

TEXTE

115/2021

Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum

Abschlussbericht

TEXTE 115/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3717 54 102 0

FB000543

Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum

Abschlussbericht

von

Gerald Hamöller, Michael Jäcker-Cüppers, Ann-Kathrin
Kuppe, Cloé Louistisserand, Yannik Melchior, Thomas
Petersen, Steffen Plogstert, Hannah Wacker
Ramboll Deutschland GmbH, Karlsruhe, Berlin

Dr.-Ing. Dirk Boenke, Dr.-Ing. Friedrich Krüger, Julia Nass
STUVA e. V., Köln

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Ramboll Deutschland GmbH
Zur Gießerei 19-27C
76227 Karlsruhe

Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V.
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln

Abschlussdatum:

Oktober 2020

Fachbetreuung:

Fachgebiet I 2.3 Lärminderung im Verkehr
Percy Appel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum

Im Hinblick auf die fortschreitende Verdichtung der Ballungsräume und den damit notwendigen Ausbau des ÖPNV ist es von umweltpolitischer Bedeutung, dass unerwünschte Umweltauswirkungen weitestgehend vermieden werden. Dies gilt insbesondere für die leistungsstarken Straßenbahnsysteme.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es daher, den Ausbau der schienengebundenen Verkehrssysteme zu fördern und durch deren erhöhte Akzeptanz in der Öffentlichkeit die Umsetzung von Maßnahmen gegebenenfalls zu beschleunigen.

Die folgenden forschungsleitenden Fragestellungen wurden dabei adressiert:

- ▶ Wer sind die relevanten Akteurinnen und Akteure, um lärmreduzierende Maßnahmen umzusetzen?
- ▶ Welche rechtlichen bzw. organisatorischen Werkzeuge stehen den relevanten Akteurinnen und Akteuren dafür zur Verfügung?
- ▶ Welche lärmreduzierenden Maßnahmen stehen zur Verfügung?
- ▶ Welche lärmreduzierenden Maßnahmen sind gesamtwirtschaftlich sinnvoll und wie könnten Anreize für deren Implementierung geschaffen werden?
- ▶ Wie könnte ein Monitoringsystem zur Überwachung von lärmreduzierenden Maßnahmen aussehen?

Abstract: Title

With a view to the growing densification of metropolitan areas and the ensuing obligatory Public Transport improvements it has become increasingly important for any environmental policy to avoid undesirable environmental impacts as far as possible. This is particularly true for tram and tramtrain systems with their large capacities.

The aim of the present study thus is the promotion of rail bound transport systems and even the acceleration of the realisation of PT measures by ways of increasing their public acceptance.

The following guiding questions underlie the study:

- ▶ Who are the relevant stakeholders who can realise noise-reducing measures?
- ▶ Which legal and organisational instruments respectively are available and accessible for these stakeholders?
- ▶ Which catalogue of noise-reducing measures could possibly be implemented?
- ▶ Which noise-reducing measures make sense considering their aggregate impact and how can their implementation be encouraged?
- ▶ How could a monitoring system for the control of noise-reducing measures look like?

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis.....	15
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung	22
Summary	23
Einleitung.....	24
1 Methodischer Rahmen.....	25
1.1 Projektziele und Gegenstand der Arbeiten	25
1.2 Abgrenzung der Aufgabenstellung	25
1.3 Vorgehen.....	26
1.3.1 Literaturrecherche.....	26
1.3.2 Erhebung (Online Befragung)	26
1.3.3 Expertinnen- und Experteninterviews.....	28
2 Fahrzeuge, Fahrwege und akustische Grundlagen	29
2.1 Straßenbahnen und deren Bahnkörper.....	29
2.1.1 Fahrzeuge der Straßenbahnen	29
2.1.2 Bahnkörper und Oberbau.....	30
2.2 Akustische Grundlagen beim Straßenbahnverkehr	31
2.2.1 Schall.....	31
2.2.2 Lärm	31
2.2.3 Ausbreitung von Schall und Erschütterungen beim Schienenverkehr	32
2.2.4 Wahrnehmung von Schall und Erschütterungen beim Schienenverkehr	34
2.3 Schallpegelgrößen.....	35
2.3.1 A-Frequenz-Bewertung, Beurteilungspegel und Lärmindex	35
2.3.2 Maximalpegel	37
2.3.3 Mittelungspegel.....	38
2.3.4 Beurteilungspegel.....	40
2.4 Schallausbreitung und Einfluss dominanter Quellen	41
2.5 Schallquellen beim Betrieb von Straßenbahnen (Direktschall).....	43
2.5.1 Schallquellen an den Straßenbahnfahrzeugen.....	43
2.5.2 Schallanregung im Bereich von Rad und Schiene	47
2.5.3 Antriebs- und Aggregatgeräusche	67

2.5.4	Einfluss des Oberbaus.....	69
2.5.5	Sonstige sekundäre Schallquellen	72
3	Wettbewerbliche Situation	73
3.1	Organisation des ÖPNV.....	73
3.2	Marktsituation	76
3.3	Regulierung.....	79
3.4	Finanzierung und Förderung	82
3.5	Relevante Akteurinnen und Akteure zur Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen	84
4	Rechtlicher Rahmen	87
4.1	Einleitung	87
4.2	Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrzeuge.....	88
4.2.1	Definition	88
4.2.2	Wirkung des Instruments	88
4.2.3	Zuständigkeiten für die Festsetzung von Geräuschgrenzwerten.....	89
4.2.4	Aktueller Stand bei der Festlegung von Geräuschgrenzwerten.....	90
4.2.5	Initiativen für eine Geräuschemissionsvorschrift für Straßenbahnen	92
4.2.6	Gestaltungserfordernisse und -optionen	93
4.2.7	Zusammenfassung	94
4.3	Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrwege.....	94
4.3.1	Definition	94
4.3.2	Wirkung des Instruments	94
4.3.3	Zuständigkeiten	95
4.3.4	Aktueller Stand	95
4.3.5	Gestaltungserfordernisse und -optionen	96
4.3.6	Zusammenfassung	96
4.4	Grenzwerte für die Geräuschmissionen des Schienenverkehrs.....	96
4.4.1	Definition	96
4.4.2	Wirkung des Instruments	96
4.4.3	Zuständigkeiten	98
4.4.4	Aktueller Stand	98
4.4.5	Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen	99
4.5	Indirekte Vorgaben für die Geräuschemissionen in der 16. BImSchV und in CNOSSOS-DE	100
4.5.1	Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV (Schall 03)	101

4.5.2	CNOSSOS-DE	102
4.5.3	Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen	102
4.6	Geräuschemissionsvorgaben in Nahverkehrsplänen	102
4.7	Lärmminderungsplanung.....	104
4.7.1	Definition	104
4.7.2	Wirkung des Instruments	104
4.7.3	Zuständigkeiten	105
4.7.4	Aktueller Stand	105
4.7.5	Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen	105
4.7.6	Bewertung der Steuerungspotenziale der Lärmminderungsplanung.....	105
4.8	Betriebsbeschränkungen	106
4.8.1	Definition	106
4.8.2	Wirkung des Instruments	106
4.8.3	Zuständigkeiten	106
4.8.4	Aktueller Stand	106
4.8.5	Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen.....	107
4.8.6	Bewertung des Instrumentes der Betriebsbeschränkungen.....	107
4.9	Verfügbare rechtliche bzw. organisatorische Werkzeuge.....	107
5	Maßnahmen	110
5.1	Lärmminderungsmaßnahmen an der Infrastruktur	110
5.1.1	Festlegungen gemäß 16. BImSchV für Fahrzeuge und Infrastruktur	110
5.1.2	Übersicht über die Maßnahmen	111
5.1.3	Vermeidung kleiner Gleisbogenradien	116
5.1.4	Präventive Schieneninstandhaltung (Wartungs- und akustisches Schleifen)	116
5.1.5	Korrektive Schieneninstandhaltung (Fräsen, Hobeln).....	121
5.1.6	Schienenstegdämpfer	122
5.1.7	Schienenstegabschirmung.....	125
5.1.8	Begrünte Bahnkörper	126
5.1.9	Schräge Schienenverbindungen	127
5.1.10	Herzstücke bei Weichen und Kreuzungspunkte.....	128
5.1.11	Auftragsschweißungen	130
5.1.12	Beeinflussung der Reibung zwischen den Fahrflächen von Rad und Schiene	131
5.1.13	Schallabsorbierende Elemente im Gleisbereich.....	135
5.1.14	Schallschutzwände	136

5.1.15	Niedrige Schallschutzwände	141
5.1.16	Niedrige Schallschutzwände in Kombination mit Maßnahmen am Drehgestell	143
5.1.17	Sonstige Maßnahmen	143
5.2	Maßnahmen an den Fahrzeugen	143
5.2.1	Übersicht über die Maßnahmen	143
5.2.2	Spurkranzschmierung	146
5.2.3	Benetzung der Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	146
5.2.4	Radial einstellbare Radsätze	148
5.2.5	Radschallabsorber	150
5.2.6	Bearbeitung der Radfahrflächen	152
5.2.7	Bedämpfung der Radscheiben	152
5.2.8	Reduzierung der Antriebsgeräusche durch moderne Antriebsstromrichter	153
5.2.9	Reduzierung der Antriebsgeräusche durch Getriebeoptimierung	154
5.2.10	Geräuschoptimierung von Heizungs-, Klima- und Lüftungsgeräten	154
5.2.11	Sonstige Lärmindernde Maßnahmen an Fahrzeugen	155
5.3	Betriebliche Maßnahmen	155
5.3.1	Übersicht der Maßnahmen	155
5.3.2	Reduzierung der zulässigen Streckengeschwindigkeit	156
5.3.3	Fahrzeug Einsatzstrategien	157
6	Sozio-ökonomische Bewertung, regulatorische und wirtschaftliche Anreize von Lärminderungsmaßnahmen	159
6.1	Kosten lärmreduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen	159
6.2	Sozio-ökonomische Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen	163
6.2.1	Ziele einer Bewertung	163
6.2.2	Kosten je Dezibel	163
6.2.3	Monetarisierung des Nutzens	166
6.2.4	Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen anhand eines Nutzen-Kosten-Modells	169
6.2.5	Zusammenfassende Empfehlungen für die sozio-ökonomische Bewertung	178
6.3	Regulatorische und wirtschaftliche Anreize für Lärmvermeidungsmaßnahmen	179
6.3.1	Zielstellung und Ausgangslage	179
6.3.2	Marktversagen als Begründung für öffentliche Eingriffe	181
6.3.3	Systematisierung der Eingriffsmöglichkeiten	182
6.3.4	Wirkungsgrad der Instrumente	184
6.3.5	Beschreibung möglicher wirtschaftlicher Anreizinstrumente	186

6.3.6	Lösungsansätze für Anreize zur Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen.....	193
7	Monitoring	194
7.1	Grundsätzliche Anmerkungen zur Umsetzung eines Monitoringsystems	194
7.2	Vorhandene Überwachungssysteme.....	196
7.2.1	ADUR – Automatische Detektion unrunder Räder.....	196
7.2.2	Wheel Monitoring System (Radüberwachungssystem)	197
7.2.3	LASCA (Hochgeschwindigkeits-Lasermesssystem)	198
7.3	Konzept für eine akustische Überwachung	199
7.3.1	Fahrzeugüberwachung durch Messungen im Schienenbereich	199
7.3.2	Fahrwegüberwachung durch Messeinrichtungen am Fahrzeug	202
7.4	Beispiele für eine Anwendung von E DIN 38452-1.....	203
7.4.1	Anwendungsfall 1	203
7.4.2	Anwendungsfall 2	206
7.4.3	Beispiel für eine praktische Anwendung der ADUR-Anlage.....	209
7.4.4	Schlussfolgerungen aus den Messungen.....	212
7.5	Nutzen eines Monitoringsystems	213
7.5.1	Fahrzeugüberwachung	213
7.5.2	Fahrwegüberwachung	214
8	Schlussfolgerungen hinsichtlich der Umsetzung Lärm reduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen	215
8.1	Relevante Akteurinnen und Akteure	215
8.2	Rechtliche bzw. organisatorische Werkzeuge	215
8.3	Verfügbarkeit Lärm reduzierender Maßnahmen	216
8.4	Wirtschaftliche Aspekte lärmreduzierender Maßnahmen und Anreize zur Umsetzung	216
8.5	Vorteile eines Monitoringsystems.....	216
9	Literaturverzeichnis.....	218
	Gesetze und Rechtsvorschriften	218
	Normen und Regelwerke	221
	Weitere Quellen	221
A	Anhang	230
A.1	Ergebnisse der Nutzen-Kosten-Analyse.....	230
A.1.1	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1.....	230
A.1.2	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2.....	235
A.1.3	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3.....	240

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bahnkörper der Straßenbahn.....	30
Abbildung 2:	Darstellung der durch den Straßenbahnverkehr verursachten Luftschall- und Erschütterungsemissionen	33
Abbildung 3:	A-Bewertung und dominante Frequenzbereiche für verschiedene Immissionsarten	36
Abbildung 4:	Beispiel für die Wirkung der A-Bewertung auf ein unbewertetes Terzspektrum.....	36
Abbildung 5:	Gegenüberstellung der A- und C-Bewertungskurven	37
Abbildung 6:	Beispiel für den Schalldruckpegelverlauf während einer Straßenbahnvorbeifahrt.....	38
Abbildung 7:	Darstellung des Schalldruckpegels $L_{pAF}(t)$ von unterschiedlichen Verkehrsgeräuschen.....	39
Abbildung 8:	Grafische Darstellung der Schallpegeladdition von mehreren gleich lauten oder unterschiedlich lauten Schallquellen	42
Abbildung 9:	Beispiel für Schallpegelverläufe in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Oberbauart im Bereich eines Drehgestells.....	44
Abbildung 10:	Beispiel für die A-bewerteten Schallpegelverläufe (Trendlinien) der Oktaven 63 Hz bis 8 kHz und des Summenpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	46
Abbildung 11:	Schallquellen bei Straßenbahnen am Beispiel eines Niederflurfahrzeugs	46
Abbildung 12:	Streckenführung im Innenstadtbereich bei beengten Straßenverhältnissen	47
Abbildung 13:	Wesentliche Anregungsursachen für Körperschall im Rad-/Schiene-Kontaktbereich	47
Abbildung 14:	Schallabstrahlende Bauteile im Bereich von Rad, Schiene und Fahrweg bei offenliegenden und abgeschirmten Schienen	48
Abbildung 15:	Beispiele für Schienenrauheiten	50
Abbildung 16:	Ergebnis einer Riffelmessung (Beispiel)	51
Abbildung 17:	Grenzspektren für die Rauheit der Schienenfahrflächen	52
Abbildung 18:	Beispiel für den Einsatz eines Rauheitsmessgerätes	54
Abbildung 19:	Beispiel für die Messung der Radrauheit mittels eines Wegaufnehmers.....	54
Abbildung 20:	Körperschallmessung im Drehgestell bei einem Hochflur- und Niederflurfahrzeug	55
Abbildung 21:	Messergebnisse einer Körperschallmessung auf den Radsatzlagern eines U-Bahnfahrzeugs.....	56
Abbildung 22:	Entstehung des Stick-slip-Effektes infolge der Radsatzstellung bei der Durchfahrt eines Gleisbogens (Linksbogen)	57
Abbildung 23:	Einflussgrößen beim Auftreten von Kurvenquietschen in Gleisbögen.....	58

Abbildung 24:	Mikrofonstandort für die Langzeitmessung in einem Messquerschnitt an einer Eisenbahnstrecke	60
Abbildung 25:	Anfahrwinkel zwischen Rad und Schiene im Gleisbogen.....	61
Abbildung 26:	Schalldruckpegelverläufe $L_{pAF}(t)$ während einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen.....	62
Abbildung 27:	Schalldruckpegel einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – Schmalbandspektrum	63
Abbildung 28:	Schalldruckpegel-Terzspektren einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – unbewertetes Spektrum $L_{peq}(f_{Tn})$	64
Abbildung 29:	Schalldruckpegel-Terzspektren einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – A-bewertetes Spektrum $L_{pAeq}(f_{Tn})$	64
Abbildung 30:	Beispiel für ein Schallpegel-Terzspektrum beim Auftreten von Zischgeräuschen	65
Abbildung 31:	Beispiel für einen Kreuzungspunkt mit Rillenschienen und eine Stoßstelle aufgrund eines Schienenbruchs.....	66
Abbildung 32:	Abhängigkeit der angeregten Frequenzbereiche von der Zeitdauer eines Stoßes	67
Abbildung 33:	Schallentstehung und Weiterleitung im Getriebe	68
Abbildung 34:	A-bewertete Schalldruckpegel $L_{pAF}(t)$ bei Fahrt auf verschiedenen Oberbauformen	70
Abbildung 35:	Auswirkungen eines schallharten und schallabsorbierenden Oberbaus auf den Schalldruckpegel	71
Abbildung 36:	Integriertes Verkehrsunternehmen im schienengebundenen ÖPNV	74
Abbildung 37:	Teilintegrierte Organisationsstruktur im schienengebundenen ÖPNV	75
Abbildung 38:	Trennung der Aufgabenbereiche im schienengebundenen ÖPNV	75
Abbildung 39:	Übersicht Einfluss der EU-Ebene auf die Lärmaktionsplanung in Deutschland.....	80
Abbildung 40:	Standardisierte Bewertung – Mit-/Ohnefall-Prinzip	84
Abbildung 41:	Vergabeverfahren eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags für die Bestellung von Verkehrsleistungen in Deutschland – Schematische Darstellung.....	85
Abbildung 42:	Auswirkung beim Zusammenwirken zweier gleich lauter, unabhängiger Schallquellen	112
Abbildung 43:	Schleifen eines Herzstückes mit einer Handschleifmaschine	118
Abbildung 44:	Tendenzieller Einfluss des vorbeugenden Schleifens der Schienenfahrflächen auf die Verminderung von Schallemissionen	119
Abbildung 45:	Schienenschleifzug mit Rutschersteinen	120
Abbildung 46:	Schleifzug „HSG-city“ der Rheinbahn in Düsseldorf	121
Abbildung 47:	Beispiel für einen Schienenstegdämpfer	122

