Die folgenden Aussagen basieren dabei hauptsächlich auf Studien von De Brouwer [19] und Ising et al. [37].

4.3.2 Beeinträchtigung der Kommunikation durch den Lärm

Gemäss De Brouwer [19] werden Menschen durch Lärm gestört, sobald eine ihrer Aktivitäten beeinträchtigt wird (z.B. der Schlaf oder die Kommunikation mit anderen Personen). Das Belästigungspotential eines Geräusches ist sehr subjektiv und wird hauptsächlich von der Differenz zwischen zwei Signalen und dem Wert des niedrigsten Signals bzw. zwischen dem Störsignal und dem momentanen Grundgeräusch bestimmt. Dabei spielen auch die Dauer und die Frequenzen der Geräusche eine wichtige Rolle. So funktioniert zum Beispiel die Diskriminierung zwischen zwei Lärm-

signalen hervorragend für niedrige Frequenzen, etwas schlechter für Frequenzen um 1000 Hz und besonders schlecht für Frequenzen über 2000 Hz.

Der Lärm wird als besonders lästig empfunden, wenn er die Kommunikation mit anderen Menschen beeinträchtigt. Fachleute untersuchen und beurteilen diese Beeinträchtigung anhand von zwei Parametern: der Verständlichkeit und der Überlagerung.

Die „*Verständlichkeit*“ entspricht der Kapazität zweier Ansprechpartner, sich gegenseitig zu begreifen. Sie hängt stark vom Grundgeräusch ab. Die wichtigsten Frequenzen für die Verständlichkeit liegen bei 1000 Hz.

Innerhalb von Wörtern sind die Vokale am besten hörbar. Die Vokale mit tieferen Frequenzen haben viel Energie (60% der akustischen Kraft eines Wortes). Jedoch tragen sie nur zu 5% zur Verständlichkeit eines Wortes bei. Die Konsonanten dagegen haben höhere Frequenzen. Sie haben wenig Energie (ungefähr 5%) und tragen 60% zur Verständlichkeit eines Wortes bei. Aus diesem Grund können Menschen manchmal "hören" und haben doch Schwierigkeiten zu „begreifen“.

Wenn man alle Töne über 3000 Hz ausschliesst, ergibt sich praktisch keine Beeinträchtigung der Verständlichkeit. Der Ausschluss von Tönen über 2000 Hz erschwert hingegen das Verständnis der Konsonanten und ein Ausschluss von Tönen über 1000 Hz das Verständnis der Vokale. Die Stimme wird zunehmend unverständlich [19].

Die tiefen Töne definieren die Besonderheiten einer Stimme. Wenn diese Töne teilweise ausgeschlossen werden, wird die Verständlichkeit nicht beeinträchtigt. Werden hingegen Töne unter 300 Hz ausgeschlossen, kann dies zu Schwierigkeiten bei der Erkennung einer Stimme führen. Bei Frequenzen unter 500 Hz erscheint die Stimme als besonders unpersönlich. Ausserdem wird das Verständnis der Vokale erschwert.

Man spricht von „*Überlagerung*“, sobald ein Ton die vollkommene Wahrnehmung eines anderen Tones stört. Wenn die Intensität des ersten Tones deutlich höher ist als die Intensität des zweiten Tones, kann der zweite Ton nicht gehört werden. Ein Teil der Information geht verloren oder wird falsch interpretiert [19].

Das Verhältnis Signal/Grundgeräusch definiert die Beziehung, die zwischen der Intensität des Wortsignals und dem Grundgeräusch besteht. Diese variiert je nach Alter: Für einen Erwachsenen ist ein Verhältnis von 6 dBA genügend, während ein Kind 16 dBA benötigt. Mit einer leichten Taubheit müsste das Verhältnis ca. 20-30 dBA betragen.

4.3.3 Physiologische und psychologische Beeinträchtigungen durch den Lärm

Gemäss Ising et al. korrelieren die physiologisch messbaren Reaktionen stärker mit dem subjektiven Lärmempfinden als mit objektiven Lärmparametern [37]. Lärmbedingte Stressreaktionen sind daher bei schlafenden Personen stärker ausgeprägt als bei wachen.

Lärm kann eine selektive Erhöhung bestimmter Stresshormone verursachen: eine Erhöhung von Adrenalin bei akuter Schallbestrahlung, von Noradrenalin bei chronischer Belastung und von Kortisol bei situativen Niederlagebedingungen [37].

So bewirkt beispielsweise das nächtliche Öffnen des Schlafzimmerfensters bei einer Zunahme des Innenraumpegels um 9-18 dB (auf ca. $L_{eq} = 50$ dBA) an lauten Strassen einen akuten Kortisolanstieg von 30%.

Langfristig können diese Stressreaktionen zu einem erhöhten Herzinfarktisiko führen [37]. In der Schweiz wurden ebenfalls Schlafstörungen, chronische Ermüdungserscheinungen und eine häufigere Einnahme von Schlaftabletten festgestellt, wenn der Lärmpegel an der Häuserfront bei offenem Fenster über 53 dBA liegt [27].

Die Resultate einer Befragung in Basel ergaben, dass Lärm während der Tagperiode bereits ab einem Mittelungspegel (L_{eq}) von 50 dBA als Belästigung wahrgenommen wird [27]. Bei einem Pegel von 60 bis 65 dBA fühlen sich schliesslich noch einmal deutlich mehr Leute vom Lärm gestört als in der Kategorie unter 60 dBA. Die übliche Lautstärke eines Gesprächs liegt in diesem Bereich. Ab dieser Grenze wird deshalb auch die Sprachverständlichkeit gestört.

Natürlich können die Grenzen einer wahrgenommenen Belästigung je nach Person sehr unterschiedlich sein. Folgende nicht akustischen Faktoren können unter anderem einen Einfluss haben: Lage der Wohnung, soziale Faktoren (privilegiert oder nicht), persönliche Faktoren (Persönlichkeit, Laune etc.).

Fazit: Das Belästigungspotential eines Lärmsignals ist sehr subjektiv und hauptsächlich von der Differenz zwischen dem Störsignal und dem momentanen Grundgeräusch abhängig. Die Beurteilung des Lärms mit Hilfe des Mittelungspegels ist in ländlichen Gebieten und vor allem für die Nachtperiode nicht ausreichend. Nicht die durchschnittliche Lärmbelastung sondern die Pegeldynamik stellt dort den wichtigsten Belästigungsfaktor dar.

4.4 Beurteilung der Lärmbelastigung basierend auf dem Mittelungspegel

4.4.1 Beurteilung der Lärmbelastigung beim Strassenlärm – Problematik

Weltweit wurden im Laufe der 50 letzten Jahre zahlreiche Studien über den Zusammenhang zwischen Lärm und Belästigung durchgeführt. Im Jahre 2001 hat James-M. Fields zu diesem Thema eine Liste von ca. 400 Studien erstellt [26]. Dabei wird die Belästigung in der Regel anhand einer verbalen oder einer numerischen Skala ermittelt. Bei der verbalen Skala werden Wörter wie «gar nicht», «wenig» oder «stark gestört» verwendet. Die numerischen Skalen bestehen meistens aus 7 bis 11 Stufen (0 bedeutet «gar nicht gestört») und werden bei schriftlichen Befragungen verwendet. Die Gültigkeit solcher Befragungen ist stark von der Formulierung der Fragen abhängig.

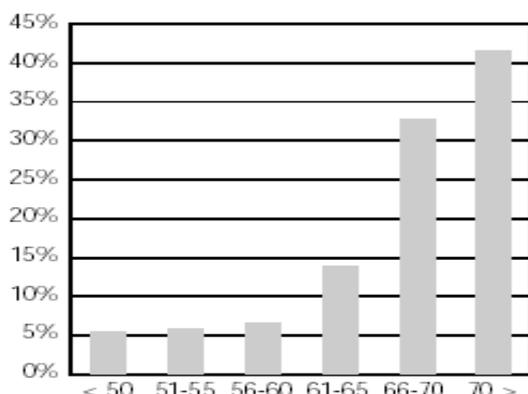


Abb. 4.4: Anteil der in Basel durch Strassenlärm stark gestörten Personen im Verhältnis zum Tagesmittelungspegel

In der Schweiz wurde festgestellt, dass sich die meisten Menschen ab einer durchschnittlichen Strassenlärmbelastung von 60 dBA tags und 50 dBA nachts gestört fühlen (siehe Abb.4.4). Bei einer durchschnittlichen Belastung von mehr als 65 dBA tags und 55 dBA nachts fühlen sie sich sogar massiv gestört (siehe Abb.14). Diese empirischen Werte wurden durch weitere Untersuchungen bestätigt und in der Schweiz gesetzlich in der Lärmschutzverordnung [80] in Form von Immissionsgrenzwerten für eine Tag- (6:00-22:00) und eine Nachtperiode (22:00-6:00) festgelegt.

Von daher könnte man annehmen, dass die Störung durch den Lärm in Berechnungsmodellen und Beurteilungsverfahren bereits ausreichend abgedeckt ist. Das stimmt für Situationen mit durchgehendem Strassenlärm, bei denen die Betrachtung des Mittelungspegels allein die Gesamtlärmeigenschaften einigermaßen gut widerspiegelt.

Allerdings weist dieses System vor allem in ländlichen Gebieten mit geringem Verkehrsaufkommen einige Schwächen auf. Dort liegt das Grundgeräusch tiefer. Demzufolge werden Lärmabweichungen viel deutlicher wahrgenommen als in städtischen Gebieten, was in vielen Fällen zu einer erhöhten Empfindlichkeit der Anwohner gegenüber dem Lärm führt.

Isolierte aber massiv störende Ereignisse in extrem ruhigen Gebieten, wie zum Beispiel die Vorbeifahrt mehrerer Motorräder in der Nacht, können den Schlaf der Anwohner mehrmals unterbrechen, ohne dass die Immissionsgrenzwerte, basierend auf dem Mittelungspegel Leq , systematisch überschritten werden. Diese Situation ist auf der Abbildung 4.5 dargestellt.

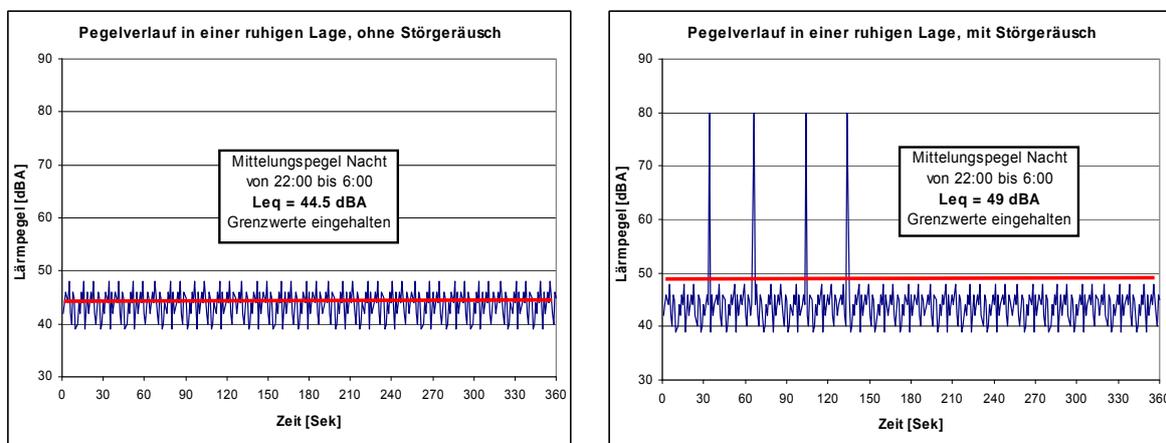


Abb.4.5: Darstellung einer typischen Lärmsituation während der Nachtperiode in ländlichen Wohngebieten. Es gelten die Grenzwerte der Empfindlichkeitsstufe II: tags 60 dBA, nachts 50 dBA. Links: Situation ohne Störung. Rechts: Situation mit 4 Vorbeifahrten von lauten Motorrädern (Annahme: Pegel 80 dBA, Dauer 3 Sekunden pro Ereignis). In beiden Situationen werden die Immissionsgrenzwerte eingehalten. Rechts werden die Anwohner möglicherweise während des Schlafes gestört.