Abbildung 48:	Beispiel für Schienenstegdämpfung, Befestigung mit Klammern.....	123
Abbildung 49:	Zusammenhang zwischen der Wirkungsweise von Schienenstegdämpfern (SSD) bzw. Schienenstegabschirmung (SSA) und der Gleisabklingrate (TDR).....	124
Abbildung 50:	Prinzip und Anwendungsbeispiel für eine Schienenstegabschirmung	125
Abbildung 51:	Ausführungsformen von begrünten Bahnkörpern	126
Abbildung 52:	Beispiel für die Anwendung schräger Schienenstöße – Beispiel Straßenbahn Stuttgart	128
Abbildung 53:	Überlaufherzstück in einer Weiche – Beispiel Straßenbahn Hannover.....	129
Abbildung 54:	Prinzipdarstellung und praktische Anwendung für Auftragsschweißungen (Antiquietschweißung) auf der Schienenfahrfläche	130
Abbildung 55:	Schallexpositionspegel (SEL) ohne/mit Auftragsschweißung (Tagesmittelwerte) bei Messungen an einem Gleisbogen	131
Abbildung 56:	Einbausituation einer stationären Schienenfahrflächenkonditionierungsanlage	132
Abbildung 57:	Schienenberegnung zur Vermeidung von Kurvengeräuschen – Beispiel Straßenbahn Stuttgart	133
Abbildung 58:	Bewässerung der Rillenschienen – Beispiel Karlsruhe.....	133
Abbildung 59:	Akustische Wirkung einer Schienenschmiereinrichtung	134
Abbildung 60:	Absorberplatten im Gleis zur Minderung der Luftschallemissionen – Beispiel S-Bahn Berlin	135
Abbildung 61:	Pegelminderungen für ein Gebäude in 25 Meter Abstand durch eine Schallschutzwand	137
Abbildung 62:	Wirkung einer Schallschutzwand – Ermittlung des Schirmwertes z	138
Abbildung 63:	Beispiel für eine Schallschutzwand aus Aluminium	139
Abbildung 64:	Beispiel für eine Schallschutzwand aus Glas auf Betonsockel	139
Abbildung 65:	Einsatz einer hohen Holz-Glas-Schallschutzwand – Beispiel Karlsruhe	140
Abbildung 66:	Gabionenwand an einer Straßenbahnstrecke im Bereich einer Haltestelle	141
Abbildung 67:	Einsatz einer niedrigen Schallschutzwand neben einem Straßenbahngleis – Beispiel Straßenbahn Stuttgart	142
Abbildung 68:	Schmierung der Schienenfahrflächen vom Fahrzeug aus	146
Abbildung 69:	Wirkung einer fahrzeugseitigen Benetzung der Schienenfahrflächen.....	147
Abbildung 70:	Aufsicht auf das Fahrwerk der Straßenbahn Typ Cobra	150

Abbildung 71:	Prinzipieller Aufbau eines Schwingungsdämpfers (Radschallabsorber).....	151
Abbildung 72:	Beispiel für Radschallabsorber an Straßenbahnradern	151
Abbildung 73:	Beispiel für Radscheibenbedämpfung an Straßenbahnradern	153
Abbildung 74:	Vorgehen einer Kosten-Nutzen-Analyse	163
Abbildung 75:	Verhältnismäßigkeitswaage	167
Abbildung 76:	Methodischer Ansatz zur Ermittlung des Nutzens.....	170
Abbildung 77:	Lageplanskizze des Straßenabschnitts im Innenstadtbereich für Beispielrechnung	172
Abbildung 78:	Schlüsselfaktoren für den Vergleich von schallmindernden Maßnahmen	179
Abbildung 79:	Wertschöpfungskette Infrastruktur- und Fahrzeugbewirtschaftung	183
Abbildung 80:	Ablaufschema einer dynamischen Lärminderungsförderung	191
Abbildung 81:	Darstellung der Schallausbreitung unter Einbindung des Schienenkörperschalls.....	196
Abbildung 82:	Messstrecke 1 und Anordnung der Mikrofone und Geophone im Boden	204
Abbildung 83:	Darstellung der Erschütterungsmessergebnisse im Boden (Trendlinien)	205
Abbildung 84:	Messsituation an Gleisen neben einer stark befahrenen Straße, Mikrofonpositionen	206
Abbildung 85:	Messergebnis – Erschütterungssignale im Boden an den Messpunkten MP1 und MP3 für die Messstelle aus Anwendungsfall 2.....	207
Abbildung 86:	Messergebnis einer Vorbeifahrt	208
Abbildung 87:	Ergebnis einer Überwachungsmessung mit dem System ADUR	209
Abbildung 88:	Überwachungsmessung für eine Vorbeifahrt einer U-Bahn ohne Flachstellen	210
Abbildung 89:	Überwachungsmessung für eine Vorbeifahrt einer U-Bahn mit Flachstellen	210

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung der Schallpegel für zwei Straßenbahnvorbeifahrten in Relation zum Straßenverkehr ..	39
Tabelle 2:	Anregung von Frequenzen in Abhängigkeit der Wellenlänge bei der Schienenrauheit ($v = 50 \text{ km/h}$)	53
Tabelle 3:	Unterschiedliche Kurvengeräusche und ihre Ursachen.....	57
Tabelle 4:	Zu erwartende Geräusche und Wahrscheinlichkeit des Auftretens in Abhängigkeit des Gleisbogenradius R.....	59
Tabelle 5:	Empfehlungen zu Auslösekriterien für die Lärmaktionsplanung	81
Tabelle 6:	Übersicht über die Berücksichtigung von Straßenbahnen in der Lärmaktionsplanung	82
Tabelle 7:	Pegelhöchstwerte für Neufahrzeuge	103
Tabelle 8:	Basisdaten und Einflussgrößen zur Schallemissionsermittlung nach Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV	110
Tabelle 9:	Maßnahmen im Bereich der Infrastruktur und im Rad/Schiene- Kontaktbereich und deren akustische Wirkung.....	114
Tabelle 10:	Schienenbearbeitungsmethoden und ihre Anwendungsbereiche im ÖPNV	117
Tabelle 11:	Zusammenstellung möglicher Schallminderungsmaßnahmen am Fahrzeug sowie deren akustischer Wirkung auf den A- bewerteten Emissionspegel	144
Tabelle 12:	Kurvengeräusche bei starr geführtem und gelenktem Radsatz im Vergleich.....	149
Tabelle 13:	Zusammenstellung möglicher Schallminderungsmaßnahmen im Betrieb sowie deren akustischer Wirkung auf den A-bewerteten Emissionspegel.....	156
Tabelle 14:	Jährliche Kosten der Schallminderungsmaßnahmen je Kilometer.....	160
Tabelle 15:	Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Rollgeräusche reduzieren	164
Tabelle 16:	Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Stoßgeräusche reduzieren	165
Tabelle 17:	Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Kurvengeräusche reduzieren	166
Tabelle 18:	Lärmkartierung in Berlin 2017 – Kumulierte Zahl der Belasteten in der Nacht durch Straßenverkehrslärm und Straßenbahnlärm (einschließlich oberirdischer U-Bahn)	168
Tabelle 19:	Übersicht allgemeine Eingabedaten Ansatz Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen.....	171
Tabelle 20:	Ergebnisse Szenario 1 - Rollgeräusche	173
Tabelle 21:	Ergebnisse Szenario 1 - Stoßgeräusche.....	173
Tabelle 22:	Ergebnisse Szenario 1 - Kurvengeräusche.....	174

Tabelle 23:	Ergebnisse Szenario 2 - Rollgeräusche	174
Tabelle 24:	Ergebnisse Szenario 2 – Stoßgeräusche	175
Tabelle 25:	Ergebnisse Szenario 2 - Kurvengeräusche.....	175
Tabelle 26:	Ergebnisse Szenario 3 - Rollgeräusche	176
Tabelle 27:	Ergebnisse Szenario 3 - Stoßgeräusche.....	176
Tabelle 28:	Ergebnisse Szenario 3 - Kurvengeräusche.....	177
Tabelle 29:	Ergebnis Sensitivitätsanalyse	177
Tabelle 30:	Vermuteter Wirkungsgrad der Anreizinstrumente je Wertschöpfungsstufe	186
Tabelle 31:	Gemittelte Messwerte von Fahrzeugvorbeifahrten ohne und mit Flachstellen auf den Rädern	212
Tabelle 32:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Rollgeräusche	230
Tabelle 33:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Stoßgeräusche.....	231
Tabelle 34:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Kurvengeräusche.....	233
Tabelle 35:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Rollgeräusche	235
Tabelle 36:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Stoßgeräusche.....	236
Tabelle 37:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Kurvengeräusche.....	238
Tabelle 38:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Rollgeräusche	240
Tabelle 39:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Stoßgeräusche.....	241
Tabelle 40:	Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Kurvengeräusche.....	243

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
α	Anfahrwinkel
λ	Wellenlänge der Fahrflächenrauheit von Schiene und Rad
ΔL	Differenzpegel
Δr	Abweichung von einem runden Rad (z. B. Flachstelle)
a	Jahr
ADUR	Automatische Detektion unrunder Räder
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOStrab	Verordnung für den Bau und Betrieb von Straßenbahnen
BUB	Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen
büG	besonders überwachtes Gleis
CNOSSOS-EU	Common noise assessment methods for Europe (dt.: Gemeinsame Lärmbewertungsmethoden für Europa)
dB	Dezibel (Maß für den Schalldruckpegel)
dB(A)	Dezibel, A-bewerteter Schalldruckpegel
DB AG	Deutsche Bahn Aktien-Gesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DTZ	Dieseltriebzüge
EG	Erdgeschoss
EG	Europäische Gemeinschaft

Abkürzung	Erläuterung
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
EIU	Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen
EN	Europäische Norm
EP	Emissionspunkt
ETZ	Elektrotriebzüge
EU	Europäische Union
EuGH	Europäischer Gerichtshof
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EW	Einwohnende
F	Fastbewertung des Schalldruckes
f	Frequenz
FFT	Fast Fourier Transformation (Verfahren zur Zerlegung eines zeitdiskreten Signals in seine Frequenzanteile)
f_m	Terzmittenfrequenz
f_o	obere Frequenz einer Terz
f_{Tn}	Terzmittenfrequenz der n-ten Terz
f_u	untere Frequenz einer Terz
Fzg	Fahrzeug
GG	Grüne Gleise
GTO	Gate-Turn off Thyristor
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
HBW	Härtegrad nach Brinell
Hz	Hertz (1/s, Einheit für die Frequenz)
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
ISO	Internationale Norm
Kfz	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
KS	Körperschall
KVU	Kommunales Verkehrsunternehmen

Abkürzung	Erläuterung
L	Pegel (englisch: Level)
L_{day}	äquivalenter Dauerschallpegel, Tag (6 Uhr bis 18 Uhr)
L_{den}	äquivalenter Dauerschallpegel für den ganzen Tag (day, evening, night)
L_{evening}	äquivalenter Dauerschallpegel, Abend (18 Uhr bis 22 Uhr)
L_{night}	äquivalenter Dauerschallpegel, Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr)
L_p	Schalldruckpegel
L_{pA}	A-bewerteter Schalldruckpegel
L_{pAeq,T}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, Messdauer T
L_{pAeq,Tp}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, Messdauer T _p
L_{pAeq,Tr}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel für die Beurteilungszeit T _r
L_{pAF}(t)	AF-bewerteter Schalldruckpegelverlauf
L_{pAFmax}	AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel, Zeitbewertung „Fast“
L_{pAFmax,m}	AF-bewerteter gemittelter maximaler Schalldruckpegel
L_{pAm,T}	A-bewerteter Mittelungspegel (über die Messdauer T gemittelt)
L_r	Beurteilungspegel
L_r	Rauheitspegel von Schiene und Rad
L_{r, Nacht}	Beurteilungspegel Nacht (für den Zeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr)
L_{r, Tag}	Beurteilungspegel für den Tag (für den Zeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr)
LAP	Lärmaktionsplan
LCC	Life Cycle Costs (deutsch: Lebenszykluskosten)
lg	dekadischer Logarithmus
LS	Luftschall
MIV	motorisierter Individualverkehr

Abkürzung	Erläuterung
MP	Messpunkt
NIP	Nationales Innovationsprogramm für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NKI	Nutzen-Kosten-Index
NVP	Nahverkehrsplan
öDA	Öffentlicher Dienstleistungsauftrag
OG	Obergeschoss
OLG	Oberlandesgericht
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
p	Druck, in diesem Dokument für Schalldruck
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
r	Radius, in diesem Dokument Gleisbogenradius
SEL	Schallexpositionspegel
SO	Schienenoberfläche (höchster Punkt auf der Lauffläche eines Schienenkopfes)
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SSA	Schienenstegabsorber
SSD	Schienenstegdämpfer
Strab	Straßenbahn
STUVA	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen
T	Messdauer
T_n	n-te Terz
T_p	Vorbeifahrtzeit des Fahrzeugs am Messquerschnitt bei einer Schallmessung
T_r	Beurteilungszeit (Tag, Abend, Nacht)
TDR	Gleisabklingrate (Track Decay Rate)
TEL	Vorbeifahrtexpositionspegel
TSI	Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität im Eisenbahnverkehr

Abkürzung	Erläuterung
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
v	Geschwindigkeit
v_{max}	Höchstgeschwindigkeit
VAG	Verkehrs Aktien-Gesellschaft
VDB	Verband der Bahnindustrie in Deutschland e. V.
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
VMK	Verkehrsministerkonferenz
VO	Verordnung
VU	Verkehrsunternehmen
WA	Allgemeines Wohngebiet
WEBI	wirkungsbezogener energetischer Belastungsindex
WR	Reines Wohngebiet

Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung des Berichts ist als gesondertes Dokument „Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum - Zusammenfassung“ beim Umweltbundesamt erhältlich.

Summary

A summary of this report „Noise reduction for Trams in Urban areas – Summary” is available from the German Environment Agency ([Umweltbundesamt](#) – UBA).

Einleitung

„Die dominante Lebensform der Zukunft ist urban. Schon 2050 werden zwei Drittel aller Menschen in Städten leben. In den nächsten zwei Dekaden wird die Anzahl der Menschen in urbanen Räumen weltweit pro Woche um rund 1,4 Mio. Menschen anwachsen. (...) Sowohl die Potenziale als auch die Herausforderungen globaler Entwicklungen konzentrieren sich im Zuge der Urbanisierung zunehmend in Städten“ (Brandi und Messner 2015).

Auch in Deutschland manifestiert sich dieser Megatrend. Die Verdichtung der Ballungsräume schreitet stetig voran. Die Verkehrssysteme stehen den Veränderungen und der Individualisierung der Mobilitätsbedürfnisse gegenüber. *„Mobilität ist ein menschliches Grundbedürfnis und Voraussetzung für unsere gesellschaftliche, kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung. Mobilität – in der spezifischen Form des Personenverkehrs – ermöglicht Menschen räumliche Beweglichkeit und somit den Zugang zu Bildung und Arbeit, zu medizinischer Versorgung, zur Nahversorgung und zur Teilhabe am sozialen, kulturellen und wirtschaftlichen Leben“* (Ramboll Deutschland GmbH 2016).

Die vorhandenen sowie die zukünftigen Verkehrsinfrastrukturen sind daran anzupassen. Häufig fehlt nicht nur der Raum für eine Zunahme des motorisierten Individualverkehrs (MIV), sondern die Zunahme des MIV führte auch zu weiteren Emissionen, wie z. B. CO₂, NO_x, Feinstaub und Schall. Auch der e-Pkw ist hier keine nachhaltige Alternative, auch wenn sich die CO₂-Bilanz dadurch langfristig verbessern dürfte und lokal auch weitere Emissionen signifikant reduziert werden können.

Aus diesem Grund ist der Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) eine sozioökonomische und ökologische Notwendigkeit. Nicht nur nach dem Verständnis des Umweltbundesamtes (UBA) soll er zusammen mit dem Rad- und Fußverkehr das Rückgrat einer nachhaltigen Mobilität in den Städten sein (Umweltbundesamt 2017a). Straßenbahnsysteme erfüllen bereits heute, nicht nur aufgrund ihrer Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und günstigen CO₂-Bilanz, eine wichtige Rolle. Erhalt und Ausbau der schienengebundenen öffentlichen Verkehrssysteme stehen auch im Fokus des Bundes. So tritt mit Wirkung zum 01. Januar 2020 eine Novellierung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG) in Kraft, mit der explizit schienengebundene Verkehrssysteme gefördert werden sollen.

Um eine hohe Nutzenden-Akzeptanz des ÖPNV und damit von Straßenbahnen zu erzielen, ist es erforderlich, die Haltestellen möglichst nahe an die potenziellen Nutzenden heranzubringen und somit die Zugangsbarrieren möglichst gering zu halten. Insbesondere im Innenstadtbereich müssen Gleise mit kleinen Radien verlegt werden, um dem Straßenverlauf folgen zu können. Gleiskreuzungen sind ebenfalls oft nicht zu vermeiden. Aus Platzgründen werden Gleise häufig im Fahrbahnbereich von Straßen mit schallreflektierenden Belägen (Asphalt- oder Pflastereindeckung) verlegt. Dies alles führt insbesondere bei gleisnaher und dichter Bebauung zu hohen Schallimmissionen, die als Kurvenquietschen, Rumpeln oder rauschartige Geräusche wahrgenommen werden. Diese Schallemissionen können für die Anwohnenden zu einer Lärmbelästigung führen.

Die Umgebungslärmkartierung in Ballungsräumen zeigt örtliche Lärmkonflikte auf. Damit zuständige Stellen für die Lärmaktionsplanung und anderer Pläne eine geeignete fachliche Anregung zur Entwicklung geeigneter Maßnahmen und Werkzeuge bekommen, werden im Auftrag des UBA die Möglichkeiten zur Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum untersucht. Ziel der Untersuchung ist es, den Ausbau der schienengebundenen Verkehrssysteme zu fördern und durch deren erhöhte Akzeptanz in der Öffentlichkeit die Umsetzung von Maßnahmen gegebenenfalls zu beschleunigen.

1 Methodischer Rahmen

1.1 Projektziele und Gegenstand der Arbeiten

In diesem Gutachten werden fundierte Konzepte zur Schallminderung von straßenabhängigen Bahnen (vgl. Abschnitt 2.1) im urbanen Raum zusammengetragen, erarbeitet und aufgestellt. Dabei steht die Schallemissionsminderung an der Quelle (technische Maßnahmen an den Fahrzeugen und der Strecke) im Vordergrund. Des Weiteren werden die Möglichkeiten des baulichen Schallschutzes sowie betriebliche Maßnahmen in die Untersuchung mit einbezogen.

Der Fokus der Untersuchung liegt auf dem emittierten Luftschall, seinen möglichen Auswirkungen auf die Anwohnenden und geeigneten Maßnahmen zur Reduzierung.

Im Hinblick auf die fortschreitende Verdichtung der Ballungsräume und den damit notwendigen Ausbau des ÖPNV ist es von umweltpolitischer Bedeutung, dass unerwünschte Umweltauswirkungen weitestgehend vermieden werden. Dies gilt insbesondere für die leistungsstarken Straßenbahnsysteme. Um dies realisieren zu können, ist, neben der Lärmverringerung an bestehender Infrastruktur und den Fahrzeugen auch der Bau neuer Strecken und die Inbetriebnahme neuer innovativer Fahrzeuge wichtig. Berücksichtigt wird inwieweit die derzeitigen rechtlichen, zulassungstechnischen, betrieblichen und ökonomischen Rahmenbedingungen die Erreichung dieser Ziele fördern bzw. behindern (vgl. Umweltbundesamt 2017b, S. 1).

Aber auch technische Rahmenbedingungen, wie innovative Lärminderungsmaßnahmen für Neufahrzeuge und lärm mindernde Umrüsttechnologien für Bestandsfahrzeuge, sind im Gutachten untersucht und bewertet.

Ziel dieses Gutachtens ist, es die folgenden forschungsleitenden Fragestellungen hinreichend zu adressieren:

- ▶ Wer sind die relevanten Akteurinnen und Akteure, um lärmreduzierende Maßnahmen beim Betrieb von Straßenbahnen umzusetzen?
- ▶ Welche rechtlichen bzw. organisatorischen Werkzeuge stehen den relevanten Akteurinnen und Akteuren dafür zur Verfügung?
- ▶ Welche lärmreduzierenden Maßnahmen stehen beim Betrieb von Straßenbahnen zur Verfügung?
- ▶ Welche lärmreduzierenden Maßnahmen beim Betrieb von Straßenbahnen sind gesamtwirtschaftlich sinnvoll und wie könnten Anreize für deren Implementierung geschaffen werden?
- ▶ Wie könnte ein Monitoringsystem zur Überwachung der Wirkungen von lärmreduzierenden Maßnahmen beim Betrieb von Straßenbahnen aussehen?

1.2 Abgrenzung der Aufgabenstellung

Dieses Forschungsvorhaben betrachtet Schallemissionen des Straßenbahnverkehrs nach der Verordnung über den Bau und Betrieb von Straßenbahnen (BOStrab) bei Lage der Gleise im Verkehrsraum öffentlicher Straßen (straßenbündiger und besonderer Bahnkörper). Vollständig unabhängig geführte Gleise in Hoch- oder Tunnellage (U-Bahnen, Schwebelbahnen) sind nicht

Gegenstand dieser Untersuchung. Weiterhin werden nur die durch den Betrieb der Straßenbahnen entstehenden und im Rahmen der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) behandelten Schallimmissionen vor einem Gebäude betrachtet.

1.3 Vorgehen

1.3.1 Literaturrecherche

Sowohl zu Beginn des Projektes als auch über den gesamten Bearbeitungszeitraum wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Diese erfolgte sowohl online (im Internet) als auch offline (in eigenen Datenbanken und Bibliotheken). Ziel der Literaturrecherche ist es eine belastbare Untersuchungsgrundlage zu erhalten und Untersuchungserkenntnisse mit zusätzlichen Quellen abzusichern.

1.3.2 Erhebung (Online Befragung)

Um die Problematik in ihrer Komplexität und Ausprägung zu erfassen und um Grundlagen zur weiteren Forschung zu erhalten, wurde eine Erhebung in Form eines online-Fragebogens erarbeitet. Dieser wurde an alle deutschen kommunalen Verkehrsunternehmen (KVU) mit einem Betrieb gemäß der Verordnung über den Bau und Betrieb von Straßenbahnen (BOStrab) versandt.

1.3.2.1 Ziele der Befragung

Die Erhebung verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele.

- ▶ Die Lieferung einer belastbaren Datenbasis für die weiteren Untersuchungsschritte: die Identifizierung der Probleme und Verbesserungspotentiale sowie deren Analyse bieten ein gutes Bild, welches die Erfahrung der KVU mit der Lärmproblematik widerspiegelt. Damit kann der Stand der Kenntnisse und das Verständnis der Gesetze und Verordnungen – gepaart mit praktischen Lösungsansätzen – aufgezeigt werden.
- ▶ Die Umfrage bietet die Möglichkeit, mit interessierten KVU in Kontakt zu kommen und sie hinsichtlich ihrer Bereitschaft zur Teilnahme an einem nachfolgenden Expertinnen- und Experteninterview zu fragen.

1.3.2.2 Aufbau

Die Umfrage umfasste insgesamt 81 Haupt- und Teilfragen und wurde in sechs Kapitel gegliedert.

Der Fragebogen wurde innerhalb der KVU an mehrere Personen aus jeweils unterschiedlichen Fachbereichen versandt. Um die Antwortraten zu erhöhen, wurde der Fragebogen so konzipiert, dass die Ausfüllzeit bei der Auswahl eines Themenbereichs deutlich unter 10 Minuten liegt und bei der Auswahl von zwei Bereichen 15 Minuten nicht überschreitet. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Unternehmen eine Person für mehr als zwei der vier Themenfelder verantwortlich sein würde, wurde als gering eingestuft. Dies bestätigte sich im Laufe der Erhebung.

Der Fragebogen behandelte Fragen aus den Teilbereichen der Lärmentstehung, der rechtlichen Details sowie der technischen Aspekte. Dabei sind Auswahl, Formulierung und Relevanz der Fragen von Bedeutung, um die Länge des Fragebogens zu kalibrieren. So wurde u. a. mit

Filterfragen sowie Multiple Choice-Fragen gearbeitet. Dies soll den Befragten eine bessere Übersicht zu den Fragen verschaffen.

Im ersten Abschnitt wurden allgemeine Fragen gestellt, die von allen Teilnehmenden beantwortet werden mussten. Ziel ist es, einen Eindruck über die Ausprägung der Problematik in der jeweiligen Stadt zu erhalten.

Nach diesen allgemeinen Fragen wurden spezifische Fragen zu den Themen „Wettbewerb, rechtliche Fragestellungen, Fahrzeug und Fahrweg“ gestellt. Diese Themenbereiche waren von den Befragten frei wählbar, um vor allem Expertinnen- und Expertenantworten zu den spezifischen Themen zu erhalten.

In Rahmen eines kurzen und wieder allgemeinen Abschlussteils wurde der befragten Person die Möglichkeit gegeben, zusätzliche Informationen zum Thema Lärm von Straßenbahnen zu geben, die über die im Fragebogen behandelten Aspekte hinausgingen.

Am Ende des Fragebogens konnten die Teilnehmenden anklicken, ob sie bereit wären, an einem umfassenden Expertinnen- und Experteninterview teilzunehmen.

1.3.2.3 Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Die Umfrage wurde gestartet mit einer Adressliste von allen deutschen KVV mit schienenengebundenem ÖPNV (Straßenbahnen). Ein wesentlicher Teil dieser Unternehmen war den Auftragnehmenden aus der Zusammenarbeit in anderen Projekten bekannt. Fehlende Ansprechpersonen wurden beispielsweise über Fachadressbücher recherchiert, um eine vollständige Liste zu erhalten. Der Verteiler beinhaltete die Kontaktdaten aller Vorstände der recherchierten KVV sowie der meisten Betriebsleitungen und Abteilungsleitungen für die Fahrzeuge und die Infrastruktur. Insgesamt umfasste der Verteiler 141 Personen.

Im Durchschnitt wurden so zwei Personen pro Unternehmen erreicht. Ein Ziel war es, eine möglichst hohe Antwortrate für alle behandelten vier Teilbereiche (Wettbewerb, rechtliche Fragestellungen, Fahrzeug und Fahrweg) zu erreichen. Daher wurden die Empfängerinnen und Empfänger gebeten, die Umfrage an jeweils zuständige Personen in ihrem Unternehmen weiterzuleiten.

Die Umfrage wurde am 27. und 29. September 2017 per E-Mail via Software SurveyXact® (Erhebungstool) versendet. Am 12. Oktober 2017 erfolgte der Versand eines Erinnerungsschreibens. Aufgrund des großen Interesses sowie nach diversen Nachfragen seitens der KVV wurde die Erhebung bis zum 30. November 2017 offengehalten.

Bis Ende November waren 54 Antworten von den 141 angeschriebenen Einzelpersonen (knapp 40 Prozent) eingegangen. Diese repräsentierten 40 Unternehmen (etwa zwei Drittel der KVV). Eine erste Analyse der Validität und Qualität der Ergebnisse wurde durchgeführt.

Die Rückmeldungen zur Umfrage können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Sehr gute Repräsentativität,
- ▶ die Ergebnisse sind eine gute Forschungsgrundlage für das Gutachten,
- ▶ die Qualität/Validität der Antworten unterschied sich je nach Themenbereich,
- ▶ über ein Drittel der Teilnehmenden (etwa 20) waren bereit, sich interviewen zu lassen.

Es zeigte sich, dass mit jeweils 30 beziehungsweise 32 Antworten die beiden technischen Themenbereiche Fahrzeug und Fahrweg eine sehr repräsentative Antwortquote aufwiesen. Der

Themenbereich Unternehmensorganisation und Wettbewerb war mit 11 Antworten ebenfalls noch repräsentativ. Wohingegen dem Themenbereich rechtliche Fragestellungen mit sechs Reaktionen lediglich Hinweise zu entnehmen sind.

1.3.3 Expertinnen- und Experteninterviews

Ziel der Expertinnen- und Experteninterviews war es, vertiefte Informationen über einzelne Themenstellung aus der Erfahrung heraus zu erhalten.

Die Interviews ermöglichten unter anderem qualitative Bewertungen von Ja/Nein-Fragen im Rahmen der Online-Umfrage. Zum Beispiel: „Ja, wir haben Lärmprobleme an Kreuzungen. Aber es gibt deutlich mehr Beschwerden von Anwohnenden über Kurvenquietschen...“.

Besonders die folgenden Fragestellungen sollten durch die Erfahrungsberichte adressiert werden:

- ▶ Wird eine Lärminderung erreicht? Wenn ja: Hat das KVV nur weniger Beschwerden bekommen, oder sind auch Messungen durchgeführt worden?
- ▶ Welche Investitionen sind zur Umsetzung einer Maßnahme notwendig? Wie viel Zeit-, Material- und Personalaufwand wird bei Ihnen vor Ort für eine Maßnahme aufgebracht?
- ▶ Was war der Anlass für eine vorgenommene Maßnahme?
- ▶ Werden Schienen in ihrem Netz aus Lärminderungsgründen geschliffen? Mit welcher Technik, wie oft, mit welchem Fahrzeug?
- ▶ Wie stehen Sie zu technischen Überwachungssystemen auf Ihren Strecken?

Darüber hinaus wurden mit den Herstellenden Interviews zur Plausibilisierung von Kosten- und Aufwandsinformationen durchgeführt.

Weitere Institutionen wurden kontaktiert (z. B. die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin), um Aussagen über die politische Willensbildung zum vorliegenden Thema, zur verwaltungstechnischen Begleitung sowie zur aktuellen Rechtslage zu erhalten.

Darüber hinaus wurde der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) besucht und um Stellungnahmen zu rechtlichen Aussagen sowie zu Zwischenberichten gebeten.

2 Fahrzeuge, Fahrwege und akustische Grundlagen

2.1 Straßenbahnen und deren Bahnkörper

2.1.1 Fahrzeuge der Straßenbahnen

Gemäß Definition im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) handelt es sich bei Straßenbahnen um „*Schienenbahnen, die*

1. *den Verkehrsraum öffentlicher Straßen benutzen und sich mit ihren baulichen und betrieblichen Einrichtungen sowie in ihrer Betriebsweise der Eigenart des Straßenverkehrs anpassen oder*
2. *einen besonderen Bahnkörper haben und in der Betriebsweise, den unter Nummer 1 bezeichneten Bahnen, gleichen oder ähneln*

und ausschließlich oder überwiegend der Beförderung von Personen im Orts- oder Nachbarschaftsbereich dienen.“ (§ 4 Absatz 1 PBefG)

Zur Gruppe der Straßenbahnen im Sinne des Gesetzes gehören „*auch Bahnen, die als Hoch- und Untergrundbahnen, Schwebbahnen oder ähnliche Bahnen besonderer Bauart angelegt sind oder angelegt werden, ausschließlich oder überwiegend der Beförderung von Personen im Orts- oder Nachbarschaftsbereich dienen und nicht Bergbahnen oder Seilbahnen sind.“ (§ 4 Absatz 2 PBefG)*

Straßenbahnen unterscheiden sich von Eisenbahnen. Charakteristische Eigenschaften der im Straßenbahnbetrieb eingesetzten Fahrzeuge sind (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 13):

- ▶ Eine Streckenhöchstgeschwindigkeit $v_{max} = 70$ km/h bei Fahren auf Sicht, bei Zugsicherung in Einzelfällen maximal 80 km/h. Bei Teilnahme am Straßenverkehr gilt generell die für den übrigen Straßenverkehr zulässige Höchstgeschwindigkeit.
- ▶ Fahrzeuge mit einer Länge zwischen ca. 20 m und 75 m beim Betrieb im Verkehrsraum öffentlicher Straßen (bei U-Bahnen auf unabhängigem Bahnkörper Fahrzeuge bis zu einer Länge von 120 m).
- ▶ Ausschließlicher Einsatz von Triebwagen mit elektrodynamischen Bremsen und zusätzlich mechanischen Scheibenbremsen.
- ▶ Verwendung von Vollrädern oder gummigefederten Rädern.
- ▶ Teils eine größere Anzahl hochliegender Schallquellen, da eine größere Anzahl Aggregate bei Niederflur-Fahrzeugen auf dem Dach liegen.
- ▶ Räder sind oftmals mit Schallabsorbern (= Radschallabsorber) mit dem vorrangigen Ziel ausgestattet, die Quietschgeräusche in Gleisbögen mit kleinen Radien zu mindern.
- ▶ Verstärkter Einsatz kleiner Räder bei Niederflur-Fahrzeugen.

Bei Niederflur-Fahrzeugen befinden sich die meisten schallabstrahlenden Aggregate auf dem Dach, bei Hochflur-Fahrzeugen unterhalb des Fahrzeugfußbodens.

2.1.2 Bahnkörper und Oberbau

Beim Bahnkörper wird unterschieden in straßenbündige, besondere und unabhängige Bahnkörper (vgl. § 16 Abs. 4 BOSTrab und Abbildung 1):

- ▶ „Straßenbündige Bahnkörper sind mit ihren Gleisen in Straßenfahrbahnen oder Gehwege“ eingebettet“.
- ▶ „Besondere Bahnkörper liegen im Verkehrsraum öffentlicher Straßen, sind jedoch vom übrigen Verkehrsraum mindestens durch Bordsteine, Hecken, Baumreihen oder andere ortsfeste körperliche Hindernisse getrennt. Zum besonderen Bahnkörper gehören auch Bahnübergänge, [...]“.
- ▶ „Unabhängige Bahnkörper befinden sich auf Grund ihrer Lage oder Bauart außerhalb des Verkehrsraums öffentlicher Straßen.“

Abbildung 1: Bahnkörper der Straßenbahn



Die Bilder zeigen: a) Straßenbündiger Bahnkörper mit Asphaltdeckung; b) Besonderer Bahnkörper als begrünter Bahnkörper mit tiefliegender Vegetationsebene; c) Unabhängiger Bahnkörper, Ausführung als Schottergleis
Quelle: VDV und VDV IndustrieForum e. V. 2014, S. 296, Fotos: Boenke

Der akustische Zustand von Fahrbahnen im Regelungsbereich der BOSTrab wird, neben den unterschiedlichen Bahnkörperarten, gekennzeichnet durch:

- ▶ Fahren auf Rillenschienen und rillenlosen Schienen (Vignolschienen).
- ▶ Teilweise sehr raue Schienenfahrflächen infolge Überfahrten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) sowie Lkw und Bussen, den Einsatz von Brems sand sowie Schmutzeintrag (z. B. Staub, Splitt, Salz); dies gilt überwiegend für in Straßenfahrbahnen eingebettete Gleise (Abbildung 1a).
- ▶ Unterschiedlichen Pflegezustand der Gleise.
- ▶ (Regelmäßiges) Schleifen der Schienenfahrflächen, in der Regel durch Fahrzeuge mit Rutschersteinen.
- ▶ Begrünte Bahnkörper in unterschiedlichen Ausführungen (Vegetationsebene hochliegend/tiefliegend).
- ▶ Teilweise sehr weiche Schienenlagerungen zur Minderung der Erschütterungsemissionen. Bei offenliegenden Schienen kann dies jedoch zu einer höheren Schallabstrahlung führen.

2.2 Akustische Grundlagen beim Straßenbahnverkehr

2.2.1 Schall

Mit Schall werden mechanische Schwingungen und Wellen in einem elastischen Medium (Luft, Festkörper, Flüssigkeit) im Hörbereich eines Menschen bezeichnet. Die Wahrnehmung von Luftschall ist vom Hörbereich (Frequenzbereich) des Menschen abhängig. Bei jungen Menschen liegt dieser Hörbereich in der Regel zwischen etwa 16 Hz und 20 kHz, mit zunehmendem Alter nimmt die obere Grenzfrequenz ab. Unter folgenden Bedingungen tritt hörbarer Luftschall auf (vgl. Krüger 2016):

- ▶ Wenn ein Körper vorhanden ist, der zu Schwingungen angeregt werden kann, und auf diesen eine Kraft infolge einer Bewegung einwirkt (z. B. ein Rad auf einer Schiene) oder wenn auf den Körper Strömungskräfte einwirken (bedeutsam nur beim Hochgeschwindigkeitsverkehr, Aerodynamik),
- ▶ ein Medium zur Schallübertragung vorhanden ist (in diesem Fall Luft) und
- ▶ der erzeugte Schalldruckpegel einen bestimmten Wert überschreitet und im hörbaren Frequenzbereich liegt.

Weitere Schallquellen sind bei Straßenbahnen Lautsprecher und Warnsignale. Die hiervon ausgehenden Schallemissionen werden im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht betrachtet, da sie systemimmanent und somit nicht zu vermeiden sind (vgl. Krüger 2006a, S. 44).

Zur Beurteilung der Schallemissionen und -immissionen aus dem Straßenbahnverkehr wird die A-Bewertung herangezogen. Die A-Bewertung beschreibt näherungsweise das menschliche Hörempfinden von Schall für unterschiedliche Frequenzen (tiefe Frequenzen werden weniger stark wahrgenommen als höhere Frequenzen).

Zur Bewertung von Schienenverkehrs-Außengeräuschen werden vorrangig

- ▶ der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$ (= Mittelungspegel $L_{pAm,T}$) mit T = Messdauer,
- ▶ der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$ (= Mittelungspegel $L_{pAm,Tp}$) mit T_p = Vorbeifahrtzeit des Fahrzeugs (mit $T_p < T$ bei einer Vorbeifahrt) sowie
- ▶ der AF-bewertete maximale Schalldruckpegel L_{pAFmax} und der daraus gebildete mittlere Maximalpegel $L_{pAFmax,m}$

herangezogen (vgl. DIN EN ISO 3095).

In der DIN 38452-1 soll zusätzlich der TEL-Pegel (Transit Exposure Level) zur Beschreibung der Schallemission herangezogen werden (E DIN 38452-1).

Beim Befahren von Gleisbögen, Weichen und Kreuzungen können tonhaltige und impulshaltige Geräusche auftreten. Zu deren Bewertung gelten zusätzliche Messgrößen (z. B. nach VDV-Schrift 154 (VDV 2011b) und DIN EN ISO 3095).

2.2.2 Lärm

Bei „Lärm“ handelt es sich nicht um eine physikalische Größe, sondern um ein subjektives, negatives Empfinden infolge einer Einwirkung von Schall. Hierzu zählen z. B.

gesundheitsschädigende, leistungsmindernde, unerwünschte und störende Schallereignisse im Hörbereich eines Menschen. Demnach wird ein objektiv messbares Schallereignis individuell bewertet. Lärmempfinden ist somit stark subjektiv geprägt und hängt u. a. auch von der Hörfähigkeit eines Menschen ab. Beeinträchtigungen von Lärm werden durch medizinische, physiologische oder soziologische Befunde beschrieben (vgl. VDI 3722 Blatt 1).