Die Störwirkung einzelner Geräusche und im Allgemeinen die Dynamik des Pegelverlaufes wird zurzeit in der Schweiz nur bei der Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm in Form von Korrekturfaktoren (Zuschläge) auf den Mittelungspegel für die Tonhaltigkeit, Impulshaltigkeit und Informationshaltigkeit berücksichtigt. Die Dynamik des Pegelverlaufes wird beim Strassenlärm gar nicht berücksichtigt. Bei geringer Verkehrsmenge wird der Nachtbeurteilungspegel um einen Korrekturfaktor von 5 dBA reduziert, weil ein geringer und unregelmässiger Verkehr als weniger lästig betrachtet wird (mehr Zeit für die Erholung zwischen zwei Ereignissen).

4.4.2 Beurteilung der Lärmbelästigung anhand der EU-Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm

Im Jahre 2000 hat die Europäische Union eine Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm entworfen. Stützend auf Dosis-Wirkungsbeziehungen, d.h. nach Untersuchung der Reaktion von Personen auf eine bestimmte Geräuschbelastung, wurden in dieser Richtlinie zwei Indizes zur Darstellung der Lärmbelästigung eingeführt: L_{den} und L_{night} .

Der wichtigste Lärmindeks ist der Tag-Nacht-Abend-Pegel L_{den} in Dezibel. Er ist ein Indikator für die "Belästigung". Der L_{den} –Index steht in einem engen Zusammenhang mit dem Tag-Nacht-Pegel-Index L_{dn} , der in den USA häufig verwendet wird und in einigen Mitgliedstaaten der EU auf den Fluglärm angewendet wird. Zwischen dem L_{den} und einem bestimmten Anteil an lärmbelästigten Personen besteht folgende Beziehung:

$$\% \text{ belästigt} = 1.795 \cdot 10^{-4} (L_{den}-37)^3 + 2.110 \cdot 10^{-2} (L_{den}-37)^2 + 0.5353 (L_{den}-37)$$

Zur Verbesserung des Schutzes zu den Hauptruhezeiten (Nachtperiode), schlägt die Kommission den "Nachtlärmindeks L_{night} " vor. Sinkt der Wert dieses Index, bedeutet dies eine verminderte Schlafstörung und eine Verminderung bestimmter anderer negativer Auswirkungen. Auch bei dieser Methode wird der Mittelungspegel über eine vordefinierte Periode als Beurteilungsgrundlage verwendet.

4.5 Beurteilung der Lärmbelästigung basierend auf dem Maximalpegel

4.5.1 Beurteilung der Lärmbelästigung durch Impulsgeräusche - Problematik

Die internationalen Normen berücksichtigen die Tonhaltigkeit und die Impulshaltigkeit der Geräusche fast ausschliesslich beim Industrie- und Gewerbelärm. Je nach Verfahren wird dabei der Dauerschallpegel mit einem Korrekturzuschlag zwischen 0 und 6 dBA korrigiert [1]. Aufpflasterungen, Fahrbahnübergänge und andere lärmige Unebenheiten an Strassen können mehr oder weniger mit ortsfesten Anlagen verglichen werden, da der Ort der Lärmentstehung unverändert bleibt. Deshalb ist es grundsätzlich denkbar, solche Lärmquellen aufgrund ihrer ungünstigen Lärmeigenschaften ebenfalls mit einem Pegelzuschlag zu korrigieren.

Im folgenden Kapitel werden die bestehenden Mittel zur Beurteilung der Ton- und Impulsgeräusche in verschiedenen Lärmbereichen kommentiert. Anschliessend werden mögliche Methoden und deren Umsetzung bei der Beurteilung von Strassenlärm (insbesondere bei Aufpflasterungen) erläutert.

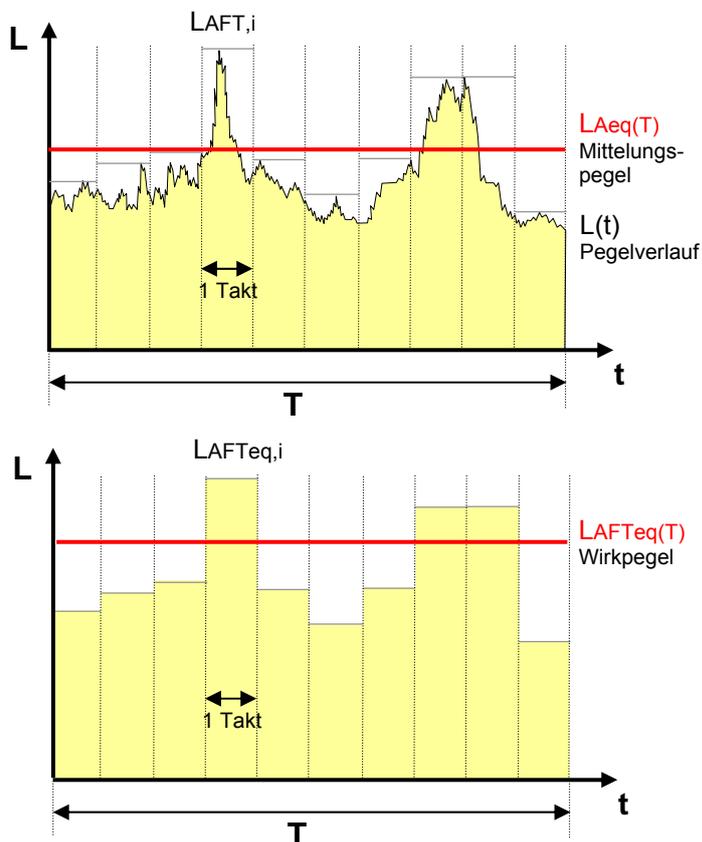
4.5.2 Bestehende Methoden zur Beurteilung der Impulsgeräusche beim Betriebs- und Freizeitlärm

In der Schweiz [80] berücksichtigt die Pegelkorrektur K_3 die Hörbarkeit des Impulsgehalts des Lärms am Immissionsort beim Betriebslärm: 0 dBA bei nicht hörbarem Impulsgehalt, +2 dBA bei schwach hörbarem Impulsgehalt, +4 dBA bei deutlich hörbarem Impulsgehalt und +6 dBA bei stark hörbarem Impulsgehalt (vgl. Anhang 6 LSV (Stand 31.12.99) Art.40 Abs.1).

In Deutschland wird zur Bestimmung des Zuschlags für Impulshaltigkeit beim Betriebs- und Freizeitlärm der Taktmaximalpegel nach DIN 45645 (Einheitliche Ermittlung des Beurteilungspegels für Geräuschimmissionen) verwendet. Die wichtigsten Schritte des Taktmaximalverfahrens werden in Abbildung 4.6 dargestellt und nachfolgend erläutert.

Beim Taktmaximalverfahren wird der Schallpegelverlauf einer Messung in konstante Zeitabschnitte, so genannte Takte, unterteilt. Als Takt-dauer werden in der Regel 3 oder 5 Sekunden gewählt. Für jeden Takt wird der maximale Schallpegel $LA_{FT,i}$ ermittelt und als Mittelungspegel für die ganze Dauer des entsprechenden Taktes als $LA_{FTeq,i}$ übernommen.

Der Taktmaximalpegel $L_{AFT,i}$ ist also der Maximalwert des Schallpegelverlaufes (L) während der zugehörigen Taktzeit i . In „Technische Anleitung Lärm“ [12] vom deutschen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wird der über den gesamten Beurteilungszeitraum (T) energetisch gemittelte Taktmaximalpegel als Wirkpegel bezeichnet [2]. Der Wirkpegel L_{AFTEq} für Geräusche mit auffälligen Pegeländerungen ist ein Mittelungspegel, der aus dem Taktmaximalpegel gebildet wird (nach DIN 45641, Ausgabe Juni 1990) [49]:



Schritt 1: Aus dem Pegelverlauf $L(t)$ wird der energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq}(T)$ für die gesamte Messdauer T berechnet.

Schritt 2: Der Pegelverlauf $L(t)$ wird in sogenannte Takte, d.h. in Zeitintervalle von 3 oder 5 Sekunden unterteilt.

Schritt 3: Für jeden Takt wird der Taktmaximalpegel $L_{AFT,i}$ bestimmt. $L_{AFT,i}$ ist der Maximalwert im Intervall i .

Schritt 4: Der Pegelverlauf wird vereinfacht. Bei jedem Takt, wird der Wert des Taktmaximalpegels $L_{AFT,i}$ als Mittelungspegel $L_{AFTEq,i}$ angenommen. Die energetische Summe der einzelnen Taktmittelungspegel $L_{AFTEq,i}$ ergibt den Wirkpegel L_{AFTEq} (Takt-Mittelungspegel) für die gesamte Messzeit.

Schritt 5: Wenn die Pegelvariationen während der Beurteilungszeit T impulsartig sind, dann wird ein Korrekturzuschlag für die Beurteilungszeit T ermittelt:

$$K \text{ (Korrekturzuschlag)} = L_{AFTEq} - L_{Aeq}$$

Abb. 4.6: Auswertung eines Lärmpegelverlaufs nach dem Taktmaximalverfahren

Enthält das zu beurteilende Geräusch Impulse und/oder auffällige Pegeländerungen, so ist dem Mittelungspegel ein Zuschlag für die Zeit, während der die Impulse und/oder die auffälligen Pegeländerungen auftreten, hinzuzurechnen [49]. Als Impulszuschlag gilt die Differenz zwischen dem Mittelungspegel L_{Aeq} und dem Wirkpegel nach dem Taktmaximalverfahren L_{AFTEq} [12]:

$$KI = L_{AFTEq} - L_{Aeq}$$

Bei neuen Geräten kann der Taktmaximalpegel automatisch ermittelt werden. Im nächsten Abschnitt wird das Beispiel einer Anwendung des Taktmaximalverfahrens beim Strassenlärm kommentiert.

4.4.3 Bestehende Methoden zur Beurteilung der Impulshaltigkeit von Strassenlärm

Fahrbahnübergänge sind wie Pflastersteine Unstetigkeitsstellen in der Fahrbahnoberfläche und rufen als solche beim Befahren zum Teil deutlich hörbare impulsartige Schlaggeräusche hervor, die die üblichen Fahrgeräusche erheblich überragen können.

Gemäss dem bayerischen Landesamt für Umweltschutz [45] sind die über den energieäquivalenten Mittelungspegel berechneten Impulszuschläge für „laute“ Übergangskonstruktionen unrealistisch niedrig. Ihr Einfluss auf den Gehöreindruck wird bei dieser Betrachtungsweise unterschätzt. Aus diesem Grund wurden im Auftrag des Amtes für Umweltschutz die Emissionen von Fahrbahnübergängen auf Autobahnen gemessen, mit dem Ziel, eine angemessene akustische Bewertungsmethode zu finden.

Gemessen wurden die Vorbeifahrten handelsüblicher Pkws und Lkws bei frei fliessendem Verkehr. Aus den gemessenen Vorbeifahrten wurden zwei Indikatoren (D1 und D2) für die Lärmbewertung der Übergangskonstruktionen ermittelt und miteinander verglichen: D1, basierend auf dem A-bewerteten Schalldruckpegel und D2, basierend auf dem unbewerteten Schalldruckpegel (siehe Tabelle 4.1).

Differenz D1	$D1 = LAF_{max, \ddot{u}ko} - LAF_{max, vor}$	(basierend auf dem A-bewerteten Maximalpegel)
Differenz D2	$D2 = LA_{max, \ddot{u}ko} - LA_{max, vor}$	(basierend auf dem unbewerteten Maximalpegel)
Es bedeuten		
LAF _{max, Üko} :	A-bewerteter Schalldruckpegel (Maximalpegel) beim Befahren der Übergangskonstruktion, mit Zeitbewertung Fast (125 ms Zeitauflösung)	
LA _{max, Üko} :	Unbewerteter Schalldruckpegel (Maximalpegel) beim Befahren der Übergangskonstruktion; Kurzzeiteffektivwert über einen Zeitabschnitt von 40 ms (d.h. ungefähr vergleichbar mit der Impulsbewertung)	
LAF _{max, vor} :	A-bewerteter Schalldruckpegel (Maximalpegel) der Vorbeifahrt eines Kfz ohne Beeinflussung durch die Übergangskonstruktion (Normalvorbeifahrt); Zeitbewertung Fast (125 ms Zeitauflösung)	
LA _{max, vor} :	Unbewerteter Schalldruckpegel (Maximalpegel) der Vorbeifahrt eines Kfz ohne Beeinflussung durch die Übergangskonstruktion; Kurzzeiteffektivwert über einen Zeitabschnitt von 40 ms. Er entspricht bei einer ungestörten Vorbeifahrt dem LAF _{max, vor}	

Tabelle 4.1: Gemessene Lärmwerte bei der Messung an Fahrbahnübergängen (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz).

D1 und D2 sind je ein Mass für die schalltechnische Güte einer Übergangskonstruktion. Je grösser die Differenzpegel werden, desto schlechter ist die Güte und desto störender werden die Geräusche der Übergangskonstruktion wahrgenommen.

Die Messungen zeigen, dass die Störwirkungen der impulshaltigen Geräusche, die Brückenübergangskonstruktionen verursachen, bei Betrachtung der Pegel-Zeit-Diagramme, aber auch nach dem subjektiv empfundenen Gehöreindruck, durch den unbewerteten LA_{max, Üko} offensichtlich besser beschrieben werden, als durch den A-bewerteten LAF_{max, Üko}.

Da Regelwerke zur Festlegung eines Zuschlages für Impulshaltigkeit nur für A-bewertete Pegel vorhanden sind (in der deutschen Broschüre *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm*), wurden die Anwendungsmöglichkeiten des unbewerteten LA_{max, Üko} leider nicht weiter untersucht.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Korrekturzuschlag nach dem Taktmaximalpegelverfahren berechnet. Die mit diesem Verfahren erzielten Ergebnisse sind aber für ungenügend befunden worden. Als Nachteil wurde festgestellt, dass lärmemissionsarme Übergangskonstruktionen durch hohe Zuschläge „bestraft“ werden, obwohl sie als nicht oder wenig störend empfunden werden. Der

Grund hierfür liegt in der Taktmaximalpegelbetrachtung von Verkehrsrgeräuschen, die bei geringen Verkehrsmengen höhere, im Nahbereich sogar erheblich höhere, Werte liefert als der energieäquivalente Mittelungspegel.

4.4.4 Umsetzung der bestehenden Methoden zur Beurteilung der Belästigung durch Verkehrsberuhigungsmassnahmen

Ausgangslage

Bei den heutigen Beurteilungsverfahren werden für impulshaltige Geräusche systematisch Korrekturzuschläge verwendet. Rein wissenschaftlich gesehen ist es nicht sinnvoll, die subjektive Wirkung von einzelnen kurzen Ereignissen anhand eines Korrekturwerts auf dem Dauerschallpegel (einem Mittelwert) zu berücksichtigen. Dennoch hat dieses Verfahren praktische Vorteile, weil die vorhandenen Regelungen und Gesetze sich fast ausschliesslich auf den Mittelungspegel während der Tag- und der Nachtperiode beziehen. Mit den Korrekturwerten wird die Lärmsituation zwar nicht besser beschrieben, doch wird lästigster Lärm stark bestraft. Dadurch wird der Verursacher in den meisten Fällen gezwungen, die lästigen Geräusche durch geeignete Massnahmen zu mindern.

Problematik

Mit den bestehenden Beurteilungsmitteln ist es immer noch sehr schwierig, zwei Zustände miteinander zu vergleichen und die Differenz (positiv oder negativ) quantitativ zu bewerten. Dies wird noch schwieriger, wenn die zu beurteilenden Geräusche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Nachfolgend wird die Problematik durch ein konkretes Beispiel dargestellt.

Zustand	Vor der Sanierung	Nach der Sanierung	Nach der Sanierung mit Pflasterstreifen
Geschwindigkeit	50 km/h	30 km/h	30 km/h
Massnahmen	keine	Tempo-30-Zone, Seitliche Einengung, Alternierendes Parken (Versatz)	Tempo-30-Zone, Seitliche Einengung, Alternierendes Parken (Versatz), Pflasterstreifen
Fahrdynamik	gleichmässig	teilweise beeinträchtigt	teilweise beeinträchtigt
Impulsgeräusche	keine	keine	Pegelspitzen von +10 dBA über dem Vorbeifahrtpegel ohne Pflasterstreifen. Wirkzeit 0.4 Sek., Anzahl Ereignisse 150 während der Nachtperiode
Mittelungspegel Leq	56.0 dBA	54.0 dBA	54.1 dBA
Grenzwert	55 dBA	55 dBA	55 dBA
Beurteilung nach LSV	Grenzwerte überschritten	Grenzwerte eingehalten	Grenzwerte eingehalten

Tabelle 4.2: Beurteilung der Geräuschimmissionen an einem fiktiven Beurteilungspunkt mit lästigen Impulsgeräuschen

Im oben stehenden Beispiel wird durch die Gestaltung der Fahrbahn eine Reduktion des Mittelungspegels Leq von 2 dBA erzielt. Damit werden die Immissionsgrenzwerte am Beurteilungspunkt eingehalten. Um die Querverbindungen zu verbessern, werden zusätzlich Fussgängerstreifen in Form von flachen Aufpflasterungen eingebaut. Dadurch entsteht bei jeder Vorbeifahrt ein impulshaltiger Pegelanstieg, der 10 dBA über dem normalen Vorbeifahrtpegel ohne Aufpflasterung liegt. Aus Sicht

der Anwohner wird dieser Lärm als besonders lästig empfunden, da die Vorbeifahrt der Fahrzeuge vor der Sanierung nicht so laut und unangenehm waren.

Aus Sicht der Anwohner, die in der Nähe der Pflasterstreifen wohnen, hat sich die Situation verschlechtert, weil:

- Impulsgeräusche wegen der Sanierung entstanden sind
- Der Maximalpegel L_{max} der Vorbeifahrten höher ist als vor der Sanierung

Eine Betrachtung des Mittelungspegels allein führt im Gegenteil zu einer eher positiven Beurteilung, da der Mittelungspegel trotz der Plastersteinen um 1.9 dBA reduziert wurde und die Grenzwerte eingehalten sind. Die rechnerische und die subjektive Beurteilung stimmen nicht überein. Dieses Paradox ist möglich, weil die Beurteilung der Lärmsituation durch Menschen auf dem momentanen Pegel basiert und nicht auf dem Mittelungspegel. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich ein vollständiges Verfahren auch auf das momentane Grundgeräusch beziehen sollte.

Beispiel bestehender Vorschriften zur Begrenzung der Belästigung durch Strassenlärm

In der deutschen technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm sind Immissionsrichtwerte für den Mittelungspegel an Immissionsorten ausserhalb von Gebäuden festgelegt:

Gebiete	Grenzwert	Grenzwert
	tags [dBA]	nachts [dBA]
Industriegebiete	70	70
Gewerbegebiete	65	50
Kerngebiete, Dorfgebiete, Mischgebiete	60	45
Allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungen	55	40
Reine Wohngebiete	50	35
Kurgebiete	45	35

Tab 4.3. Immissionsrichtwerte für Immissionsorte ausserhalb von Gebäuden nach der „Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm, TA-Lärm“.

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte am Tag um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten. Mit diesen Grundlagen werden auch Ereignisse von kurzer Dauer berücksichtigt. Die Einhaltung der Grenzwerte kann ohne Mühe durch eine Langzeitmessung und eine nachträgliche Analyse des Pegelverlaufes im Labor geprüft werden. Der Mittelungspegel und die Anzahl an Überschreitungen können automatisch mit wenig Aufwand durch Auswertungsprogramme bestimmt werden. Mit einer Verkehrserhebung während der Messung ist eine nachträgliche Umrechnung des Mittelungspegels für jährliche Verhältnisse möglich.

4.5 Konkrete Vorschläge aus der Literatur zur Beurteilung der subjektiven Belästigung

Die subjektive Störf Wirkung durch Aufpflasterungen oder durch andere laute Bauten an Strassen ist äusserst schwierig zu beschreiben und zu beurteilen. Dafür besteht zurzeit kein standardisiertes Verfahren. Nachfolgend werden Ideen aus der Literatur erläutert, die als Grundlage für eine Beurteilung der Belästigung durch Strassenlärm angewandt werden könnten.

Gemäss dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland entstehen durch die Messung der Schallleistung in dBA oft Fehleinschätzungen, die aus der Sicht der Betroffenen die tatsächliche Lärm-

situation nicht angemessen widerspiegeln. Dies gilt insbesondere für den auf einen definierten Zeitraum bezogenen Mittelungspegel, der in vielen Fällen als alleinige Beurteilungsgrundlage ungenügend ist [11].

Der A-bewertete Schalldruckpegel, gemessen in dB(A), soll die von der Frequenz abhängige Empfindlichkeit des Gehörs (Lautstärkeempfindung) nachbilden. Durch diese Bewertung werden tiefe und hohe Frequenzen abgeschwächt. Die A-Bewertung ist deshalb für die Beurteilung der Belästigung nicht geeignet, da meistens gerade hohe Frequenzen als besonders störend empfunden werden [11]. Geeignete Mess- und Beurteilungsverfahren sollten Masszahlen für die Lautstärke (z.B. in Sone), die Rauigkeit, die Schärfe, den Wiederholungscharakter und den tonalen Charakter eines Schallereignisses liefern und auf diese Weise auch die psychoakustischen Wirkungen einbeziehen.