In der VDI 3722 Blatt 1 werden die Unterschiede von Eisenbahn- und Straßenverkehrsgeräuschen genannt. Eisenbahngeräusche sind demnach gekennzeichnet durch:

- ▶ Wenige Einzelschallquellen, längere Dauer der Einzelschallereignisse und längere Geräuschpausen,
- ▶ höhere Maximalpegel im Vergleich zum Mittelungspegel,
- ▶ andere Frequenzzusammensetzung.

Diese Beschreibung gilt sinngemäß auch für von Straßenbahnen verursachten Geräusche.

Die genannten Unterschiede zwischen Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen wurden durch eine Pegelkorrektur zur Berücksichtigung der geringeren (subjektiven) Störwirkung der durch den Eisenbahnverkehr verursachten Schallimmissionen berücksichtigt und führten zur Einführung des sogenannten Schienenbonus in der 16. BImSchV von 1990. Dieser Schienenbonus ist für die Eisenbahnen mit Wirkung ab dem 1. Januar 2015 und für Straßenbahnen ab dem 1. Januar 2019 nicht mehr anzusetzen (vgl. Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

2.2.3 Ausbreitung von Schall und Erschütterungen beim Schienenverkehr

Die Quellen und die Übertragungswege, die zu den genannten Immissionen beim Schienenverkehr führen, zeigt Abbildung 2. Es werden die folgenden drei Bereiche unterschieden:

1. Emission: Der Bereich, in dem eine Anregung stattfindet und Schall und Schwingungen in die Umgebung (Luft, Boden) eingeleitet werden. Streng genommen handelt es sich hier um jeweils die einzelne Schallquelle (z. B. Aggregat, Rad, Schiene). In der Praxis werden jeweils ein Punkt im Nahbereich des Gleises als Emissionspunkt herangezogen und somit mehrere Teilquellen zur Gesamtemission zusammengefasst. Dabei bestimmt die dominante Schallquelle den Emissionspegel.
Der Emissionspunkt für den Luftschall wurde wie folgt festgelegt: 7,5 m Abstand von Gleismitte und 1,2 m (3,5 m) über Schienenoberkante (vgl. DIN EN ISO 3095). Für Erschütterungen gilt ein Punkt im Boden im Abstand von 8,0 m von Gleismitte (vgl. DIN 45672-1).
2. Transmission: Der Bereich, in dem sich Schall und Erschütterungen von der Quelle (Emissionspunkt) zum Empfänger ausbreiten.
Der Schall breitet sich in der Luft aus. Er nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab – in der Regel um 3 dB bis 6 dB bei Abstandsverdopplung. Beeinflusst wird die Schallausbreitung vorrangig durch die Art der Quelle (Punktquelle oder Linienquelle), durch Witterungsverhältnisse, z. B. Windrichtung und -stärke oder Schnee, und durch Reflexionen des Bodens und der Gebäude sowie durch Luftabsorption und Abschirmung durch Hindernisse.
Erschütterungen breiten sich im Boden aus (DIN 4150-1). Hinsichtlich Quelle und Entfernung gelten ähnliche Gesetzmäßigkeiten wie beim Schall. Da der Boden in der Regel aber nicht so homogen wie die Luft ist, sind hier die Ausbreitungsverhältnisse deutlich

komplexer und nicht so einfach wie bei der Schallausbreitung in der Luft zu beschreiben. In Abbildung 2 sind z. B. folgende, die Ausbreitung im Boden beeinflussende Komponenten dargestellt: Bodenschichten, Grundwasserstand, Abflusskanal).

3. Immission: Bereiche, in denen Luftschall und Körperschall (Erschütterungen und Sekundärschall) wahrgenommen und beurteilt werden. In der 16. BImSchV sind für den Luftschall folgende Immissionsorte (Einwirkungsorte) festgelegt:
 - a. Bei Gebäuden in Höhe der Geschossdecke (0,2 m über Fensteroberkante) auf der Fassade der zu schützenden Räume und
 - b. bei Außenwohnbereichen 2,0 m über der Mitte der als Außenwohnbereich genutzten Fläche

Für die Schallübertragung in die Gebäude sind die Festlegungen der Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung (24. BImSchV) heranzuziehen.

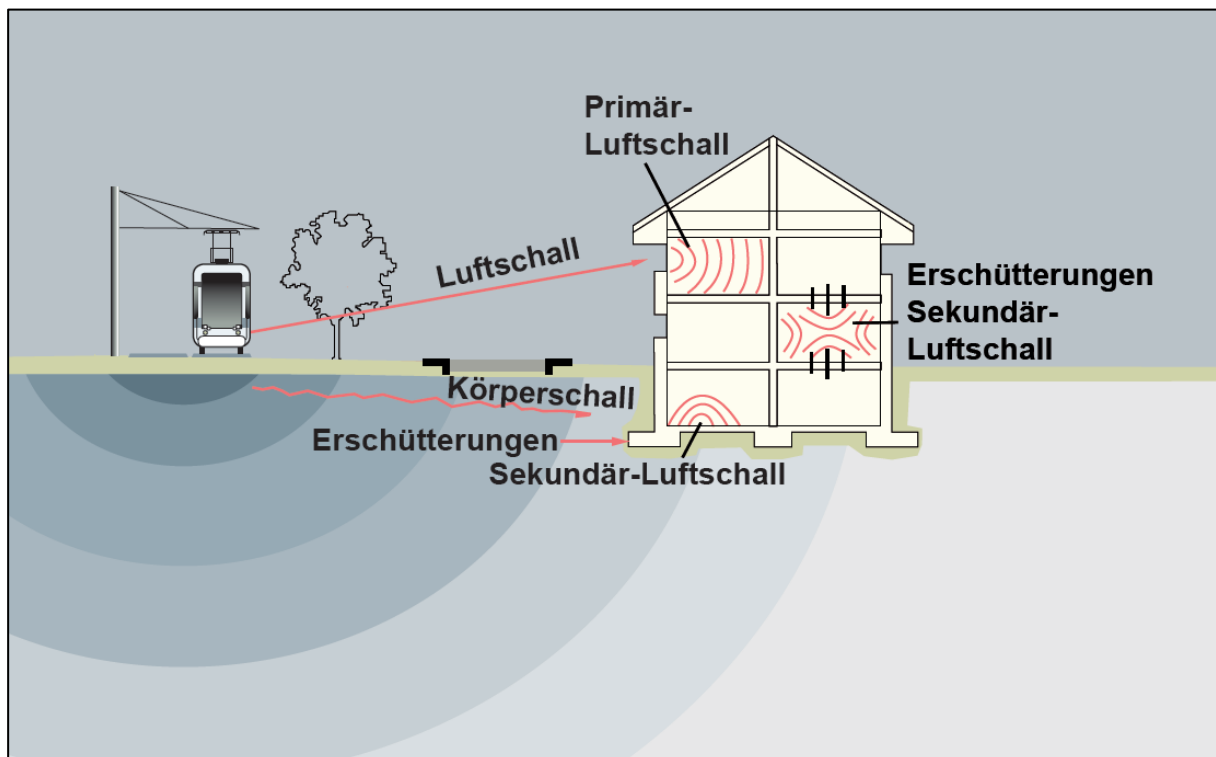
Erschütterungsimmissionen werden messtechnisch auf den Fußböden in ungefährender Raummitte erfasst und nach DIN 4150-2 beurteilt.

Sekundärschallimmissionen (d. h. Schallabstrahlung der Raumbegrenzungsflächen) werden ebenfalls in Raummitte in ca. 1,2 m Höhe über dem Fußboden messtechnisch erfasst und bewertet. Zur Bewertung werden derzeit unterschiedliche Regelwerke herangezogen, z. B. die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

Neben der messtechnischen Erfassung existieren zur Ermittlung von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen auch verschiedene Prognoseansätze, die eine Abschätzung der zu erwartenden Immissionen im Planungszustand ermöglichen (siehe z. B. VDI 3837, ISO 14837-1).

Abbildung 2: Darstellung der durch den Straßenbahnverkehr verursachten Luftschall- und Erschütterungsemissionen

Darstellung inklusive Ausbreitung (Transmission) und Wahrnehmungsorten (Immission)



Quelle: VDV 2019, S. 22, bearbeitet: STUVA

2.2.4 Wahrnehmung von Schall und Erschütterungen beim Schienenverkehr

Beim Straßenbahnverkehr können im Wesentlichen folgende Arten von Immissionen unterschieden werden (vgl. Krüger 2000):

- ▶ **Direktschall (Primärschall):** Die Übertragung des Direktschalls erfolgt durch die Luft. Der Direktschall weist einen dominanten Frequenzbereich von 25 Hz bis 10 kHz auf. Direktschall setzt sich vorrangig aus Rollgeräuschen, Kurven-, Brems- und Aggregatgeräuschen sowie dem Schall aus aero-akustischen Quellen zusammen. Aero-akustische Geräuschquellen (Strömungsgeräusche) spielen im Straßenbahnverkehr mit geringen maximalen Geschwindigkeiten keine Rolle (vgl. Abschnitt 2.1).
- ▶ **Sekundärschall, verursacht durch den Körperschall:** Der von Straßenbahnen ausgehende, tieffrequente Körperschall wird durch den Oberbau, Unterbau, Tunnel oder Brücken, den umgebenden Boden und die Gebäudewände in die jeweiligen Räume eines Gebäudes übertragen. Decken und Wände werden somit durch die vorbeifahrenden Züge angeregt und strahlen Luftschall ab. Der durch die Straßenbahnen in Gebäude übertragende Körperschall und der daraus entstehende Sekundärschall umfasst in der Regel einen Frequenzbereich zwischen ca. 16 Hz und 160 Hz, in Ausnahmefällen bis etwa 350 Hz.
Anmerkung: Oft wird auch der Sekundärschall als Körperschall bezeichnet, da er unmittelbare Folge des Körperschalls der angeregten Raumbegrenzungsflächen (Fußboden, Decke, Wände) ist. Der Körperschall wird jedoch mit Körperschallaufnehmern (Schwing-Beschleunigungs-Aufnehmer oder Schwing-Geschwindigkeitsaufnehmer) und der Sekundärschall mit Mikrofonen erfasst und entsprechend dargestellt. Schallabstrahlung von angeregten Inneneinrichtungen, z. B. Glasvitritten, Geschirr usw., werden nicht als Sekundärschall bezeichnet.
- ▶ **Erschütterungen:** Erschütterungsimmissionen treten ebenfalls nur innerhalb von Gebäuden auf. Es handelt sich um tieffrequente Schwingungen der Gebäudefußböden. Der Übertragungsweg verläuft analog zum Körperschall. Der Frequenzbereich hierfür liegt zwischen 1 Hz und 80 Hz (DIN 4150-2).

Der im Innenraum durch vorbeifahrende Straßenbahnen übertragende Schall hängt von zahlreichen lokalen Faktoren ab: Hierzu gehören z. B. die Schallschutzklasse der Fenster, mit oder ohne Rollläden, die Stellung der Fenster (offen oder geschlossen), die Art der Möblierung sowie der Fußbodenart und der Gardinen. Die Wahrnehmung und Bewertung des Schalls durch die betroffene Person hängt u. a. von der aktuellen „Situation“ ab, in der er/sie sich befindet: Ausübung handwerklicher oder geistiger Arbeiten, Lesen, Fernsehen, Gespräche führen, Einschlafen usw. Da Straßenbahnen i. d. R. zwischen ca. vier Uhr morgens und ein Uhr in der Nacht verkehren, gibt es immer wieder Phasen, in denen die Schallimmissionen besonders deutlich wahrgenommen werden. Sowohl in Abhängigkeit von der Pegelhöhe und der Frequenz als auch von der Hörfähigkeit des Menschen, wird der wahrgenommene Schall als „störend“ oder als „nicht störend“ bewertet (vgl. Abschnitt 2.2.2).

2.3 Schallpegelgrößen

2.3.1 A-Frequenz-Bewertung, Beurteilungspegel und Lärmindex

Vom menschlichen Ohr wird Schall frequenzabhängig wahrgenommen. Um diesen Effekt bei der Ermittlung eines für eine Bewertung oder zur Festlegung von Grenzwerten benötigten Schallpegels angemessen zu berücksichtigen, wurde weltweit einheitlich die A-Bewertung eingeführt. Diese wirkt sich im Terzpegelspektrum wie folgt auf den unbewerteten Schalldruckpegel aus:

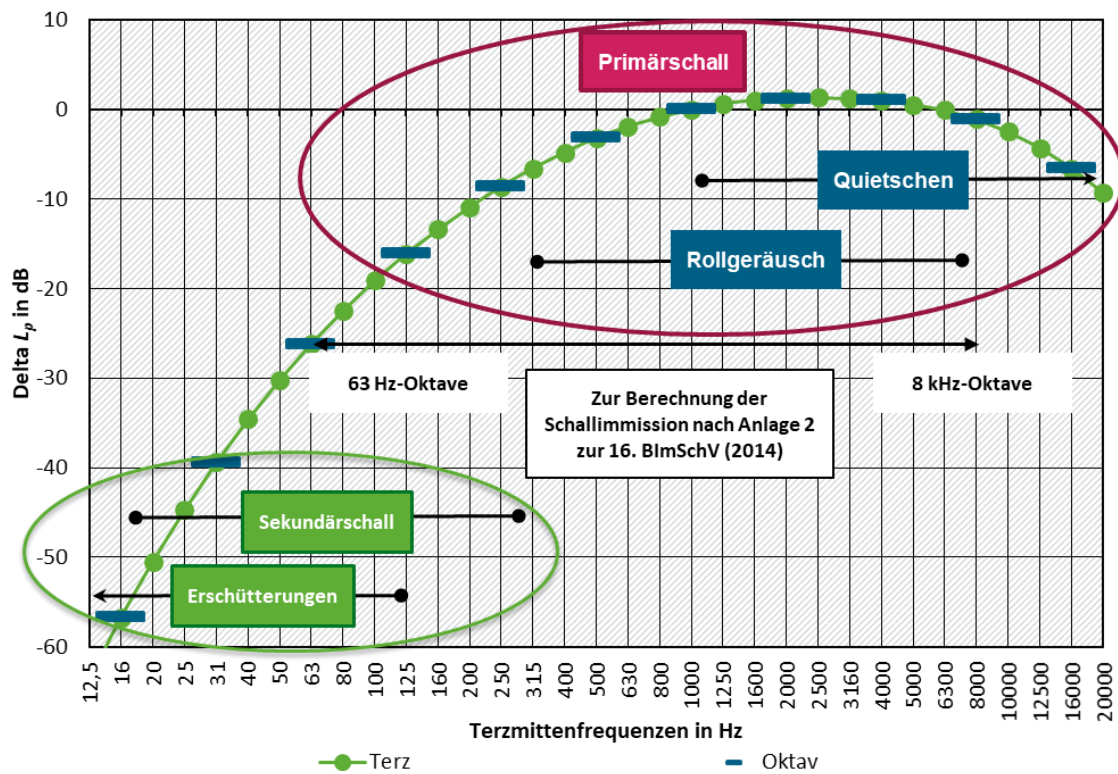
- ▶ Dämpfung der Terzpegel zwischen 44,7 dB bei 25 Hz und 0,8 dB bei 800 Hz,
- ▶ keine Bewertung bei 1.000 Hz,
- ▶ Anhebung der Terzpegel um 0,6 dB bei 1.250 Hz und um 0,5 dB bei 5.000 Hz. Die maximale Anhebung in diesem Frequenzbereich beträgt 1,3 dB bei 2.500 Hz.
- ▶ Dämpfung der Terzpegel zwischen 0,1 dB bei 6.300 Hz und 9,3 dB bei 20.000 Hz.

Zur Kennzeichnung eines so bewerteten Schalls wird der Index „A“ verwendet, z. B. L_{pA} (Schalldruckpegel am Emissionsort, A-bewertet). Oft wird ein A-bewerteter Schall auch durch dB(A) gekennzeichnet (ist nicht normgerecht). Abbildung 3 zeigt, neben der A-Bewertung, die dominanten Frequenzbereiche für die verschiedenen auftretenden Immissionen aus dem Schienenverkehr: Primärer Luftschall, Sekundärer Luftschall, Erschütterungen sowie den für die Berechnung der primären Luftschallimmissionen nach Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV verwendeten Frequenzbereich. Die Schallimmissionsberechnung erfolgt nach dieser Verordnung für die Oktaven von 63 Hz bis 8 kHz.

Um die Wirkung der A-Bewertung auf ein gemessenes Schalldruckpegelspektrum zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 4 beispielhaft ein unbewertetes Spektrum und ein bewertetes Spektrum für die Terzen von 25 Hz bis 20 kHz. Die entsprechenden Summenpegel betragen für das unbewertete Spektrum 81,7 dB und für das A-bewertete Spektrum 71,4 dB(A). Das zugrundeliegende Luftschallsignal gilt für eine Messung in 7,5 m Abstand von Gleismitte an einer U-Bahnstrecke. Die Geschwindigkeit der Bahn beträgt ca. 70 km/h.

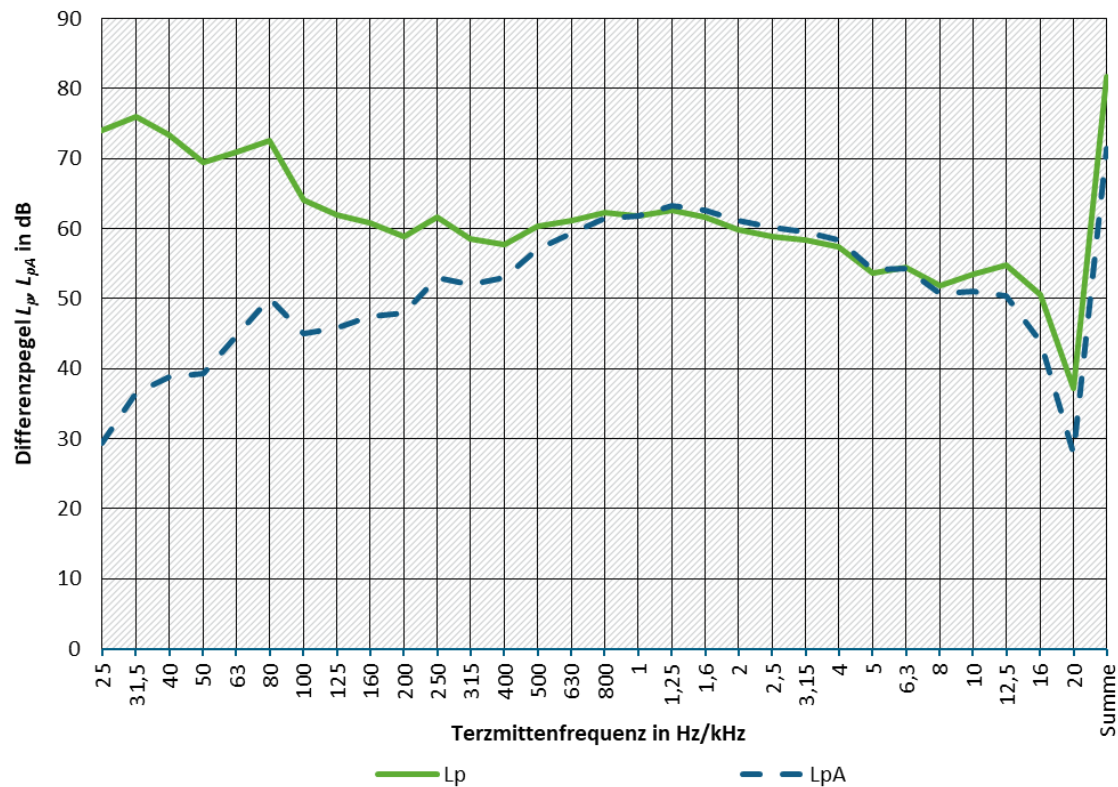
In Abbildung 5 sind die Bewertungskurven A und C dargestellt. Unterhalb der 630 Hz-Terz weichen die beiden Bewertungskurven deutlich voneinander ab. Mit der C-Bewertung werden demnach Schalle unterhalb dieser Frequenz deutlich anders (höher) bewertet als mit der A-Bewertung. In der Diskussion ist die C-Bewertung für den in Gebäuden auftretenden Sekundärschall (Abbildung 3). Derzeit gibt es aber keine Bewertungsgrößen (Grenzwerte, Anhaltswerte) für die vom Schienenverkehr verursachten Schallimmissionen für eine C-Bewertung, daher wird im Folgenden hierauf nicht näher eingegangen.

Abbildung 3: A-Bewertung und dominante Frequenzbereiche für verschiedene Immissionsarten



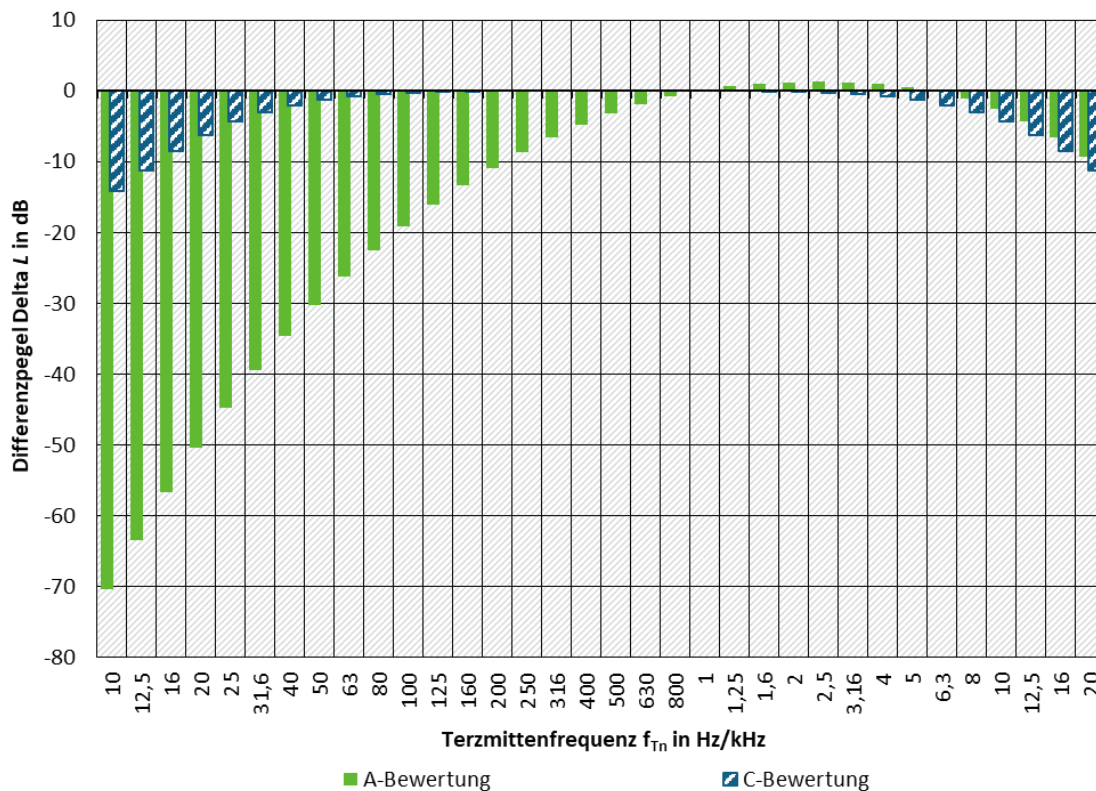
Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Abbildung 4: Beispiel für die Wirkung der A-Bewertung auf ein unbewertetes Terzspektrum



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Abbildung 5: Gegenüberstellung der A- und C-Bewertungskurven



Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 266

Der Schalldruckpegel L_p ist der Effektivwert (d. h. quadratischer Mittelwert) des Schalldrucks p , der auf den Schalldruck-Bezugswert p_0 der menschlichen Hörschwelle bezogen und in Dezibel angegeben wird.

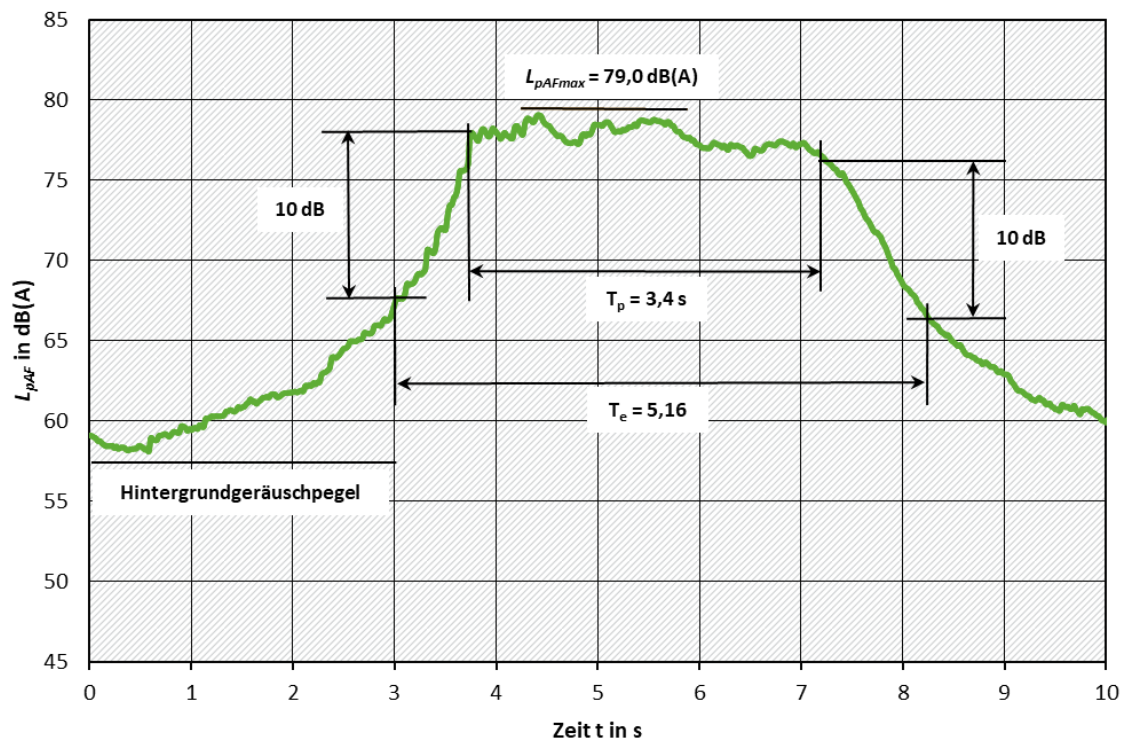
2.3.2 Maximalpegel

Das Schallereignis einer Zugvorbeifahrt wird in der Regel frequenz- und zeitbewertet dargestellt. Zur Frequenzbewertung wird die oben beschriebene A-Bewertung herangezogen, zur Zeitbewertung wird der gleitende Effektivwert mit der Zeitkonstanten $\tau = 0,125$ s (fast, schnell) verwendet (DIN 1320). Der so ermittelte Pegelverlauf wird mit $L_{pAF}(t)$ beschrieben. Der Maximalwert des Zeitsignals stellt den Maximalpegel L_{pAFmax} in dB(A) dar (DIN EN ISO 3095).

Schall, der nicht durch Zugvorbeifahrt verursacht wird, nennt man Hintergrundgeräusch, Grundgeräusch oder Umgebungsgeräusch.

Abbildung 6 zeigt den Schalldruckpegelverlauf $L_{pAF}(t)$ einer Straßenbahnvorbeifahrt. Der Maximalpegel L_{pAFmax} beträgt hierbei 79,0 dB(A), der Hintergrundgeräuschpegel liegt bei etwa 58 dB(A). Die Schallmessung erfolgte an einer geraden Strecke mit einem Schotteroberbau und einer mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit von ca. 62 km/h. Weitere Angaben zu Abbildung 6 werden unter Abschnitt 2.3.3 erläutert.

Abbildung 6: Beispiel für den Schalldruckpegelverlauf während einer Straßenbahnvorbeifahrt



Messung in 7,5 m Abstand von Gleismitte in 1,2 m Höhe über der Schienenoberkante mit Angabe des Maximalpegels L_{pAFmax} und den unterschiedlichen Zeiten T_e (Expositionszeit) und T_p (Vorbeifahrtzeit der Straßenbahn) zur Ermittlung von Mittelungspegeln.

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

2.3.3 Mittelungspegel

Schallpegel sind in der Regel in ihrem zeitlichen Verlauf veränderlich (vgl. Abbildung 6). Der Mittelungspegel berücksichtigt diese Veränderungen, da in ihm Stärke und Dauer jedes Teilgeräusches während eines definierten Zeitraums eingehen. Mittelungspegel werden für verschiedene Ereignisse und Zeiten angegeben. Nach DIN EN ISO 3095 wird der Mittelungspegel einer Zugvorbeifahrt mit $L_{pAeq,T}$ beschrieben. Der Index „eq“ bedeutet „äquivalent“ (gleichwertig, entsprechend). Der äquivalente Mittelungspegel entspricht der gemittelten Schallenergie über die Zeit.

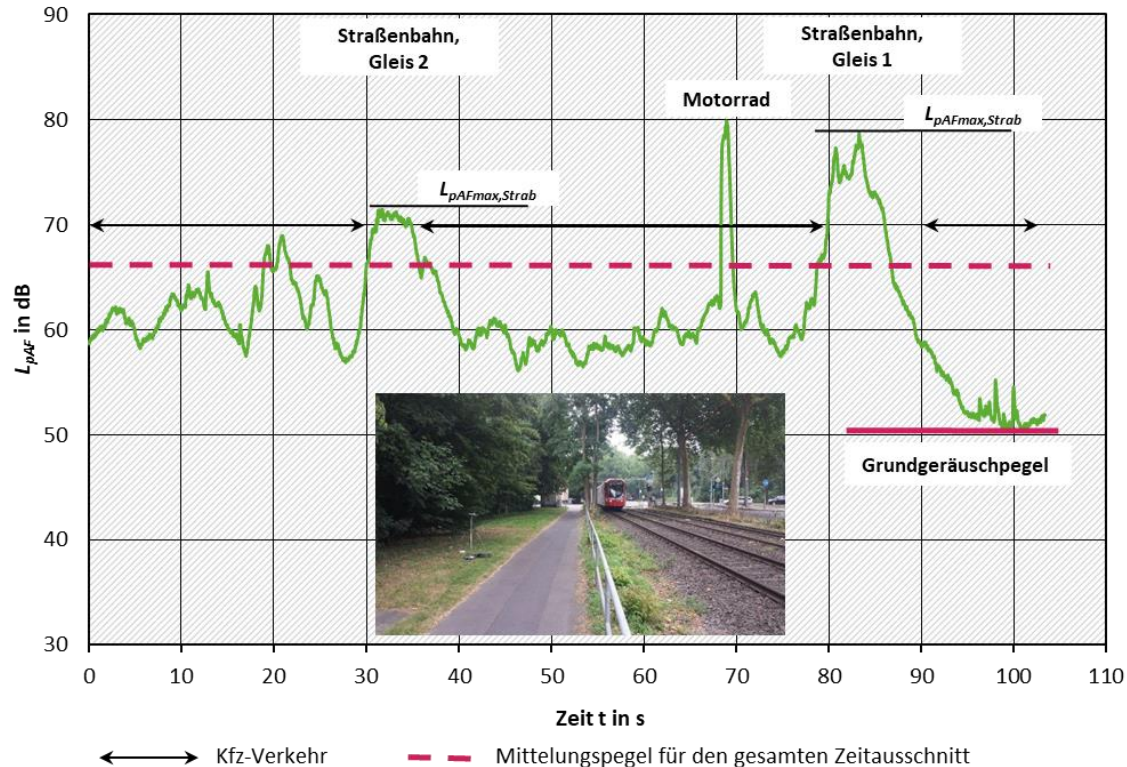
Bei Darstellung von Maximal- oder Mittelungspegeln ist zu beachten, welche Zeit- und Frequenzbewertung zu deren Ermittlung vorgenommen worden ist. Je nach angewandter Bewertung ergeben sich unterschiedliche Pegelwerte. Daher ist es immer unbedingt erforderlich genau zu beschreiben, welche Bewertungen den dargestellten Schallpegeln zugrunde liegen. Beim Mittelungspegel ist auch die Mittelungszeit mit anzugeben.

Beispielhaft ist in Abbildung 7 der Zeitverlauf $L_{pAF}(t)$ einer Schallpegelaufzeichnung an einer Straßenbahnlinie mit daneben liegender Straße dargestellt. Bei der Schallmessung fuhr das Fahrzeug auf Gleis 1 (in der Abbildung linkes Gleis) und die Schallaufzeichnung erfolgte in ca. 7,5 m Abstand zur Mitte von diesem Gleis (links vom Radweg) in ca. 1,2 m Höhe über der Schienenoberkante. In Tabelle 1 sind zusammenfassend die wesentlichen Schallpegel Maximalpegel (L_{pAFmax}) und Mittelungspegel ($L_{pAeq,T}$) mit unterschiedlichen Mittelungszeiten T für das in Abbildung 7 dargestellte Schallereignis enthalten (Pegelbezeichnungen siehe Abbildung 6).

Um den Unterschied zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel deutlich zu machen, ist in Abbildung 7 auch der Mittelungspegel für das gesamte dargestellte Zeitsignal als rot gestrichelte Linie dargestellt.

Abbildung 7: Darstellung des Schalldruckpegels $L_{pAF}(t)$ von unterschiedlichen Verkehrsgeräuschen

Straßenbahn- und Kfz-Verkehr sowie Grundgeräuschpegel (d. h., Pegel vom Hintergrundgeräusch oder Umgebungsgeräusch).



Die Pegelspitze von 79,9 dB(A) bei ca. 68 s ist auf die Geräuschemission durch ein Motorrad zurückzuführen.

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Das Messergebnis für Gleis 2 ist deutlich geringer als für Gleis 1. Die Schallmessungen erfolgten alle an demselben Messpunkt, daher sind die Abstände zu den drei Quellen Straße, Gleis 2 und Gleis 1 unterschiedlich.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Schallpegel für zwei Straßenbahnvorbeifahrten in Relation zum Straßenverkehr

Schallpegel für das in Abbildung 7 dargestellte Schallereignis (eine Straßenbahnvorbeifahrt auf je einem Gleis auf besonderem Bahnkörper und Kfz-Verkehr)

Wert	Einheit	gesamtes Schallergebnis $T = T_{gesamt}$	nur Kfz $T = T_{Kfz}$	Straßenbahn Gleis 2 $T = T_p$	Straßenbahn Gleis 1 $T = T_p$
L_{pAFmax}	dB(A)	79,9	79,9	71,5	78,7
$L_{pAeq,T}$	dB(A)	66,3	71,1	70,6	76,0
Pegeldifferenz	dB(A)	13,6	8,8	0,9	2,7

Auf Gleis 1 waren „Störstellen“ im Gleis vorhanden, woraus sich der stark schwankende Schalldruckpegel und der große Pegelunterschied (2,7 dB) zwischen Maximalpegel L_{pAFmax} und Mittelungspegel $L_{pAeq,Tp}$ ergibt. Das andere Gleis war weitgehend frei von solchen „Störstellen“, daher ergibt sich hier ein Unterschied zwischen diesen beiden Pegeln von nur 0,9 dB. In der VDV-Schrift 154 (VDV 2011b) wird zur Abschätzung des Vorbeifahrtmittelungspegels $L_{pAeq,Tp}$ aus dem einfach zu messenden Maximalpegel L_{pAFmax} folgende Gleichung (Gl. 7) angegeben:

$$L_{pAeq,Tp} = L_{pAFmax} - 1dB \quad (\text{Gl. 1})$$

Der Straßenverkehr war während der Schallaufzeichnung geprägt von Vorbeifahrten verschiedener Kraftfahrzeuge (Pkw, Lkw, Busse und Motorräder). Zu beachten ist, dass die Abstände zwischen den verschiedenen Schallquellen (Fahrspuren auf der Straße sowie Gleis 1 und Gleis 2) und der Schallaufzeichnung unterschiedlich waren. Andererseits repräsentiert der dargestellte Schallpegel die Schalleinwirkung auf eine am Messort stehende Person.

2.3.4 Beurteilungspegel

In der DIN 45645-1 wird der Beurteilungspegel L_r allgemein wie folgt definiert: „Maß für die Stärke der Schallbelastung innerhalb der Beurteilungszeit T_r . Der Beurteilungspegel setzt sich zusammen aus dem äquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} (= energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{pAeq,T_r}) und Zuschlägen.“. Beurteilungspegel L_r (engl. rating level) ist ein Einzahlkennwert für die mittlere Immission von Geräuschen während einer festgelegten Beurteilungszeit.

Hinsichtlich des Beurteilungspegels für die Schallimmissionen aus dem Schienenverkehr ist zu unterscheiden zwischen Festlegungen in der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) und der Umgebungslärmrichtlinie (RL 2002/49/EG):

a) Verkehrslärmschutzverordnung – Beurteilungspegel für Straßenbahnen

An einem Immissionsort, der durch Geräusche von einer Strecke für Straßenbahnen betroffen ist, wird der Beurteilungspegel getrennt für den Beurteilungszeitraum Tag (6 Uhr bis 22 Uhr) (Gl. 2) und den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) wie folgt berechnet (Gl. 7):

$$L_{r,Tag} = L_{p,Aeq,Tag} = 10 \lg \left(\frac{1}{16} \sum_{T=1}^{16} 10^{0,1L_{p,Aeq,T}} \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$L_{r,Nacht} = L_{p,Aeq,Nacht} = 10 \lg \left(\frac{1}{8} \sum_{T=1}^8 10^{0,1L_{p,Aeq,N}} \right) \quad (\text{Gl. 3})$$

b) Umgebungslärmrichtlinie

In dieser Richtlinie wird ein Ganztageswert und ein Nachtwert zur Schallbeurteilung herangezogen.