Die *Lautstärkeempfindung* und insbesondere auch die *Lästigkeit* werden wesentlich davon mitbestimmt, wie schnell die Intensität eines aus der Ruhe heraus einsetzenden Schallereignisses ansteigt und wie rasch es am Ende wieder abfällt (Schreckreaktion). Die Lästigkeit hängt auch von der Dynamik des Geräusches ab, d.h. von der Pegeldifferenz zwischen dem Maximalwert der Geräuschspitze und dem Grundgeräusch. Schallereignisse können ab etwa 10 dB Abstand durchaus als sehr lästig empfunden werden [11, 76]. Bei der Beurteilung der Lästigkeit von Geräuschen sind weitere Hörphänomene von Bedeutung. Drei dieser Phänomene lassen sich relativ einfach durch die Beobachtung von Pegelverläufen bestimmen:

- Die *Schärfe* eines Geräusches ist umso grösser, je grösser der Anteil hoher Frequenzen ist. Scharfe Geräusche fordern Aufmerksamkeit und können daher lästig sein. Anhand eines Vergleichs von Frequenzen vor und nach dem Einbau von Pflastersteinen kann man zum Beispiel bestimmen, ob das Geräusch schärfer oder milder geworden ist.
- Die *Impulshaltigkeit* von Geräuschen. Impulsgeräusche, deren Dauer 200 ms beträgt, werden am stärksten wahrgenommen. Über 200 ms nimmt die Lästigkeit langsam ab, während kürzere Spitzen von 100 ms, als deutlich weniger lästig empfunden werden.
- Die *Tonhaltigkeit*: Ist aus einem zufälligen Geräusch ein Dauerton mit deutlich erkennbarer Tonhöhe herauszuhören, so wird unwillkürlich unsere Aufmerksamkeit geweckt. Ist der Ton unerwünscht, kann er viel lästiger sein als ein Rauschen gleicher Lautstärke.

Für die Bewertung der Lautstärkeempfindung, der Lästigkeit, der Schärfe, der Impulshaltigkeit und der Tonhaltigkeit eines Geräusches sollten im Rahmen von Vorbeifahrtmessungen folgende Angaben ermittelt und auf ein Protokoll zusammengefasst werden:

- 1 Anzahl Geräuschspitzen
- 2 Mittlere Dauer eines Pegelanstiegs (Zeit zwischen lokalen Min. und Max).
- 3 Mittlere Dauer eines Pegelabstiegs (Zeit zwischen lokalen Max. und Min).
- 4 Mittlere Dauer jeder Pegelspitze (= Gesamtereignis)
- 5 Mittlere lokale Pegeldifferenz in dBA zwischen Min und Max einer Pegelspitze
- 6 Der Pegelanstieg aus 2,3,4 und 5. Der An-/Abstieg wird dabei in dB/Sek.
- 7 Frequenzbereiche, wo die Emissionen am höchsten sind

Eine so detaillierte Auswertung ist zeitaufwändig und daher fast nur für Forschungsprojekte geeignet. Für eine Anwendung in der Praxis (Prognose, Kontrolle) braucht es einfache Indikatoren. Zur Beurteilung der Belästigung durch besondere Lärmereignisse hat der Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland [11] interessante Ideen vorgeschlagen. Unter anderem werden Grenzwerte zum Schutze verschiedener menschlicher Aktivitäten definiert:

„*Schlafschutz*“. Damit der Schlaf nicht unterbrochen wird, sollte die Anstiegsgeschwindigkeit einer Pegelspitze kleiner als 10 dB/s sein und der Spitzenpegel 45 dBA nicht überschreiten. Die Beurteilungsstunde bildet dabei die lauteste Nachtstunde.

„*Kommunikationsschutz*“. Damit die Kommunikation im Innenbereich nicht gestört wird, sollten Lärmspitzen von 72 dBA nicht überschritten werden. Über 72 dBA wird die Kommunikation mit anderen Personen beeinträchtigt, da eine unverhältnismässige Anstrengung nötig ist, um ein Gespräch aufrecht zu erhalten. Dieser Aspekt wird als Lombard-Effekt bezeichnet (siehe Tabelle 4.4) und in [19] ausführlich behandelt. Der Faktor ist dabei vom Grundgeräusch abhängig: Eine Geräuschspitze von 72 dBA kann zum Beispiel die Stimme einer Person so überdecken, dass das Gesagte für den Sprechpartner unverständlich wird [19]. Wenn die erste Person ihre Stimme erhöhen muss, darf man von einer Beeinträchtigung der Kommunikation und im Allgemeinen von einer Belästigung ausgehen.

Lärmpegel – hören	zu leistende Anstrengung	Lärmpegel - sprechen
< 40 dB	Entspannte Stimme	54±2 dB
54 dB	Normale Stimme	60 dB
65 dB	Hohe Stimme	66 dB
70 dB	Gleichgewicht Signal / Stimme	70
72 dB	Hohe Stimme	71 dB
85 dB	Sehr hohe Stimme	78 dB
94 dB	Schreien	84 dB
104 dB	Maximales Schreien	90±5 dB

Lärmpegel - sprechen (S,A,1m) = A-bewerteter Pegel des Gesprächs, in 1m Abstand von der sprechenden Person.
Lärmpegel – hören (N,A,L)= A-bewerteter Pegel des störenden Geräusches, in 1 m Abstand von der Person, die zuhört.

Tabelle 4.4: Darstellung des so genannten Lombard Effekts – Für den Arbeiter das zu erreichende Anstrengungsniveau, um die Stimme in einer lauten Umgebung zu erheben

„*Konzentrationsschutz*“. Damit die Konzentrationsfähigkeit nicht beeinträchtigt wird, sollte z.B. der Mittelungspegel innerhalb von Schulen, mit einer Anstiegsgeschwindigkeit bei Pegelvariationen von weniger als 20 dB/s, 35 dB(A) nicht überschreiten.

Gemäss [48] ist die Störung beim Schlafen als die Hauptbelästigung zu betrachten. Die vom „Bund für Umwelt und Natur Deutschland“ angegebenen Werte sind insbesondere bei Schlafstörung sehr realistisch und entsprechen den Aussagen mehrerer anderer Publikationen.

Zum Verhältnis zwischen Lärm und seiner Wirkung auf den Menschen wurden bereits viele Informationen gesammelt. Es fehlen zurzeit jedoch gesetzliche Vorschriften sowie ein praktisches und einfaches Mittel, diese Erkenntnisse im Rahmen von Kontrollmessungen und Lärmprognosen umzusetzen. Optimale Indikatoren der Belästigung sollten folgende Eigenschaften besitzen

- 1 Gute Bewertung der Lärmwirkungen, das heisst gute statistische Wechselbeziehung mit den verschiedenen Wirkungen des Lärms auf die Gesundheit und die Belästigung
- 2 Leichte Prognostizier- und Messbarkeit, mit guter Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit
- 3 Verständliche Parameter, die für die Behörde und die Betroffenen nachvollziehbar sind

4.6 Entwurf einer Beurteilungsmethode für die Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche beim Strassenlärm

Prinzip

In der Praxis wird der zu beurteilende Lärm entweder gemessen oder anhand eines Strassenlärmmodells ermittelt. Das ideale Bewertungsverfahren für die Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche sollte in beiden Situationen anwendbar sein. Ein solches Verfahren liegt zurzeit nicht vor. Nachfolgend wird der Entwurf einer Beurteilungsmethode vorgeschlagen. Dabei werden die Lärmeigenschaften von bestehenden Verkehrsberuhigungsmassnahmen quantitativ anhand einer Beschreibung der Pegeldynamik bewertet. Die Bewertung der bestehenden Situationen soll dann als Grundlage für eine Lärmprognose dienen.

Übersicht der Situationen mit starken Pegelvariationen und Impulsgeräuschen

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wurden mehreren Situationen erwähnt, bei denen die Beurteilung der Lärmimmissionen anhand des Mittelungspegels allein nicht ausreichend ist. Diese Situationen sind nachfolgend aufgelistet:

Kritische Situationen mit impulshaltigen Geräuschen und/oder starken Pegelvariationen	
1	Pflasterstreifen auf Strassen (Störung durch Impulsgeräusche und starke Pegelvariationen)
2	Rampen, angehobene Fussgänger- und Pflasterstreifen (Störung durch Beschleunigung)
3	Flächenhafte Aufpflasterungen als Belag (Störung durch Impulsgeräusche)
4	Schwellen, Fahrbahnübergänge (Störung durch Impulsgeräusche, starke Pegelvariationen +/- Beschleunigung)
5	In allgemeinen Situationen mit wenig Verkehr (Störung durch starke Pegelvariationen)

Tabelle 4.5: Übersicht der üblichen Situationen mit starken Pegelvariationen und Impulsgeräuschen beim Strassenlärm

Sobald im Rahmen einer Begehung eine dieser Situationen vor Ort festgestellt wird, sollte die übliche Beurteilung anhand des Dauerschallpegels Leq während der Tag- und Nachtperiode mit einer Beurteilung der Pegelvariationen und Impulsgeräusche ergänzt werden. Dabei sind eine Messung des Strassenlärms und eine Auswertung der lästigen Geräusche durchzuführen.

Messmethoden

Die im Rahmen von Strassenlärmsanierungen durchgeführten Lärmmessungen haben den Empfehlungen des Leitfadens für die Strassenlärmsanierung vom BAFU zu entsprechen. In Angleichung an die Empfehlungen des Leitfadens können die Lärmeigenschaften von Verkehrsberuhigungsmassnahmen anhand dreier Messverfahren ermittelt werden:

Messverfahren	
1a	Kurzzeitmessung mit 125ms Auflösung während mindestens 2x15 Minuten, Minimum 100 Fahrzeuge, mit gleichzeitiger manueller Verkehrserhebung (erfolgt am Beurteilungspunkt oder auf dem Lärmausbreitungsweg)
1b	Langzeitmessung mit 500ms Auflösung, während einer ganzen Beurteilungsperiode nach LSV (tags 6:00-22:00, nachts 22:00-6:00) mit gleichzeitiger automatischer Verkehrserhebung (erfolgt am Beurteilungspunkt oder auf dem Lärmausbreitungsweg)
2	Vorbeifahrtmessung nach ISO-Norm 11819-1 von mindestens 100 Fahrzeugen mit gleichzeitiger Geschwindigkeitserhebung (erfolgt standardmässig in 7.5m Abstand)

Tabelle 4.6: Übersicht der möglichen Messmethoden zur Erfassung der wichtigsten akustischen Belästigungsfaktoren

Im Leitfaden werden die geltenden Korrekturfaktoren für die akustischen Eigenschaften der Beläge angegeben. Die Belästigung durch die Lärmdynamik ist kein Bestandteil des Leitfadens und kann deswegen nach den Empfehlungen des vorliegenden Berichtes erfolgen.

Grundsätzlich können alle notwendigen Angaben zur Beurteilung der Belästigung aus der Kurzzeitmessung (1a) gewonnen werden, solange die zu untersuchende Strasse in der Tat die Hauptlärmquelle ist. Zwecks Untersuchung des Verhältnisses zwischen Lärm und Geschwindigkeit und/oder zur Beschreibung der Fahrdynamik ist mindestens eine Vorbeifahrtmessung im Bereich der zu beurteilenden Verkehrsberuhigungsmassnahme erforderlich.