Der Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{den} (Ganztageswert)¹ ist wie folgt definiert (Gl. 7):

$$L_{den} = 10 \lg \frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) dB. \quad (\text{Gl. 4})$$

Hierbei gilt:

¹ Der Index „den“ steht für „day, evening, night“ (Tag, Abend, Nacht).

- ▶ L_{day} ist der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel gemäß ISO 1996-2, wobei der Beurteilungszeitraum ein Jahr beträgt und die Bestimmungen an allen Kalendertagen am Tag (06:00 – 18:00 Uhr) erfolgen.
- ▶ $L_{evening}$ ist der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel gemäß ISO 1996-2, wobei der Beurteilungszeitraum ein Jahr beträgt und die Bestimmungen an allen Kalendertagen am Abend (18:00 – 22:00 Uhr) erfolgen.
- ▶ L_{night} ist der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel gemäß ISO 1996-2, wobei der Beurteilungszeitraum ein Jahr beträgt und die Bestimmungen an allen Kalendertagen in der Nacht (22:00 – 06:00 Uhr) erfolgen.

Beim Schienennahverkehr werden Zuschläge für besondere Geräusche bzw. Geräuschquellen nach (Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV) für

- ▶ Kurvengeräusche,
- ▶ Geräusche beim Fahren auf Weichen und Kreuzungen,
- ▶ Geräusche beim Fahren auf Brücken und Viadukten sowie
- ▶ unterschiedliche Geräuschemissionen der verschiedenen Fahrbahn- und Fahrzeugarten berücksichtigt.

Kurzzeitige Impulsgeräusche, die z. B. bei Weichenüberfahrten auftreten, haben auf den Vorbeifahrt-Mittelungspegel nahezu keinen Einfluss.

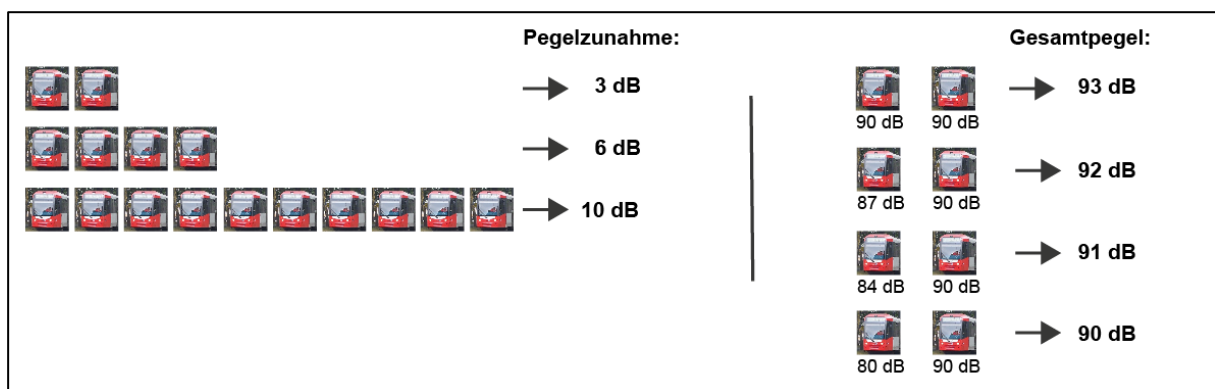
2.4 Schallausbreitung und Einfluss dominanter Quellen

Der Abstand zwischen der Geräuschquelle und dem Immissionsort hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den Schalldruckpegel am Immissionsort: Je kleiner dieser Abstand ist, desto größer der Immissionspegel und folglich auch der Beurteilungspegel. Der Schallpegel nimmt bei Verdopplung des Abstands von der Quelle zwischen 3 dB und 6 dB ab. Wesentlich für die Schallpegelabnahme ist, ob die Quelle als Punktschallquelle (Abnahme um 6 dB bei Abstandsverdopplung) oder Linienschallquelle (Abnahme um 3 dB bei Abstandsverdopplung) wirkt. Bei einer Vorbeifahrt wirken im Nahbereich die einzelnen Radsätze/Drehgestelle weitgehend als Punktschallquellen, im Fernbereich dagegen das gesamte Fahrzeug als Linienschallquelle. Bei haltenden Fahrzeugen sind nur Punktschallquellen, z. B. die Klimaanlage, vorhanden.

Die Schallpegelreduzierung hängt weiterhin von der Richtcharakteristik der Schallquelle, der Schallabsorption in der Luft, der Beschaffenheit des Bodens und vor allem von der „Verteilung“ der Schallenergie auf eine mit zunehmender Entfernung von der Quelle größer werdende Fläche ab. Des Weiteren wird die Schallausbreitung durch Reflexionen an harten Oberflächen beiderseits des Gleises, z. B. Gebäude, beeinflusst. Durch Abschirmmaßnahmen, z. B. Schallschutzwände, kann die Schallausbreitung deutlich beeinflusst werden. Der Grundgeräuschpegel in Abbildung 6 und Abbildung 7 berücksichtigt die Umgebungsgeräusche – ohne Berücksichtigung der Geräusche einer Vorbeifahrt. Die Geräuschimmission beim Straßenbahnverkehr ist somit geprägt durch Umgebungsgeräusche, die, je nach Streckenlage, unterschiedlich laut sind, und durch die kurzzeitigen Vorbeifahrgeräusche einer Straßenbahn. An Verkehrsknotenpunkten mit mehreren Linien ist die Ruhephase oft nur recht kurz. Die

Immissionen können daher für Anwohnende als besonders störend empfunden werden. An solchen zentralen Punkten wirken auf den Immissionsort mehrere Schallquellen infolge gleichzeitiger Vorbeifahrt von Straßenbahnen ein. Die dadurch hervorgerufenen Schallpegel sind zu addieren (Abbildung 8). Aufgrund der logarithmischen Schallpegeladdition bzw. Schallpegelsubtraktion hat eine Minderung einer leiseren Quelle (bei Pegelunterschieden über 10 dB) nahezu keinen Einfluss auf die gesamte Schallemission. Eine Verminderung der Schallleistung (die von einer Schallquelle abgegebene Schallenergie, unabhängig vom Abstand) der lautesten Quelle wirkt sich dagegen nahezu eins zu eins auf die gesamte Schallemission der Straßenbahn aus.

Abbildung 8: Grafische Darstellung der Schallpegeladdition von mehreren gleich lauten oder unterschiedlich lauten Schallquellen



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Der oben beschriebene Zusammenhang hat Auswirkungen auf eine wirksame Minderung der Schallemission einer Straßenbahn. Das Gesamtgeräusch einer Straßenbahn setzt sich immer aus mehreren Einzelschallquellen zusammen. Für eine wirkungsvolle Schallminderung ist es daher immer erforderlich, zuerst die dominante(n) Schallquelle(n) zu identifizieren. Zum Beispiel hat eine wirkungsvolle, geräuschmindernde Maßnahme einer Einzelquelle mit niedriger Schallleistung nur eine geringe Auswirkung auf die gesamte Geräuschemission. Wird dagegen die dominante Schallquelle gemindert, dann wirkt sich das signifikant auf die Gesamtemission aus. Daher ist es unbedingt notwendig, die dominanten Schallquellen (z. B. Räder, Schienen, Antrieb, Klimaanlage, Lüfter usw.) ausfindig zu machen und die Schallleistung dieser Quellen zu mindern oder deren Schallausbreitung durch Abschirmmaßnahmen zu beeinflussen.

Daher müssen Schallquellen von Fahrzeugen und Fahrwegen immer in eine akustische Gesamtbewertung einbezogen werden. Für eine deutliche Minderung der Schallemissionen durch den Straßenbahnverkehr sind Maßnahmen am Fahrzeug und Fahrweg immer aufeinander abzustimmen (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a) bzw. in eine Gesamtbewertung einzubeziehen. In den Abschnitten 5.1 und 5.2 wird hierauf näher eingegangen.

2.5 Schallquellen beim Betrieb von Straßenbahnen (Direktschall)

2.5.1 Schallquellen an den Straßenbahnfahrzeugen

In Abschnitt 5.2 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV werden folgende Schallquellenarten genannt:

- ▶ Fahrgeräusche, verursacht durch
 - Rollgeräusche infolge Rauheiten an Rad- und Schienenfahrflächen und
 - Antriebsgeräusche (Motoren, Getriebe) sowie
- ▶ Aggregatgeräusche (Stromrichter, Kompressor, Klima- bzw. Lüftungsaggregate). Je nach Fahrzeugart (Niederflur-/Hochflurfahrzeug) sind die Aggregate unterflur oder auf dem Dach der Fahrzeuge angeordnet.

Das Befahren von Gleisbögen (Kurven), Kreuzungen und Weichen führt zu zusätzlichen Schallemissionen (quietschende, zischende und stoßartige Geräusche). Schallquellen aus dem Bereich Nutzendeninformation, z. B. Türschließenrichtungen und Lautsprecherdurchsagen, werden hier nicht näher betrachtet.

Den Schallpegelverlauf während des Beschleunigens einer Niederflurstraßenbahn zeigt Abbildung 9. Der Schall wurde außen vor einem Drehgestell gemessen. Diese Messungen erfolgten auf unterschiedlichen Gleisabschnitten: Schottergleis, begrünter Bahnkörper mit hochliegender Vegetationsebene, Gleis mit Asphalteindeckung. Für die Messungen wurde das Fahrzeug von 0 km/h auf ca. 70 km/h beschleunigt. Bei diesem (Niederflur-)Fahrzeug sind im Bereich der Drehgestelle keine weiteren Schallquellen im Stand vorhanden. Der Schallpegelverlauf beginnt bei dem Pegel, der durch die Umgebungsgeräusche verursacht wurde und nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu. Vorrangig wurden mit diesen Messungen die akustischen Einflüsse der unterschiedlichen Fahrwege und der Geschwindigkeitszunahme ermittelt. Die in Abbildung 9 dargestellten Schallpegelverläufe zeigen folgende Geschwindigkeitsabhängigkeit (Gl. 7):

$$L_{pAF}(v) \approx (18 - 22) \cdot \lg(v) \quad (\text{Gl. 5})$$

Die in Abbildung 9 dargestellten Gleichungen wurden aus den auf den drei Fahrbahnarten gemessenen Schallpegeln berechnet (Trendwerte). Der akustische Einfluss der Fahrbahnarten ergab bei diesen Messungen im Mittel folgendes Ergebnis:

- ▶ Schottergleis und begrünter Bahnkörper mit hochliegender Vegetationsebene sind etwa gleich laut;
- ▶ Asphaltgleis oberhalb von $v = 30 \text{ km/h}$ etwa 5 dB(A) bis 6 dB(A) lauter als die beiden anderen Fahrbahnarten. Dieser Wert korrespondiert gut mit den Werten aus Tabelle 15, Zeile 1 aus Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV.

Für den Vergleich der in Abbildung 9 dargestellten Schallpegel sind folgende Randbedingungen zu beachten:

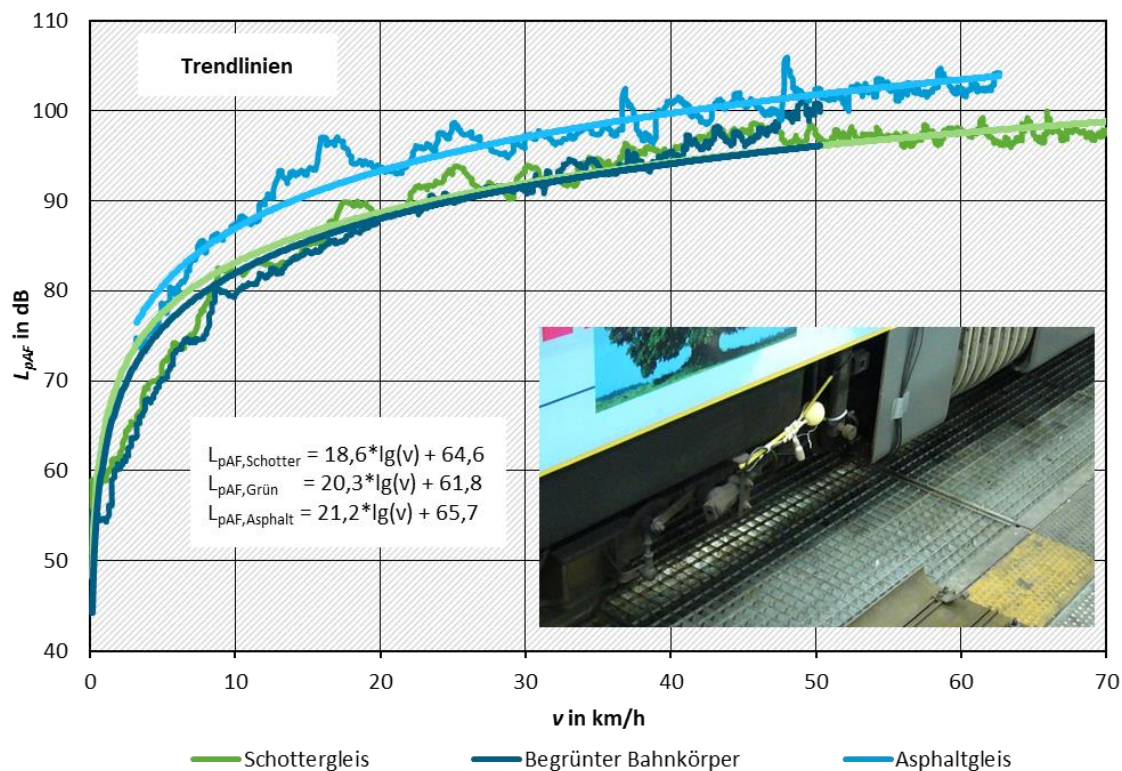
- Sowohl die Schienenrauheiten als auch die Gleisabklingraten wurden nicht erfasst. Es ist davon auszugehen, dass diese sowohl innerhalb einer Fahrbahnart, hierauf weisen die stark schwankenden Pegel in Abbildung 9 hin, als auch auf den drei befahrenen Streckenabschnitten unterschiedlich sind.

- Bei den Gleisen „Asphalt“ und „Grün“ sind Rillenschienen vorhanden, beim „Schottergleis“ rillenlose Schienen,
- Der Raum zwischen der reflektierenden Fahrbahnfläche und dem Mikrofon ist beim Schottergleis etwas größer als bei den beiden anderen Gleisen.

Trotz dieser Unterschiede spiegeln die Messergebnisse die reale Situation der jeweiligen Fahrbahnart und deren Zustand wieder (diese Hinweise gelten sinngemäß auch für die Abbildung 34 und Abbildung 35).

Bei Hochflurfahrzeugen sind Aggregate auch unter dem Fahrzeug angeordnet, daher ist auch im Stand bereits ein gewisser durch das Fahrzeug verursachter Schallpegel in diesem Fahrzeugbereich vorhanden. Die Schallpegel dieser Schallquellen können sowohl durch Schallmessungen im Drehgestellbereich (wie oben beschrieben) als auch durch Außengeräuschmessungen in 7,5 m Abstand von Gleismitte nach DIN EN ISO 3095 ermittelt werden. Werden diese Schallpegel miterfasst, dann folgt für das Außengeräusch in etwa ein gleichbleibender Schallpegel bis etwa 30 km/h und danach erst, anders als in Abbildung 9 dargestellt, eine Pegelzunahme mit steigender Geschwindigkeit (siehe auch Tabelle 14 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

Abbildung 9: Beispiel für Schallpegelverläufe in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Oberbauart im Bereich eines Drehgestells



Gemessen während des Beschleunigens eines Niederflurfahrzeugs auf verschiedenen Fahrwegarten, jeweils dasselbe Fahrzeug (Straßenbahn Karlsruhe, Typ GT6-70 D/N).

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Der bei den Messungen am Drehgestell ermittelte Schall ist drei Quellen zuzuordnen:

- ▶ Rollgeräuschen (vorwiegend Schallabstrahlung der Räder und Schienen),
- ▶ Antriebsgeräuschen vom Motor und Getriebe,
- ▶ Reflexionen von Fahrzeugteilen und dem Fahrweg.

Jedes Schallereignis, welches von einer Straßenbahn erzeugt wird, beinhaltet Frequenzanteile über einen weiten Frequenzbereich. Durch entsprechende Filter, z. B. Oktavfilter, lässt sich das Schallsignal in seine Frequenzanteile zerlegen. Die einzelnen Frequenzanteile können verschiedenen Quellen zugeordnet werden, sie tragen unterschiedlich stark zum Gesamtgeräusch bei. Um dies aufzuzeigen, wurden für den Anfahrbereich einer Fahrt auf einem Asphaltgleis beispielhaft Pegelzeitverläufe von Oktavspektren erstellt. Anstelle der Zeit wurden diese Spektren der Geschwindigkeit zugeordnet und hiervon wiederum Trendlinien berechnet. In Abbildung 10 sind diese und der hieraus ermittelte Summenpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt. Die Oktaven werden in dieser Abbildung als gestrichelte Linien, der Summenpegel als durchgezogene Linie präsentiert. In Anlehnung an Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV erfolgte diese Auswertung für die Oktaven² von 63 Hz bis 8 kHz (Abbildung 10). Deutlich zeigt diese Abbildung, dass die drei Oktaven 500 Hz, 1.000 Hz und 2.000 Hz die Schallemission auf geraden Streckenabschnitten dominieren. Eine untergeordnete Rolle spielt in dem Beispiel die 63 Hz-Oktave. Da niedrige Frequenzen (< 500 Hz) durch Schallschutzfenster weniger gemindert werden, können diese drei Oktaven (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz) für Schallimmissionen in Gebäuden jedoch durchaus eine Bedeutung haben. Eine ähnliche Aussage gilt auch für die abschirmende Wirkung durch Schallschutzwände (siehe hierzu Abschnitt 6.2 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

Die in Abbildung 10 dargestellten Pegelverläufe zeigen auch eine unterschiedliche Geschwindigkeitsabhängigkeit der einzelnen Oktaven. Diese Abhängigkeit (Zunahme der Schallpegel mit der Geschwindigkeit) nimmt tendenziell mit steigender Frequenz zu.