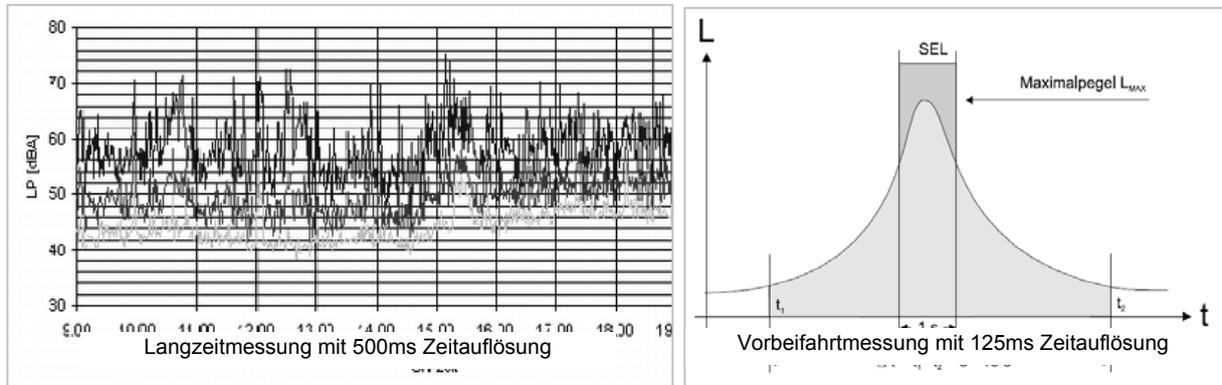


Abbildung 4.7: Darstellung der typischen Pegelverläufe bei Langzeitmessungen (links) und bei Vorbeifahrtmessungen (rechts)

Praktische Empfehlungen für die Vorbeifahrtmessungen sind in Anhang 3 zusammengestellt.

Massgebende Kenngrößen zur Beurteilung der Belästigung durch Strassenlärm

Die Beurteilung der Belästigung durch starke Pegelvariationen und Impulsgeräusche kann beim Strassenlärm durch die Auswertung folgender Parameter erfolgen (siehe Abb.4.8):

Parameter	Beschreibung
Pegelvariationen	Pegeldifferenz zwischen dem momentanen Pegel und dem Grundgeräusch vor dem Pegelanstieg
Impulsgeräusche	Pegelspitze über dem ungestörten Vorbeifahrtpegel
Dauerschallpegel	Mittelungspegel über die Beurteilungsperiode tags und nachts

Tabelle 4.7: Massgebende Größen für die Beurteilung der Belästigung bei Pegelvariationen und Impulsgeräuschen

Bei allen Messmethoden sollten im Idealfall die Impulsgeräusche und Pegelvariationen von mindestens 100 Fahrzeugen erfasst und ausgewertet werden.

Bei Kurzzeitmessungen (Minimum 2x15 Minuten mit einer Zeitauflösung von 125 ms und gleichzeitiger Verkehrserhebung) kann in einem ersten Schritt den Maximalpegel während der gesamten Messzeit mit dem Grundgeräusch verglichen werden. Wenn dieser Wert unproblematisch ist (kleiner als Richtwert), lohnt es sich nicht, die einzelnen Vorbeifahrten auszuwerten. Bei grossen Abweichungen (20 dBA tags und 10 dBA nachts) ist eine detaillierte Auswertung der Impulsgeräusche und Pegelvariationen notwendig.

Es ist darauf zu achten, dass die Beurteilung der Belästigung immissionsseitig erfolgt. Bei geringem Verkehr und insbesondere dann, wenn der momentane Lärmpegel durch ein einziges vorbeifahrendes Fahrzeug erzeugt wird, sind die an der Quelle gemessenen Pegeldifferenzen auf Liegenschaften am Strassenrand ohne weiteres übertragbar.

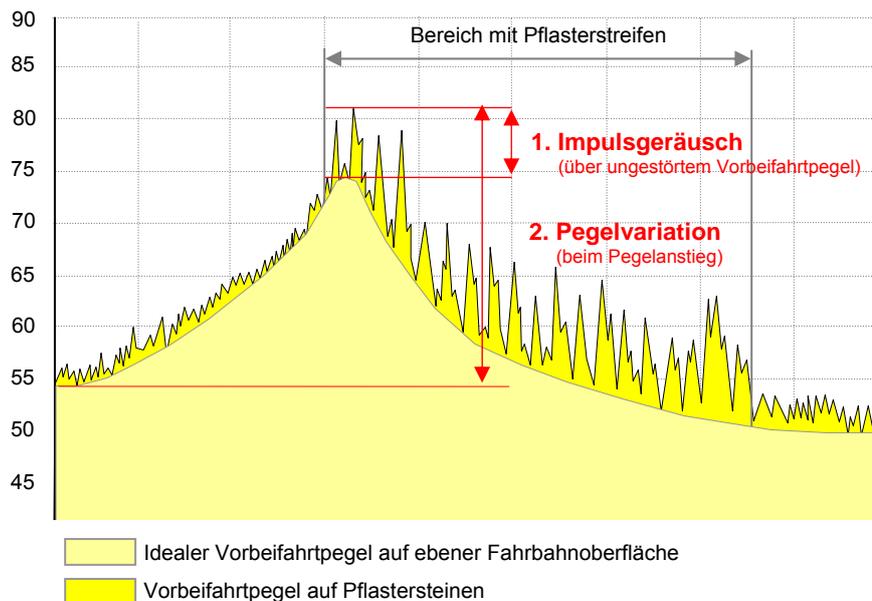


Abbildung 4.8: Darstellung der massgebenden Grösse zur Beurteilung der Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche beim Strassenlärm. Dargestellt ist der Vorbeifahrtpegel eines Fahrzeuges auf Pflasterstreifen.

Richtwerte und Beurteilung der Belästigung

Neben den physikalischen Parametern hängt die Lästigkeit der Geräusche vorwiegend von den Personen ab, die das Geräusch hören. Der Aufwand für eine Befragung aller betroffenen Anwohner ist in der Praxis für eine systematische Anwendung viel zu gross. Nachfolgend werden Richtwerte angegeben, die bei der Auswertung von Lärmmessungen Aussagen über die Lästigkeit des Lärms ermöglichen sollen. Die Richtwerte der folgenden Tabelle sind für Wohnzonen angegeben. Bei Mischzonen, Kernzonen oder Industrie- und Gewerbebezonen sind für den Mittelungspegel die geltenden Grenzwerte der Lärmschutzverordnung anzuwenden. Bei Pegeldifferenzen und Impulsgeräuschen sind die Richtwerte der Nutzung entsprechend anzupassen.

Massgebende Lärmgrösse	Richtwerte [dBA]		Zweck der Ermittlung
	tags	nachts	
1 Mittelungspegels L_{eq} während der massgebenden Tag- und Nachtperiode	60	50	Ermöglicht eine Beurteilung der Lärmimmissionen entsprechend der Lärmschutzverordnung
2 Pegeldifferenz zwischen dem Maximalpegel L_{max} und dem Grundgeräusch unmittelbar vor dem Pegelanstieg	20	10	Belästigung der Pegelvariationen durch laute Beläge, Fahrbahnübergänge, Pflasterstreifen und Beschleunigungsvorgänge beurteilen.
3 Pegelerhöhung durch Impulse in Bezug auf den ungestörten Vorbeifahrt-Maximalpegel auf ebener Oberfläche.	5	5	Belästigung der impulshaltigen Geräusche durch Pflasterstreifen, Fahrbahnübergänge, Kanaldeckel usw. beurteilen.

Tabelle 4.8: Vorgeschlagene Richtwerte für die Beurteilung der Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche beim Strassenlärm (nur indikativ, Werte in der Mitte des offenen Fensters)

Die vorgeschlagenen Richtwerte der Tabelle basieren auf Erkenntnissen von Forschungsstudien zum Verhältnis zwischen Lärm und Belästigung. Die Werte gelten für Pegelvariationen am Beurteilungspunkt, gemessen in der Mitte des offenen Fensters. In den meisten Publikationen wird angenommen, dass Variationen des momentanen Pegels bereits ab 5 dBA deutlich wahrgenommen werden. Pegelvariationen von 10 dBA während der Nachtperiode werden als lästig empfunden. Variationen über 20 dBA sind sehr lästig während der Tagperiode und unerträglich während der Nachtperiode.

Impulsgeräusche gehören zu einer anderen Geräuschkategorie. Bei diesem Lärmtyp ist vor allem der „Überraschungseffekt“ besonders unangenehm. Manche Autoren sind sich einig: Impulshaltige Geräusche mit einer Pegelerhöhung von 5 dBA innerhalb einer Sekunde über den ungestörten (idealen) momentanen Pegel werden als lästig empfunden.

Alle angegebenen Werte beziehen sich auf den Pegel am Immissionsort. Wenn der momentane Pegel durch mehrere Fahrzeuge erzeugt wird, ist die Pegeldifferenz zwischen dem Vorbeifahrtpegel und dem Grundgeräusch an der Quelle nicht auf den Beurteilungspunkt übertragbar.

Wenn im Gegenteil der momentane Pegel durch ein einziges Fahrzeug erzeugt wird (optimale Situation für die Beurteilung der Belästigung durch Impulsgeräusche und Pegelvariationen), gelten die festgestellten Differenzen an der Quelle in der Regel auch am Beurteilungspunkt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] ALIALU (2001): *Le bruit, une nuisance croissante*. Dans. La Revue Technique Luxembourgeoise, 02/2001 Seite 51-53. Association Luxembourgeoise des Ingénieurs, Architectes et Industriels. (Luxemburg)
- [2] Amt für Umweltschutz (1994): *Grazer Lärmkataster: Verkehrslärm für das Hauptstrassennetz, Stand 2003*. Referat für Lärmbekämpfung und Schallschutz. PDF-Dokument. Oktober 1994, 42 Seiten. (Österreich)
- [3] Attinger, R. ; Meister, A. (1997) : *Akustische Eigenschaften von Fahrbahnbelägen im niederen Geschwindigkeitsbereich: Stand der Erkenntnisse 1996*“. Grolimund & Petermann AG, Bern. (Schweiz)
- [4] Auto Forum (2004): *Les 20 meilleures ventes de véhicules neufs sur le marché suisse cumulé à la fin février 2004*. Internetartikel von AutoForum. November 2004. (Schweiz)
- [5] Breitenmoser, B.; Richner, M. (2000): *Verkehrsberuhigung, einfach, günstig und schön*. Regionalplanung Zürich und Umgebung (RZU), Zürich. Mai 2000, 51 Seiten.
- [6] BVBW (1994): *Verordnung über die Inkraftsetzung der ECE-Regelung Nr. 51 und der Änderungen 1, 2 und 3 zur ECE-Regelung Nr. 51 über einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern hinsichtlich ihrer Geräusentwicklung* Strassenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 49 (StVZO). Fassung vom 17. Dezember 1993. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. (Deutschland)
- [7] Brüel & Kjaer (2004): *Environmental-Noise-Measurement*. Booklet Brüel & Kjaer. PDF-File, 26 Seiten. (Denmark)
- [8] Brückner, N.; Sagawe, T.; Wellner, K. (2002): *Mechanische und akustische Aspekte bei Fahrten über unebene Fahrbahnen*. In *Strasse + Autobahn*, 5. 2002, S. 270-277. (Deutschland)
- [9] Brunner, P.; Lang, J. (1997): *Das neue Verfahren zur Berechnung von Strassenverkehrslärm in Österreich*. In. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 44 (1997), S. 8-14. (Österreich)
- [10] BUND (2004): *Verringerung der Immissionen*. Stellungnahme zum Thema Verkehrspolitik. Bund für Umwelt und Naturschutz Thüringen. (Deutschland)
- [11] BUND (2004): *Schutz vor Lärm und Schutz der Ruhe*. In BUND Positionen Nr. 39. Januar 2004. 24 Seiten. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin. (Deutschland)
- [12] BUNR (1999): *Technische Anleitung Lärm 1998 : TA Lärm*. Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes- Immissionsschutzgesetz. 20 Seiten. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Deutschland)
- [13] BAFU (1995): *Mitteilung zur Lärmschutz-Verordnung (LSV)*. Nr. 6, 5 Seiten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. (Schweiz)

- [14] BAFU (2002): *Wegleitung für Strassenplanung und Strassenbau in Gebieten mit übermässiger Luftbelastung*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 122 Seiten, (Schweiz)
- [15] BAFU (1999): *Tempo 30 in der Gemeinde: Hintergründe, Erfahrungen, Vorgehen. Ein Leitfaden*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 27 Seiten. (Schweiz)
- [16] EU-Kommission (2000): *Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und die Bekämpfung von Umgebungslärm*. Kommission der europäischen Gemeinschaften, Brüssel. KOM(2000) 468 endgültig, 2000/0194(COD), 56 S.
- [17] Covelier, Luc (2004): *Les pavés : Comment faire pour ne pas pénaliser les cyclistes et les PMR?* Dossier dans : Nomo asbl, association de mobilité, Bruxelles. (Belgien)
- [18] CFTR (2001): *Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier*. Publication du Comité français pour les techniques routières. N°4, Juin 2001. (Frankreich)
- [19] De Brouwer, C. (2002): *Le Bruit*. Cours en ligne de médecine du travail à l'Université de Rennes. Ecole de Santé Publique, Université libre de Bruxelles. (Belgien)
- [20] EMPA (1997): *Bericht zum F+E-Projekt „Neues EMPA-Modell für Strassenlärm“ Teil Quellenbeschreibung*. Internbericht Nr. 156'479 / int. 511.1773. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt – EMPA. Dübendorf, 37 Seiten. (Schweiz)
- [21] EPSIC (2002): *Effet de la durée du bruit sur la perception sonore*. Auszug vom Online-Akustikkurs der Ecole professionnelle de Lausanne, branche Electronique. (Schweiz)
- [22] Europäisches Parlament und Europarat (2004): *Richtlinie 70/157/EWG des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über den zulässigen Geräuschpegel und die Auspuffvorrichtung von Kraftfahrzeugen* [Amtsblatt L 42 vom 23.2.1970].
- [23] Fahner, Sonia (1998): *Tempo 30 in der Praxis: Erfahrungen und Empfehlungen*. Umwelt-Materialien Nr. 99, Luft. 121 Seiten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. (Schweiz).
- [24] Fallast, Kurt (2003): *Verkehrslärmreduzierende Massnahmen und Aktionen*. Präsentation Goal Konferenz 27 Mai 2003, Programm Sustainable City Graz, Austria, 9 Seiten. (Österreich)
- [25] Febestral (2004) *Avantages, qualities et limites des revêtements en pavés de béton*. Produktübersicht und Reklame vom FEBESTRAL-Unternehmen. PDF, 5 Seiten. (Belgien)
- [26] Fields, James-M. (2001): *An updated Catalog of 521 Social Surveys of Resident's Reactions to Environmental Noise (1943-2000)*. NASA/CR-2001-211257. December 2001. (USA)
- [27] Gastberger Thomas (1998): *Lärm*. Eine Publikation des Cercle Bruit Schweiz, c/o Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 97 Seiten (Schweiz)
- [28] Gastberger Thomas (2003): *Aufpflasterungen, eine lärmige Verkehrsberuhigung*. Umweltpraxis Nr.35 / Oktober 2003, Seite 21. Fachstelle Lärmschutz, Glattbrugg. (Schweiz)

- [29] Gemeinde Reinach (2004): *Revision Ortsplanung Reinach (RevOR):* Mitwirkungsbericht zur kommunalen Richtplanung Reinach BL. Gemeinde Reinach. (Schweiz)
- [30] Gemeinde Riniken (2004): *Mitteilungsblatt 12/04.* Gemeinde Riniken, 4 Seiten. (Schweiz)
- [31] Ghielmetti, M.; Hartmann, M.; Müller, W. (1991): *Verkehrsberuhigung und Gestaltung.* Forschungsauftrag 27/88 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), 64 Seiten. (Schweiz).
- [32] Graf, Peter (1997): *Laute Strassen leiser machen : Möglichkeiten der Lärmsanierung an Kantonsstrassen.* In Umweltpraxis Nr.13 / Juli 1997, S. 55-56. (Schweiz)
- [33] Hamet, J.-F.; Klein, P. (2001): *Recherches physiques sur le bruit de roulement dans les projets TEXTURE & BRUIT et SI.R.U.US.* Journées d'étude Bruit du Trafic Routier, 22-23 novembre 2001, Cité des Congrès, Nantes. (Frankreich)
- [34] Harder Bruno (2003): *Weniger Lärm dank Verkehrskreisel ?* Umweltpraxis Nr.34 / Juni 2003, Seite 33. Fachstelle Lärmschutz, Glattbrugg. (Schweiz)
- [35] IG Velo (2003): *Leserbriefe zum Thema St-Alban Vorstadt Pflästerung.* Nationale Verband der lokalen und regionalen Interessengemeinschaften Velo (IG Velo) in der Schweiz.
- [36] Informationszentrum Beton GmbH (2001): *Flüsterpflaster: Geräuscharme Pflastersteine aus Beton verschönern den Marktplatz des Ortes Zell am Main.* Internet-Mitteilung von Informationszentrum Beton GmbH. Köln.
- [37] Ising, H.; Babisch, W.; Günther, T.; Kruppa, B. (1997): *Risikoerhöhung für Herzinfarkt durch chronischen Lärmstress.* In Zeitschrift für Lärmbekämpfung 44 (1997), H. (1), S. 1-7. (Deutschland)
- [38] ISO (2001): *Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys.* Draft technical specification ISO/DTS 15666 Acoustics. April 2001.
- [39] Kanton Zürich (2001): *Von der Durchfahrtsstrasse zum gestalteten Strassenraum.* Amt für Verkehr und Amt für Raumordnung und Vermessung des Kantons Zürich, 79 Seiten. (Schweiz)
- [40] Kleinjung, V. (2002): *Geräuscharm mit Flüsterpflaster.* Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen (FIGE). (Deutschland)
- [41] Kollmeier, Birger (2002): *Cocktail-Partys und Hörgeräte: Biophysik des Gehörs.* Universität Oldenburg, Medizinische Physik, 7 Seiten. (Deutschland)
- [42] Kraftfahrt-Bundesamt (2004): *Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte von Kraftfahrzeugen mit Allgemeiner Betriebserlaubnis oder EG-Typengenehmigung.* 14. Ausgabe. Fassung April 2004. 714 Seiten. Flensburg, Dresden. (Deutschland).
- [43] Lambert, Jacques (2001): *Caractérisation, mesures et descripteurs acoustiques de la gêne due au bruit routier.* In. Journées d'études Bruit du Trafic Routier. 22-23 novembre 2001. Nantes, Cité des Congrès, 6 Seiten. (Frankreich).

- [44] LfU (2001): *Kurzeinleitung zur Bestimmung der Beurteilungspegel für die Geräusche von Sport- und Freizeitanlagen*. LfU 2/3 We. Ausgabe August 200. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 8 Seiten. (Deutschland)
- [45] LfU (2000): *Schallemissionen und- immissionen von Brückenübergangskonstruktionen*. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg, 30 Seiten. (Deutschland)
- [46] Lindenmann, HP.; Koy, T. (2000): *Beurteilung der Auswirkungen von Zonensignalisationen (Tempo 30) in Wohngebieten auf die Verkehrssicherheit*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich – ETHZ, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 54 Seiten. (Schweiz)
- [47] MA - Umweltschutz (1997): *Wiener Lärmbericht 1997*. Projekt SYLVIE - SYstematische Lärmsanierung in innerstädtischen WohnVierteln. Stadt Wien. (Österreich)
- [48] Niedzielski, Rebecca-A. (1991): *Environmental Impulse Noise Study*. Minnesota Pollution Control Agency – MPCA. Final Report May 1991. (USA)
- [49] NLUR (1996): *Leitlinie des Ministers für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung zur Ermittlung, Beurteilung und Verminderung von Geräuschemissionen*. In Amtsblatt für Brandenburg Nr. 38, vom 4. September 1996, S. 878-898. (Deutschland)
- [50] Ortscheid, J.; Wende, H. (2004): *Sind 3 dB wahrnehmbar?*. In *Lärmbekämpfung* 03/2004, Seite 80. (Deutschland)
- [51] Pestalozzi, H.; Grolimund, H.-J.; Angst, C. (2003): *Lärmarme Strassenbeläge innerorts: Statusbericht 2003*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Strassen (ASTRA), 122 Seiten. (Schweiz)
- [52] PS - Pestalozzi & Stäheli (2004): *Lärmbelastung durch Pflästerungen: Literaturstudie*. Baudepartement des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, Abteilung Lärmschutz, 14 Seiten. (Schweiz).
- [53] Popp, Christian (2003): *Brief outline of the guidelines principle: Change of Road Surface*. (Vortrag PDF). In *Guidelines for noise abatement planning principles for road traffic at local authority level*. 6 Seiten. EU-Kommission.
- [54] Reutimann, Felix (1998): *Mehr Lebensqualität in Tempo-30-Zonen*. In *Zeitschrift Umweltschutz*, Auflage Nr.4 von Dezember 1998, S. 55-58. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). (Schweiz).
- [55] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2002): *Umweltseitige Auswirkungen der verkehrsbeeinflussenden Massnahmen in der Beusselstrasse*. Senatsverwaltung für Strassenentwicklung, Berlin. PDF-Präsentation, 19 Seiten. (Deutschland)
- [56] Steven, Heinz (2000): *Minderungspotenziale beim Strassenverkehrslärm: Lärminderung durch lärmarme Reifen, neue Fahrbahnbeläge, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Lkw-Fahrverbot*. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 48 (2001), H. (3), S.87-91. (Deutschland)