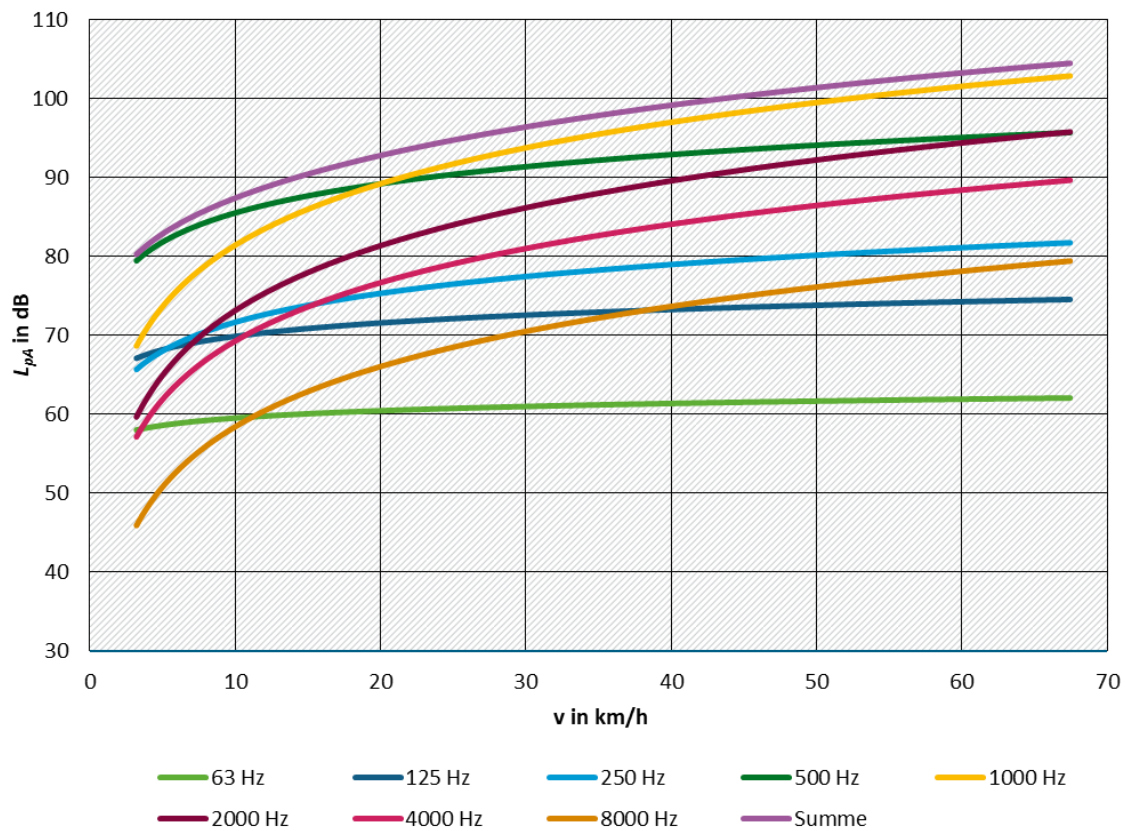
Abbildung 11 zeigt einen Überblick über die Anordnung möglicher Schallquellen bei Schienenfahrzeugen des Nahverkehrs. Heutzutage sind – je nach Netzausbau in den Städten – Hochflur- und/oder Niederflur-Straßenbahnen im Einsatz. Während bei Niederflur-Straßenbahnen der überwiegende Anteil von Bauteilen, von denen Schallemissionen ausgehen, bauartbedingt auf dem Fahrzeugdach liegt, ist ein Großteil der schall-emittierenden Aggregate bei Hochflur-Straßenbahnen unter dem Fahrzeugboden angeordnet. Aufgrund zunehmender Ausstattung der Straßenbahnen mit Klimaanlage nimmt aber auch bei Hochflurfahrzeugen die Anzahl der schallemittierenden Aggregate auf dem Fahrzeugdach zu.

Grundsätzlich unterscheiden sich Hoch- und Niederflur-Straßenbahnen bezüglich der Art der Schallquellen nicht. Die unterschiedliche Höhenlage der Schallquellen hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Schallausbreitung. Dies vor allem dann, wenn die Strecke in unmittelbarer Nähe zur Bebauung verlegt ist (Abbildung 12) oder Schallschutzwände vorhanden sind. Die Schallemissionen der auf dem Dach angeordneten Aggregate können sich ungehindert auf die oberen Geschosse der Gebäude ausbreiten (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007b). Für diese hochliegenden Schallquellen (Stromrichter, Kompressor, Klima- bzw. Lüftungsaggregate) wurde für die Berechnung in Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV eine Höhe von 4,00 m über der Schienenoberkante festgelegt.

² Definierte Frequenzbereiche.

Abbildung 10: Beispiel für die A-bewerteten Schallpegelverläufe (Trendlinien) der Oktaven 63 Hz bis 8 kHz und des Summenpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

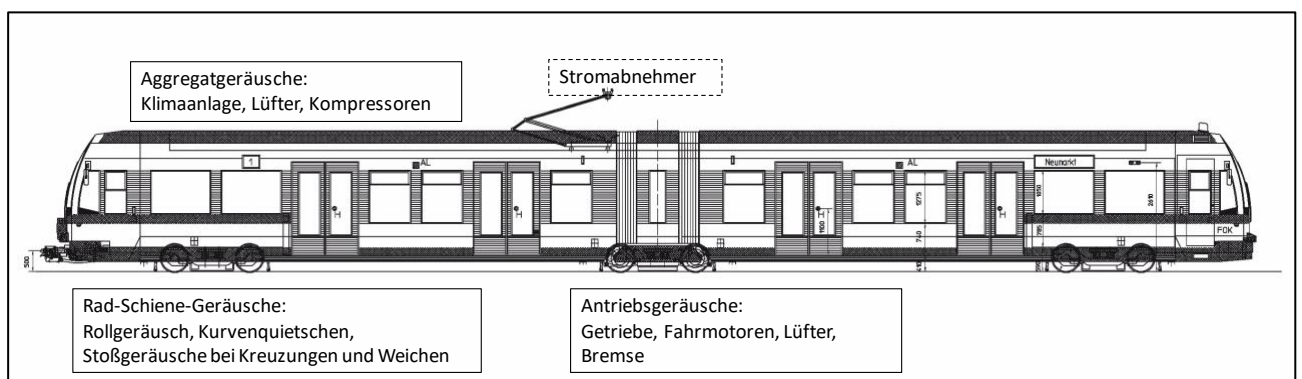
Messung außen im Bereich des Drehgestells eines Straßenbahnfahrzeugs während des Beschleunigens bis zur Geschwindigkeit von ca. 70 km/h



Dargestellt sind nur die für die Schallimmissionsberechnung relevanten Oktaven (vgl. Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Abbildung 11: Schallquellen bei Straßenbahnen am Beispiel eines Niederflrfahrzeugs



Quelle: Kölner Verkehrs-Betriebe AG, bearbeitet: STUVA

Abbildung 12: Streckenführung im Innenstadtbereich bei beengten Straßenverhältnissen



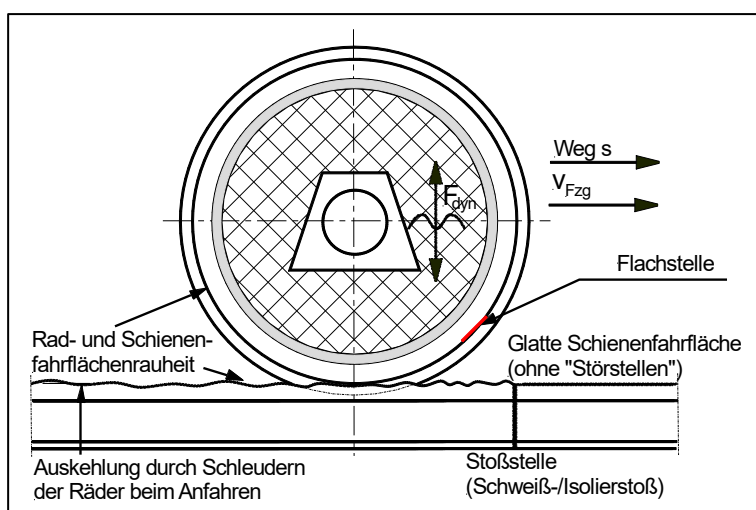
Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

2.5.2 Schallanregung im Bereich von Rad und Schiene

2.5.2.1 Grundsätzliches

Die Höhe der Schallemissionen beim Betrieb von Straßenbahnen wird maßgeblich durch den Zustand der Fahrflächen von Rad und Schiene beeinflusst. Durch das Abrollen der Räder auf der Schiene entstehen Kräfte, die eine Körperschallanregung von Rad und Schiene bewirken (Krüger 2006b, S. 177). Anregungsursachen können beispielsweise Rauheiten der Räder und/oder der Schiene, Lücken in Weichen, Flachstellen und Auskehlungen im Bereich von Schweiß- und Isolierstößen sein (Abbildung 13). In dieser Abbildung ist auch ein Schienenabschnitt mit einer glatten Fahrfläche dargestellt. Dies symbolisiert den akustisch gewünschten Zustand, um möglichst geringe Schallemissionen zu generieren.

Abbildung 13: Wesentliche Anregungsursachen für Körperschall im Rad-/Schiene-Kontaktbereich

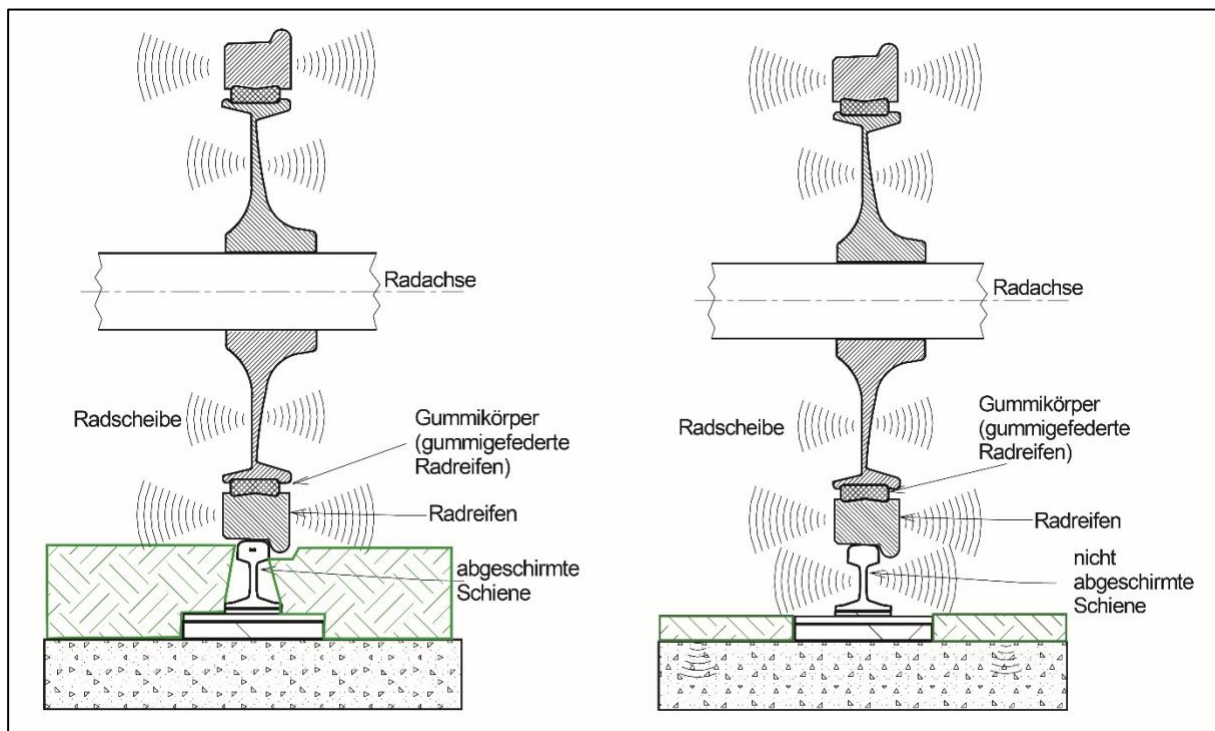


Das Rad hat eine Flachstelle, Fahrflächen von Rad und Schiene sind aufgeraut, in der Schiene befindet sich eine Stoßstelle infolge einer Schweißstelle, Gleisisolierung oder infolge einer Unterbrechung der Fahrfläche an einer Kreuzung oder Weiche.

Quelle: Krüger 2006b, S. 177

Der durch den Rollkontakt entstehende Körperschall umfasst den gesamten hörbaren Frequenzbereich und breitet sich in Form von Wellen in den angeregten Körpern aus und wird dann als Luftschall abgestrahlt. Einen maßgeblichen Einfluss auf die gesamte Luftschallemission haben die Räder, Schienen und Schwellen (Abbildung 14). Bei in der Straße eingebetteten Gleisen sowie bei begrünten Bahnkörpern mit hochliegender Vegetationsebene sind die Schienen weitgehend abgedeckt und es sind hierbei keine offenliegenden Schwellen vorhanden. Somit wird von diesen Bauteilen gegenüber der Situation mit offenliegenden Schienen nur geringer bzw. kein Schall abgestrahlt (vgl. Grüngleis Netzwerk 2014, S. 15). Ergänzende Schallschutzmaßnahmen an den Schienen sind hierbei nicht erforderlich und auch nicht möglich.

Abbildung 14: Schallabstrahlende Bauteile im Bereich von Rad, Schiene und Fahrweg bei offenliegenden und abgeschirmten Schienen



Beispiel für abgeschirmte Schiene (links): in Straßen eingebetteter Bahnkörper oder Begrünter Bahnkörper mit hochliegender Vegetationsebene. Beispiel für nicht abgeschirmte Schiene (rechts): unabhängiger oder besonderer Bahnkörper mit Schottereindeckung oder begrünter Bahnkörper mit tiefliegender Vegetationsebene.

Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Krüger 2006b, S. 178)

Durch die Anregungen im Kontaktbereich von Rad und Schiene werden im Wesentlichen folgende Geräusche von den in Abbildung 14 dargestellten Komponenten abgestrahlt:

- Rollgeräusche,
- Kurvengeräusche sowie
- Stoßgeräusche.

Diesen Geräuscharten liegen unterschiedliche Mechanismen zu ihrer Anregung zugrunde, die im Folgenden jeweils erläutert werden.

2.5.2.2 Rollgeräusche

2.5.2.2.1 Ursachen und Merkmale

Im Schienenverkehr wird die Höhe des Schallemissionspegels stark vom Zustand (Rauheit und Riffel) der Fahrflächen von Rad und Schiene beeinflusst. Durch geriffelte Schienen und/oder Räder mit Fahrflächenfehlern (Rauheiten, Flachstellen, Unrundheiten) entstehen Wechselkräfte und Wechselbewegungen. Bei glatten Fahrflächen von Schienen und Rädern ergeben sich geringere Rollgeräuschpegel als bei rauen oder geriffelten Fahrflächen. Bei geriffelten Schienenfahrflächen können gegenüber glatten Schienen Schallpegelerhöhungen von bis zu 15 dB auftreten (Krüger 2006b, S. 179). Dabei werden in Abhängigkeit von der Riffelwellenlänge und der Fahrgeschwindigkeit Frequenzen f im Frequenzbereich von

$$f = \frac{\text{Geschwindigkeit } v}{\text{Riffelabstand } \lambda} \left[\frac{1}{s} \right] \text{ oder } [Hz] \quad (\text{Gl. 6})$$

angeregt. Da sowohl der Riffelabstand als auch die Fahrgeschwindigkeit längs einer Strecke variieren, werden unterschiedliche Frequenzen angeregt.

Insbesondere die Fahrflächen der Schienen bei straßenbündigem Bahnkörper können durch Verschmutzung (Staub, Sand, Splitt) bei Überfahrten der Straßenbahnen und des motorisierten Individualverkehrs stark aufgeraut werden. Die Schallemissionen bei Befahrung dieser Gleise sind daher in der Regel deutlich höher als bei Fahrten auf Gleisen mit besonderem oder unabhängigem Bahnkörper. Besondere Bahnkörper liegen im Straßenbereich, sie werden aber, wie die unabhängigen Bahnkörper, nicht vom Straßenverkehr befahren.

Das Aufrauen der Räder lässt sich hauptsächlich auf Rauheiten der Schienenfahrflächen zurückführen, die Radfahrflächen gleichen sich den Rauheiten der Schiene (Spiegelung) an. So wurde beispielsweise bei Messungen an einer Straßenbahn bei der Rheinbahn in Düsseldorf nach dem Abdrehen der Räder und einer Laufleistung von 1.500 km eine Erhöhung des A-bewerteten Schallpegels um 2 dB ermittelt (vgl. Gerndt 1983).

Polygonisierte Räder von Schienenfahrzeugen zeichnen sich durch periodische Unrundheiten über den Umfang eines Rades aus (Lutzenberger et al. 2013). Die Ursachen hierfür sind noch nicht eindeutig geklärt. Lutzenberger et al. 2013 nennen u. a. folgende mögliche Ursachen hierfür:

- ▶ Unterschiedliche Härten der Radfahrfläche durch den Herstellungsprozess.
- ▶ Qualität der Radbearbeitung und der Drehgestell-Instandhaltung.
- ▶ Schwingungen des Radsatzes auf dem Gleis infolge von Unwuchten.
- ▶ Querschlupf in engen Gleisbögen.
- ▶ Einfluss geometrischer Verhältnisse im Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene. In Abhängigkeit vom festgelegten Radprofil und der Schienenneigung sowie von den Verschleißzuständen der Fahrflächen von Rad und Schiene ergeben sich zwischen beiden Komponenten unterschiedliche Kontaktbereiche, die das Abrollen der Räder auf den Schienen beeinflussen.
- ▶ Witterungsverhältnisse.

Hierdurch werden Räder und Schienen stark belastet sowie Schall und Erschütterungen angeregt. Zur Vermeidung von erheblichen Auswirkungen einer Polygonisierung der Räder ist eine rechtzeitige Detektion dieser Störstellen erforderlich. Zur Detektion der Störstellen gibt es Monitoringsysteme, da die Polygone bei der visuellen Überprüfung erst sehr spät detektiert werden und auch bei einer Rundlaufmessung nicht ohne weiteres zu identifizieren sind (Schulz 2008; Lutzenberger et al. 2013). Je nach Größe der Störstellen ist eine rechtzeitige Bearbeitung der Radfahrflächen einzuplanen und durchzuführen. Diese Aussage gilt sinngemäß auch für im Folgenden beschriebenen Schienenriffel.

2.5.2.2.2 Schienenriffel

Schienenriffel bezeichnen wellenförmige Unebenheiten der Schienenfahrfläche im Abstand von ca. 20 mm bis 60 mm. Schienenriffel sind mit bloßem Auge gut erkennbar (Abbildung 15). Der Höhenunterschied zwischen den hellen und dunklen Stellen kann bis zu 0,6 mm betragen, er ist somit deutlich größer als entsprechende Werte für die Schienenrauheit. Radriffel treten vorwiegend bei Eisenbahnradern auf, die mit Graugussbremsklötzen gebremst werden. Da alle Straßenbahnen mit Scheibenbremsen ausgerüstet sind, ist hier eine Verriffelung der Räder nicht vorhanden.