- [57] Thieme, Christin (2003): *Die Belästigung der Bevölkerung durch den Transitverkehr auf der Bundesstrasse B170 zwischen Dippoldiswalde und Zinnwald*. Belegarbeit am Glückauf-Gymnasium, Dippoldiswalde. (Deutschland)
- [58] Thomas, Julien (2000) : *Nouvelle résine durcie pour routes pavées*. In. Bulletin Electronique du Japon du Service pour la Science et Technologie (SST) de l'ambassade de France au Japon. Hebdomadaire – numéro 150, 4 août 2000. (Frankreich)
- [59] TÜV (2000): *Beurteilung und Bewertung von Gesamtlärm (Gesamtlärmstudie)*. TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH. TÜV-Bericht Nr. 933/032902/03. Köln. (Deutschland)
- [60] TÜV (2003): *Pkw Reifen-Test der TÜV Automotive GmbH*. TÜV Automotive GmbH, Reifen/Räder-Test Center. PDF-Dokument, 5 Seiten. (Deutschland)
- [61] TUTI (2004): *Schallanalyse-Kurs*. Physik Departments an der Technischen Universität München, 26 Seiten. (Deutschland)
- [62] Umweltbundesamt Österreich (2004): *Verursacher von Lärm*. In Thema Lärm, auf der Website des Umweltbundesamtes Österreich. (Österreich)
- [64] VCD – Verkehrsclub Deutschland (2004): *VCD-Aktion Tempo 30 – Kinder haben keinen Airbag*. Informationskampagne. (Deutschland)
- [65] VCS - Verkehrs-Club der Schweiz (2004): *Expertenbefragung zur Einführung von Tempo-30- und Begegnungszonen*. Informationsbroschüre PDF, 6 Seiten. (Schweiz)
- [66] VCS – Verkehrs-Club der Schweiz (1996): *Schöne Aussichten: Neue Perspektiven für Hauptstrassen innerorts*. Informationsbroschüre, 21 Seiten. (Schweiz)
- [67] VSS (2000): *SN 640 212 Entwurf des Strassenraumes: Gestaltungselemente*. Eingetragene Norm der Schweizerischen Normen-Vereinigung. VSS- Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich. 29 Seiten. (Schweiz)
- [68] VSS (2000): *SN 640 213 Entwurf des Strassenraumes: Verkehrsberuhigungselemente*. Eingetragene Norm der Schweizerischen Normen-Vereinigung. VSS- Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute. Zürich, 22 Seiten. (Schweiz)
- [69] VSS (1999): *Billige verkehrsberuhigende und Tempo-30-Massnahmen*. In *Strasse und Verkehr* Nr. 11, November 1999, S. 397-445. Offizielle Zeitschrift der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute. (Schweiz)
- [70] Potthoff, Ulrich; Haermeyer, Berthold (1990): *Wirkungsanalyse gebietsbezogener Wohnumfeldprogramme*. Im Auftr. d. Ministeriums für Stadtentwicklung u. Verkehr d. Landes Nordrhein-Westfalen ILS-Schriften. (Deutschland) Stützend auf:
- Potthoff, Ulrich (1990): *Wirkungsanalyse gebietsbezogener Wohnumfeldprogramme. Teil 2: Verkehrsverhalten im Wohnumfeld*. Im Auftr. d. Ministeriums für Stadtentwicklung u. Verkehr d. Landes Nordrhein-Westfalen (MSV) ; 1. ILS-Schriften Nr. 52.

- Potthoff, Ulrich (1990): *Wirkungsanalyse gebietsbezogener Wohnumfeldprogramme. Teil 1: Wohnumfeldverbesserung aus Sicht der Bewohner: Ergebnisse einer repräsentativen Vorher / Nachher-Bewohnerbefragung*. Im Auftr. d. Ministeriums für Stadtentwicklung u. Verkehr d. Landes Nordrhein-Westfalen (MSV); 1. ILS-Schriften Nr. 52.
- [71] Grande und Schmidt (1998): *Messung und Beurteilung der Geräuschbelastung bei Aufpflästerungen zur Verkehrsberuhigung*. Studienarbeit Hochschule Mittweida.
- [72] Stalder Werner (2004): *Aus- und Weiterbildungskurs Lärmschutz*. Kursunterlagen, 240 S. (Schweiz)
- [73] Siebel, E.; Eickschen E. (1995): *Lärmarme Betonfahrbahndecken – ein europäisches Forschungsprojekt*. Strasse und Autobahn 46, Heft 11, S. 658-662. (Deutschland)
- [74] Sommer, H. (1992): *Lärmindernde Betonoberflächen, Sachstand 1992. Ergebnisse eines PIARC-Kolloquiums am 24 und 25.2.1992 in Wien*. Strassen und Autobahn, Heft 10, S. 620. (Österreich)
- [75] Stenschke, R.; Jäcker, M. (1996): *Einfluss von Reifen und Fahrbahnen auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch von Kraftfahrzeugen und administrative Massnahmen zur Verminderung*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 43. (Deutschland)
- [76] Steven, H. (1996): *Gedanken zur Verkehrslärminderungsstrategie nach der Jahrtausendwende*. In Zeitschrift für Lärmbekämpfung 43/1996 (Deutschland)
- [77] Steven, H. (1997): *Einfluss der Fahrbahndeckschicht auf die Geräuschemission von Kraftfahrzeugen*; Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben *Optimierung der schallabsorbierenden Eigenschaften von Drainasphalt*. (Deutschland)
- [78] Hansestadt Rostock, Amt für Umweltschutz (2004): *Planungsgrundsätze zum Einsatz von Pflasterbelägen*. 17 Seiten. (Deutschland)
- [79] Land Steiermark (2006): *Landes-Umwelt-Informationen-System, Fachbereich Lärm*. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (Österreich)
- [80] Schweizerischer Bundesrat (2006): *Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV)*. SR 814.41, Stand am 12. September 2006.
- [82] Plüss, P.; Meury, F.; Mohler, P. (2001): *Verringerung der Lärmbelastung durch die Umgestaltung einer ampelgeregelten Kreuzung in einen Kreisel*. Fachstelle Lärmschutz Kanton Basel Stadt. (Schweiz)
- [83] Koy, Th (2001): *Auswirkungen von Zonensignalisationen (Tempo 30) in Wohngebieten auf die Verkehrssicherheit*. IVT - ETH Zürich Conference paper STRC 2001. Session Engineering.
- [84] Schick, Peter (1998): *Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmbelastung*. Diplomarbeit, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck. 112 Seiten.

Anhang

Anhang 1: Empfehlungen zum lärmbewussten Einsatz von Aufpflästerungen

Anhang 2: Vorbeifahrtpegel L_{max} auf verschiedenen Aufpflästerungen

Anhang 3: Empfehlungen für Vorbeifahrtmessungen an Aufpflästerungen

Anhang 4: Beurteilung der subjektiven Belästigung von Aufpflästerungen

Anhang 1: Empfehlungen zum lärmbewussten Einsatz von Aufpflasterungen

Tab.: Einsatzempfehlungen für verschiedene Fahrbahnoberflächen

in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen, Verkehrscharakteristik und den Anforderungen von Denkmalschutz und Stadtbildes

Straßenkategorie	Anlieger- und Erschließungsstraßen			Sammelstraßen und höher
	< 30 km/h	< 30 km/h	> 30 km/h	
Fahrgeschwindigkeit	sehr gering	gering	höher	
Verkehrsaufkommen	ohne	gering	teilweise	
Durchgangsverkehr	ohne	gering	teilweise	
Nächtlicher Zielverkehr (Kultur, Kneipen)	nein	auch	-	
Verkehrsbelegung DTV in Kfz/d	< 500	500 – 1.500	> 1.500	
Denkmalschutzbereich bzw. Ortsbildprägung	Ja / Nein	Ja	Nein	Ja Nein
empfohlene Pflaster/ Beläge	Keine Beschränkungen: • Kopfsteinpflaster • Polygonalpflaster • Reihenpflaster u.a.	Granitpflaster	Granitpflaster	Flüsterbetonpflaster
mögliche Oberfläche	egal		eben und gfls. geschnitten	kein Pflaster, sondern Asphalt
möglicher Verband	egal	passee bzw. diagonal verlegt, möglichst schmal	diagonal verlegt	diagonal verlegt
mögliche Fugen	egal	möglichst schmal und nicht tief	möglichst schmal und nicht tief bzw. Fugenvergruss	

Erläuterung zum Schwellenwert von 1.500 Kfz/d:

Entsprechend den Ausführungen im Abschnitt „Immissionschutzrechtliche und -fachliche Grundlagen“ werden in typischen Altstadtstraßen bei Verkehrsbelegungen 1.500 Kfz/d die Lärmgrenzwerte der Verkehrslärmschutzverordnung überschritten. Dieser Wert korrespondiert auch mit dem Zielwert für das Verkehrsaufkommen von schmalen Anliegerstraßen in stadtkernnahen Altbaugebieten (Straßentyp AS 3, vgl. Tab. 16 der EAE 85/95).

Bei Pflasterstraßen mit erhöhtem Radverkehrsaufkommen, sind möglichst benutzerfreundliche Lösungen zu finden, z.B. gesamte Fahrbahn oder 1 mittiger Streifen mit ebenen Pflaster und gfls. zusätzlich Fugenvergruss.

Alle Angaben stammen von der folgenden Publikation des Amtes für Umweltschutz der Stadt Rostock (Deutschland): Planungsgrundsätze zum Einsatz von Pflasterbelägen (2004)

Anhang 2: Vorbeifahrtpegel L_{max} auf verschiedenen Aufpflasterungen

(in der Stadt Rostock, Deutschland)

ID-Nr.	Straßenname	Material	Verband bzw. Verarbeitung / Fabrikat	Stein-oberfläche ¹	Verband	Gruppe I = eben II = uneben	L _{max,30km/h}	L _{max,50km/h}	ΔL _{max} infolge Geschwindigkeit s-erhöhung von v=30km/h auf v=50km/h	ΔL _{max,R,30km/h} Änderung bez. auf Referenzoberfl.	ΔL _{max,R,50km/h} Änderung bez. auf Referenzoberfl.	
							s=7,5m h=1,2m dB(A)	s=7,5m h=1,2m dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	
1	Grubenstraße	Granit/ Beton- asphalt	Reihe geschnittenes quadratisches Pflaster	eben/ eben	R/-	I	63,6	72,1	8,5	5,6	6,8	
2	Friedrichstraße	Granit	Reihe leicht gewölbtes Rechteck- pflaster	uneben (Kopfstein- pflaster , gewölbt)	R	II	70,2	77,9	7,7	12,2	12,6	
3	Friedhofs- weg	Beton	Reihe Betonstein- pflaster mit Natursteinvor- satz, untersch. Formate, kleine Fuge Hersteller: BVO	eben	R	I	62,1	70,6	8,5	4,1	5,3	
4	Bei der Jacobi- kirche	Granit	Passee geschnittenes Rechteck- pflaster	eben (geschnitt- en)	Pa	I	63,9	71,4	7,5	5,9	6,1	
5	Wollen- weber- straße	Granit	Passee / Polygonal- pflaster, geringer Teil der Steine uneben	uneben (gewölbt)	Pa/ Po	II	66,8	73,9	7,1	8,8	8,6	
6	Am Strom	Granit	Passee Rechteck- pflaster, großer Teil der Steine uneben, tiefe Fugen	uneben (grob behauen)	Pa	II	69,8	77,9	8,1	11,8	12,6	
7	Alter Markt	Granit	Passee Polygonal- Sammelpflaster (u. a. Katzenköpfe)	uneben (Natur- stein, gewölbt)	Pa	II	69,6	77,1	7,5	11,6	11,8	
8	Waldemar- straße	Beton	gekollertes Betonpflaster Fabrikat: „Tegula“	eben	R	I	63,5	72,2	8,7	5,5	6,9	
10	Karlstraße	Beton	Reihe Betonpflaster Fabrikat: „Tavolo“	eben	R	I	63,5	70,7	7,2	5,5	5,4	
11	Grazer Straße	Granit	Passee Kleinpflaster	uneben	Pa/ Po	II	66,5	75,0	8,5	8,5	9,7	
9	Feld- straße	<i>Referenz</i>						58,0	65,3	7,3		

Legende:

Pflasterverband - R=Reihenpflaster, Pa=Passeepflaster, Po=Polygonalpflaster

Alle Angaben stammen von der folgenden Publikation des Amtes für Umweltschutz der Stadt Rostock (Deutschland):
Planungsgrundsätze zum Einsatz von Pflasterbelägen (2004)

Anhang 3: Empfehlungen für Vorbeifahrtmessungen an Aufpflästerungen

Messmaterial, Aufwand

► Material für eine Vorbeifahrtmessung (Beispiel 1): Durchführung durch 1 Person, Dauer einer Messung ca. 3 Stunden, schnelle Bearbeitung der Daten

1x Messgerät (z.B. Nor-121 für Messung Leq und Lmax, mit 125ms Zeitauflösung)
 1x Radargerät (Seitenradar) auf Stativ
 1x Laptop
 1x Kalibrator
 2x Mikrofone
 2x Windschutz für Mikrofon
 3x Stativ für Mikrofon Lmax und Leq + für Radargerät
 2x Kabel Mikrofon-Messgerät
 1x Kabel Messgerät-Laptop
 1x Kabel Radargerät-Laptop
 1x Batterie für Radargerät
 1x Tragbare Stromeinheit für Laptop und Messgerät oder ein Paar Batterien für jedes Gerät
 (Die normale Batterie eines Laptops reicht meistens kaum für eine Messung)
 1x Infrarotthermometer (T° Belag)
 1x Thermometer (T° Luft)
 1x GPS oder ähnliches (optional)
 1x Messband

Zubehör: Klapptisch, Stuhl, Digitalkamera, Klebeband

Programme zur Datenübertragung und -auswertung: „PassByNoise“ von Norsonic und „SR3“ von Sierzega, für die Übertragung der Daten des Messgeräts, resp. des Radargeräts

► Material für eine Vorbeifahrtmessung (Beispiel 2): Durchführung durch 2 Personen, Dauer einer Messung ca. 2 bis 2.5 Stunden, langsamere Bearbeitung der Daten

1x Messgerät für Lmax-Messung (z.B. Nor-118, Nor-116 oder Nor-120)
 1x Pegelschreiber mit Messeinheit (Belagsmesser) für Leq-Messung
 1x Radargerät (Radarpistole) auf Stativ.
 1x Kalibrator
 2x Mikrofone
 2x Windschutz für Mikrofon
 3x Stativ für Mikrofon Lmax und Leq + für Radarpistole
 2x Kabel Mikrofon-Messgerät
 1x Batterie für Radargerät
 Batterien für Pegelschreiber mit Messeinheit + Messgerät
 1x Infrarotthermometer (T° Belag)
 1x Thermometer (T° Luft)
 1x GPS oder ähnliches (optional)
 1x Messband

Zubehör: Klapptisch, Stuhl, Digitalkamera, Klebeband

Messdurchführung

Eine Messung umfasst die Vorbeifahrtmessung von 80-100 Fahrzeugen mit Ermittlung von L_{eq} und L_{max} , der Geschwindigkeit und der Fahrzeugkategorie. Der Zeitaufwand beträgt im Durchschnitt 3 Stunden für die Einrichtung des Materials und die Durchführung der Messung (exkl. Displacement).

L_{max} wird im Idealfall in 7.5 m Abstand und 1.2 m Höhe ab Fahrspurachse gemessen. L_{eq} wird im Idealfall in 5 m Meter Abstand und in 1.7 m Höhe gemessen.

Die Messung von L_{eq} und L_{max} erfolgt mit der Einstellung FAST, d.h. eine Zeitauflösung um 125 ms. Die Dauer jeder Vorbeifahrtaufnahme beträgt ca. 6 Sekunden. Mit dem Nor-121-Messgerät und dem Programm „PassByNoise“ werden die gemessenen Daten automatisch auf den Laptop geladen und als Grafik dargestellt. Die gemessenen Geschwindigkeiten und die Fahrzeugkategorien werden von Hand während der Messung eingetragen.

Messauswertung

Die Schallenergie jeder Vorbeifahrt (Dauer ca. 6 Sekunden) wird auf eine Stunde verteilt. So ergibt sich ein energieäquivalenter Dauerschallpegel pro Fahrzeug und Stunde. Dies ermöglicht eine einfache Berechnung des Emissionspegels für eine beliebige Verkehrsmenge und Verkehrszusammensetzung. Bei der Auswertung werden die Emissionswerte mit denjenigen der Strassenlärmmodelle STL86 (für L_{eq}) und STL02 (für L_{max}) verglichen.

Messprotokoll

Ein Messprotokoll muss für jede Messreihe angefertigt werden. Die folgenden Angaben müssen darin enthalten sein:

- Benennung des Messorts (Gemeinde, Strasse), mit Koordinaten des Messpunktes
- Abstand und Höhe des L_{max} -Mikrofons ab Mitte der gemessenen Fahrspur
- Abstand und Höhe des L_{eq} -Mikrofons ab Mitte der gemessenen Fahrspur
- Breite der gemessenen Fahrspur
- Luft- und Belagtemperatur am Anfang und am Ende der Messung
- Beschreibung der Wetterbedingungen (z.B. windstill, bewölkt, usw.)
- Skizzen oder Fotos der Messanordnung
- Fotos vom Belag und/oder von der Pflasterung
- Beschreibung des Belages:

Bei Asphaltbelägen: - Bezeichnung (z.B. AB11, SMA8, MR8, usw...) + Einbaujahr

Bei Pflastersteinen: - Länge des gepflasterten Streifens oder der Rampe,
 - Grösse der Pflastersteine (z.B. 10x10 cm),
 - Kante der Pflastersteine (z.B. rund oder scharfkantig)
 - Breite der Fugen (z.B. 8 mm)
 - Fugentyp (mit Sand oder Mörtel gefüllt, ohne Fugenfüllung),
 - Oberflächenstruktur- und Textur (z.B. flach, glatt, rau, usw...),
 - Verlegung der Steine (z.B. 45°, quer zur Fahrtrichtung, Fischgrat, usw),
 - Zustand der Pflasterung (z.B. Lücken),
 - Höhe über angrenzenden Belag bei Rampen,
 - Einbaujahr

- Bei Messungen an Übergängen Pflaster / Belag; Beschreibung des Übergangs (z.B. Höhe des Vertikalversatzes) + Fotos

Anhang 4: Beurteilung der subjektiven Belästigung von Aufpflästerungen

Nachfolgend wird eine Zusammenstellung der wichtigsten Aspekte zum Thema subjektiver Belästigung durch starke Pegelvariationen und Impulsgeräusche vorgeschlagen. Dabei handelt es sich nur um Ideen, die bei der Erfassung, der Beschreibung oder bei der Beurteilung von Pegelvariationen und Impulsgeräuschen behilflich sein können.

Beschreibung der Pegelverläufe und Frequenzen – Kennzahlen	
Folgende Informationen bei der Auswertung von Vorbeifahrtmessungen erfassen.	
1	Anzahl Geräuschspitzen
2	Mittlere Dauer eines Pegelanstiegs (Zeit zwischen lokalen Min. und Max).
3	Mittlere Dauer eines Pegelabstiegs (Zeit zwischen lokalen Max. und Min).
4	Mittlere Dauer jeder Pegelspitze (= Gesamtereignis)
5	Schärfe des Pegelanstiegs aus 2,3,4 und 5. Der An-/Abstieg wird in dB/Sekunde angegeben
6	Frequenzbereiche, wo die Emissionen am höchsten sind

Toneigenschaften	
Beschreibung der folgende Parameter (wenn sie auftreten) anhand der Pegelverläufe	
1	Schärfe ist umso grösser, je grösser der Anteil hoher Frequenzen ist. (Scharfe Geräusche fordern Aufmerksamkeit)
2	Impulshaltigkeit Impulsgeräusche sind Pegelspitzen, die mehr als 5 dBA über dem mittleren Pegel des übrigen Geräusches ansteigen und deren Anstiegszeit, Dauer und Abstand weniger als 200ms dauern
3	Tonhaltigkeit Ein Dauerton mit deutlich erkennbarer Tonhöhe (wie Tonsignal von Krankenwagen). Tonhaltige Geräusche fordern Aufmerksamkeit

Beschreibung der Lärmereignisse	
Allgemeine Beschreibung der Lärmereignisse	
1	nicht periodischer fluktuierender Lärm
2	kontinuierlicher Lärm
3	konstanter Lärm mit Unterbrechungen
4	fluktuierender periodischer Lärm
5	isolierte Impulse (Schock-Impulsgeräusch oder sinusförmiges Impulsgeräusch)
6	impulshaltiger Lärm in schnellem Rhythmus (sinusförmiges Impulsgeräusch oder verfallende Sinuskurve)

Abdeckung von mehreren Geräuschspitzen	
Haben mehrere Pegelspitzen gegenseitige Wechselwirkungen?	
•	Beim Lärm lassen sich zeitliche Lücken gemäss [41] ab einer Dauer von ca. 5 ms in einem breitbandigen Signal sicher detektieren. Begrenzt wird die Zeitauflösung durch die Vor- und Nachverdeckung, d.h. ein Testsignal kann ab ca. 10 ms vor und bis zu 200 ms nach einem (lauteren) Maskierungssignal nicht mehr gehört werden.

Wahrnehmbarkeit der Pegelvariationen und Impulsgeräusche	
Sind die Pegelvariationen aufgrund ihrer Stärke wahrnehmbar?	
Pegeldifferenz	Wahrnehmung
• 0 – 2 dBA	Nicht wahrnehmbare Veränderung: liegt innerhalb der Messgenauigkeit und ist daher oft bedeutungslos
• 2 – 5 dBA	Gerade wahrnehmbare, kleine Veränderung
• 5 – 10 dBA	Deutlich wahrnehmbare Veränderung; eine Veränderung von 10 dBA wird subjektiv in etwa als doppelt resp. halb so laut empfunden (Bereich Impulsgeräusch beginnt hier)
• 10 – 20 dBA	Grosse und überzeugende Veränderung (sehr lästig gemäss Bund)
• > 20 dBA	Überaus grosse und sehr bedeutende Veränderung

Wahrnehmung aufgrund der Dauer einzelner Spitzen	
Sind die Pegelspitzen aufgrund ihrer Dauer gemildert oder im Gegenteil im Bereich der maximalen Wahrnehmung?	
Dauer [Sek]	Relative Intensität der Wahrnehmung
• 0	-5
• 0.1	-2
• 0.2	0 (Maximale Intensität der Wahrnehmung)
• 0.3	-0.25
• 0.4	-0.5
• 0.5	-0.75
• 0.6	-1

Einfluss auf den Schlaf	
Können die zu beurteilenden Pegelspitzen den Schlaf stören?	
• Schlafstörungen werden ab folgenden Innenraumpegel festgestellt:	
Im Wohngebiet	Ab Pegelspitzen 43-45 dBA (störend, Schlafunterbrechung möglich)
Im Stadtgebiet	Ab Pegelspitzen 43-55 dBA (störend, Schlafunterbrechung möglich)

Einfluss auf die Verständlichkeit	
Können die zu beurteilenden Pegelspitzen ein Gespräch überdecken?	
• Erwachsene: Für eine gute Verständlichkeit muss der Pegel eines Gesprächs + 6 dBA über dem Grundgeräusch liegen.	
• Kinder: Für eine gute Verständlichkeit muss der Pegel eines Gesprächs + 16 dBA über dem Grundgeräusch liegen.	
• Wenn der Pegel der Stimme über 70 dBA steigen muss, bedeutet dies eine zusätzliche Anstrengung. Wenn das Grundgeräusch eines Gesprächs um 70 dBA liegt, Pegelspitzen über den folgenden Werten sind als störend zu beurteilen	
Tags	Ab 64-65 dBA (störend) / Ab 72-75 dBA (stark störend) am Ohr der Erwachsenen
Nachts	Ab 54-65 dBA (störend) / Ab 62-65 dBA (stark störend) am Ohr der Kinder

Weitere qualitative und quantitative Parameter der Belästigung durch Pegelvariationen und Impulsgeräusche werden in Kapitel 4 erläutert.