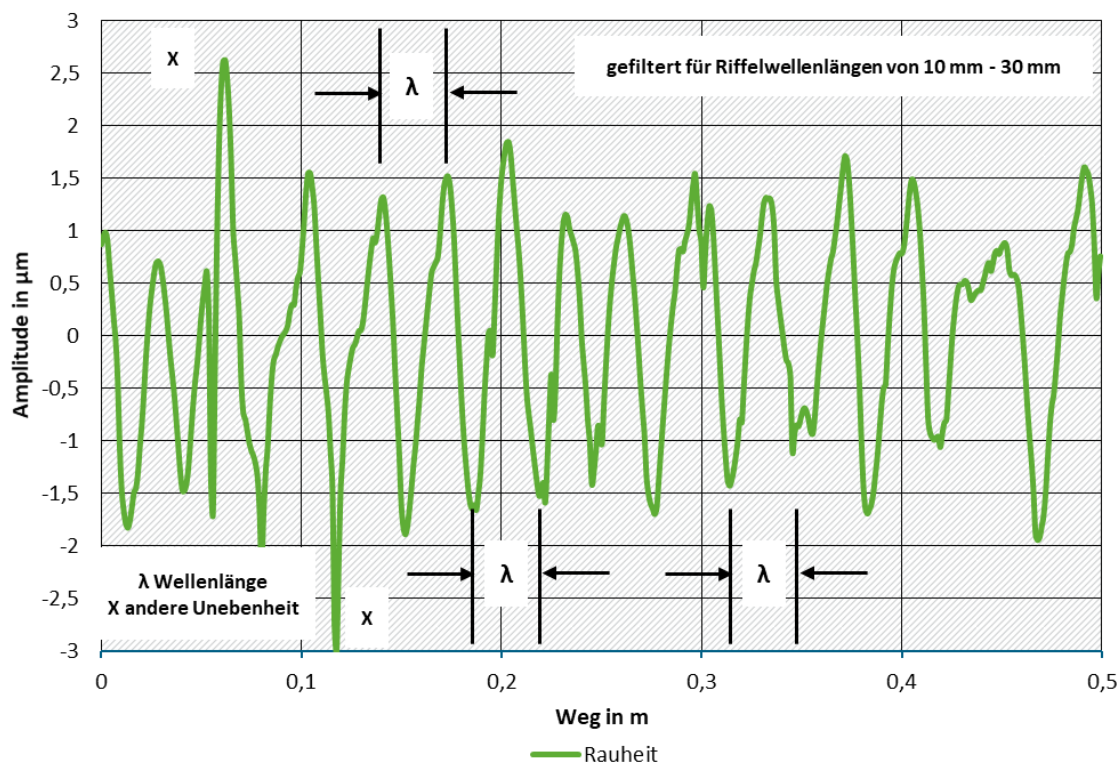
Durch Schienenriffel werden, wie bei der Polygonisierung der Räder, die dynamischen Kräfte im Rad/Schiene-Kontakt erhöht und es kommt somit auch zu einem schnelleren Verschleiß von Schienen, Schwellen, Befestigungsmitteln sowie Schotter, wodurch auch eine Verschlechterung der Gleisgeometrie eintreten kann. Ein Beispiel für gemessene Schienenriffel zeigt Abbildung 16. Das Messsignal wurde hierbei für den Wellenlängenbereich von 10 mm bis 30 mm bandpassgefiltert (Krüger 2008). Bei einer Riffelmessung wird die Schienenfahrfläche mit einem Wegaufnehmer in Längsrichtung der Schiene abgetastet. Als Ergebnis erhält man die vertikale Wegauslenkung über der Schienenlänge. In diesem Signal sind neben Riffeln auch weitere Oberflächenrauheiten mit geringeren Höhenunterschieden enthalten. Durch eine Filterung dieses Signals lassen sich die Riffel deutlicher darstellen. Eine Signalfilterung bedeutet immer, dass nur die Teile des Signals durchgelassen werden, die in das festgelegte Raster fallen. Für das dargestellte Ergebnis in Abbildung 16 bedeutet das, es werden nur Signalanteile im Wellenlängenbereich von 10 mm bis 30 mm durchgelassen, alle anderen Anteile werden, je nach verwendeter Filterfunktion, mehr oder weniger stark unterdrückt. In der Abbildung 16 beträgt die Wellenlänge $\lambda \approx 3,1 \text{ cm}$. Die in diesem Bild mit einem „X“ gekennzeichneten Stellen sind anderen Unebenheiten auf der Schienenfahrfläche zuzuordnen (z. B. kleine Vertiefungen oder Schmutzpartikeln).

Abbildung 15: Beispiele für Schienenrauheiten



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Abbildung 16: Ergebnis einer Riffelmessung (Beispiel)



λ : Abstand der Riffelberge oder Riffeltäler (vgl. die dunklen bzw. hellen Stellen in Abbildung 15, rechtes Bild).

Quelle: Eigene Messung (vgl. Krüger 2008, S. 18)

Das Rad-/Schiene-Geräusch (Rollgeräusch) wird neben dem Zustand der Fahrflächen von Rad und Schiene von weiteren äußeren Faktoren beeinflusst. Dazu zählen:

- ▶ Fahrzeugparameter, z. B. Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeuglänge, Ausstattung mit Scheibenbremsen, Vollräder oder gummigefederte Räder, Raddurchmesser, Radgeometrie, Anzahl der Räder.
- ▶ Die Fahrbahnart und der Oberbau (z. B. Rillenschienen, rillenlose Schienen, begrünter Bahnkörper, Schottergleise, Feste Fahrbahn, in die Straßenfahrbahn eingebettete Gleise).
- ▶ Die Streckenführung, z. B. enge Gleisbögen, Weichen, Kreuzungen (Stöße), Steigungen oder Neigungen, Rampen an Ein- und Ausfahrten von Tunneln, Lage auf dem Damm oder im Einschnitt, Führung auf Viadukten / Brücken.
- ▶ Betriebseigenschaften, z. B. Haltestellendichte, Straßenkreuzungen bzw. Lichtsignalanlagen.

So spielt beispielsweise die Fahrgeschwindigkeit bei den von Rad und Schiene ausgehenden Schallemissionen eine entscheidende Rolle. Ab einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h wirken Rollgeräusche in der Regel dominierend. Eine Verdopplung der Fahrgeschwindigkeit oberhalb dieser Geschwindigkeit kann zu einer Erhöhung des Maximalpegels um bis zu 9 dB(A) führen (VDV 2011b, S. 3).

Die Schallleistung des Rollgeräusches nimmt mit der Anzahl der Räder eines Straßenbahnfahrzeuges zu. Entsprechend findet die Anzahl der Räder Berücksichtigung bei der Berechnung der Schallemissionen nach Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV. Auch die Größe der Räder hat einen Einfluss auf die abgestrahlte Schallleistung (VDV 2011b, S. 9). Je größer die Räder

desto größer die Schallemission. Es ist hier jedoch darauf hinzuweisen, dass der Raddurchmesser nicht aus akustischen Anforderungen festgelegt wird. Hierfür werden u. a. Festigkeitsanforderungen (Rad-/Schienenaufstandsfläche) und gewünschte Fußbodenhöhe eines Fahrzeugs als Kriterien herangezogen.

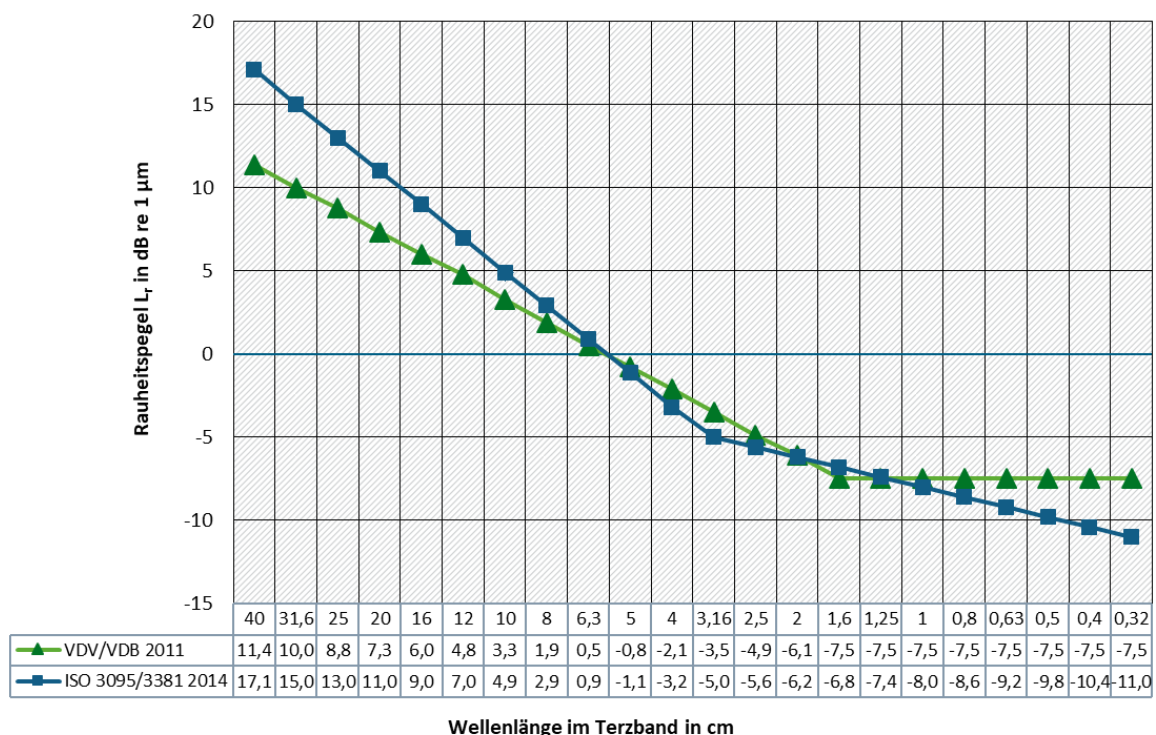
2.5.2.2.3 Messung der Schienenrauheit

Da bereits kleinste Unebenheiten (im μm -Bereich) auf den Fahrflächen von Rad und Schiene zu einer Anregung von Körperschall in diesen Bauteilen und damit zu Schallemissionen führen, sind die Anforderungen an die Messtechnik zur Überwachung bzw. Überprüfung der Rauheit besonders hoch.

Bei akustischen Abnahmemessungen (Typprüfungen) von neuen Fahrzeugen und regelmäßigen Überwachungsmessungen müssen die Grenzwerte gemäß der Grenzkurve in Abbildung 17 eingehalten werden. Für Radrauheiten ist kein entsprechendes Grenzspektrum für Abnahmemessungen vorhanden, da es sich bei solchen Messungen um Neufahrzeuge handelt, die über weitestgehend glatte Radfahrflächen verfügen. In der VDV-Schrift 154 (VDV 2011b) wurde anhand von Rauheits- und Schallmessungen ein leicht geändertes Rauheitsspektrum für akustische Abnahmemessungen von Straßenbahnen festgelegt. Das Grenzspektrum ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Abbildung 17: Grenzspektren für die Rauheit der Schienenfahrflächen

Gemäß DIN EN ISO 3095 (Ausgabe 2014) sowie der VDV Schrift 154 für die akustische Abnahme von (neuen) Fahrzeugtypen (Typprüfung).



Quelle: DIN EN ISO 3095 bzw. VDV 2011b

Die Gleichung für die durch Riffel angeregten Frequenzen (Gl. 7) gilt auch für die Schienenrauheit. Kleine Wellenlängen λ bei der Rauheit führen zu höheren angeregten Frequenzen als große. Zum Beispiel werden bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h in Abhängigkeit von den Rauheitswellenlängen λ folgende, auf ganzzahlige Werte aufgerundete, Frequenzen angeregt (Tabelle 2). Die langwelligen Unebenheiten mit einer Wellenlänge $\lambda > 20$

cm sind akustisch kaum noch wahrnehmbar, sie haben aber Auswirkung auf die Erschütterungsanregung.

Tabelle 2: Anregung von Frequenzen in Abhängigkeit der Wellenlänge bei der Schienenrauheit ($v = 50 \text{ km/h}$)

Wellenlänge λ bis unter 4 cm	Frequenz f für Wellenlängen unter 4 cm	Wellenlängen λ ab 4 cm	Frequenz f für Wellenlängen ab 4 cm
0,32 cm	4.340 Hz	4,00 cm	347 Hz
0,40 cm	3.472 Hz	5,00 cm	278 Hz
0,50 cm	2.778 Hz	6,30 cm	220 Hz
0,63 cm	2.205 Hz	8,00 cm	174 Hz
0,80 cm	1.736 Hz	10,00 cm	139 Hz
1,00 cm	1.389 Hz	12,50 cm	116 Hz
1,25 cm	1.111 Hz	16,00 cm	87 Hz
1,60 cm	868 Hz	20,00 cm	69 Hz
2,00 cm	694 Hz	25,00 cm	56 Hz
2,50 cm	556 Hz	32,00 cm	44 Hz
3,20 cm	440 Hz	40,00 cm	35 Hz

Quelle: Eigene Darstellung

In DIN EN ISO 3095 werden Hinweise zur *direkten* und *indirekten* Messung sowie Bewertung der Rad- und Schienenrauheit gegeben. Ein konkretes Messverfahren zur Ermittlung der Schienenfahrflächenrauheit wird im E DIN EN 15610 beschrieben. In einer überarbeiteten Fassung dieser Norm sind auch entsprechende Angaben für die Messung der Rauheit von Radfahrflächen enthalten.

Bei der direkten Messung erfolgt eine Abtastung der Schienenfahrfläche mithilfe eines Sensors. Es kommen hierfür in der Regel Wegaufnehmer zum Einsatz. Nach Norm können auch berührungslose Sensoren eingesetzt werden. Wie in Abbildung 18 ersichtlich, wird für die Messung ein „Referenzbalken“ mit Gleitflächen oberhalb oder neben der Schiene angeordnet. Ein auf die Gleitflächen aufgelagerter Schlitten, welcher über einen Elektromotor betrieben wird, wird mit konstanter Geschwindigkeit von zum Beispiel $v = 50 \text{ mm/s}$ bewegt. Am Schlitten sind ein bis drei Messaufnehmer angebracht, die die Schiene im Bereich des Fahrspiegels in vertikaler Richtung abtasten.

Zum Vergleich mit den Grenzspektren nach Abbildung 17 wird das gemessene Rauheits-Wegsignal $r(x)$, dieser Messwert wird als „akustische Rauheit“ bezeichnet, mittels eines festgelegten Rechenverfahrens geglättet, d. h., Spitzen und Löcher (spikes und pits) werden ausgeglichen. Das so erhaltene Signal wird mit $r'(x)$ bezeichnet. Von diesem Signal wird dann ein gemitteltes Terzpegelspektrum $L_r(f_{Tn})$ (f_{Tn} ist die Mittenfrequenz der n -ten Terz) erstellt. Dieses Frequenzspektrum ist dann in ein Wellenlängenspektrum $L_r(\lambda_{Tn})$ umzurechnen. Hierzu ist die Abszisse des Spektrums wie folgt umzurechnen (Gl. 7):

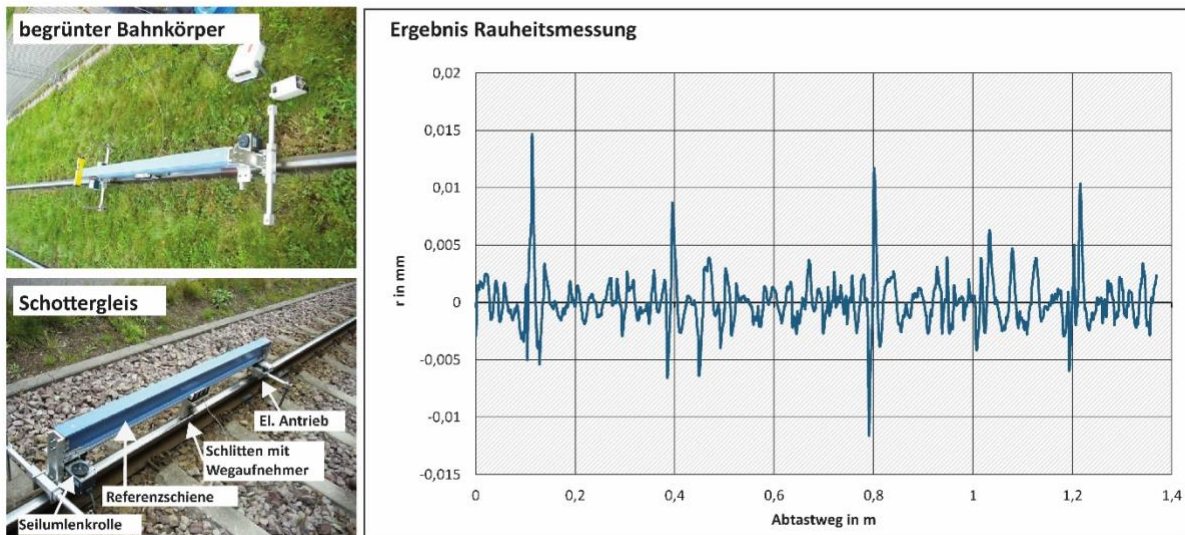
$$\lambda_{Tn} = \frac{v_{Tast}}{f_{Tn}} \quad (\text{Gl. 7})$$

mit v_{Tast} = Abtastgeschwindigkeit des Sensors.

Zum Beispiel ergibt die Umrechnung einer Frequenz von 160 Hz ($160 \times 1/s$) und einer Abtastgeschwindigkeit von 50 mm/s eine Wellenlänge von 0,313 mm ($\lambda_{Tn} = \frac{v_{Tast}}{f_{Tn}} = \frac{50 \text{ mm/s}}{160 \text{ 1/s}} = 0,313 \text{ mm}$).

Abbildung 18: Beispiel für den Einsatz eines Rauheitsmessgerätes

Einsatz auf einem Schottergleis und einem begrünten Bahnkörper sowie beispielhaft ein Ergebnis für eine Schienen-Rauheitsmessung im Zeitbereich (Messung auf einem Schottergleis).

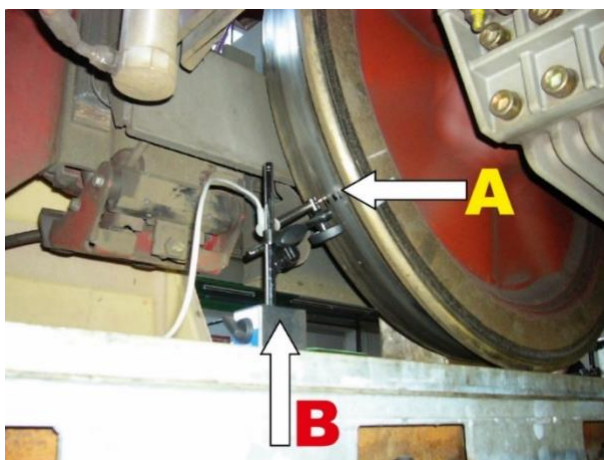


Quelle: Eigene Darstellung und eigene Messung (STUVA)

2.5.2.2.4 Messung der Radrauheit

Für die Messung der Radrauheit wird dasselbe Messprinzip eingesetzt: Der Aufnehmer wird auf einem festen Stützpunkt vor dem Rad platziert (z. B. mithilfe eines Magnethalters auf der Schiene) und das Rad wird entweder mit der Hand oder über einen elektrischen Antrieb (z. B. auf einer Unterflurdrehmaschine) langsam gedreht (Abbildung 19).

Abbildung 19: Beispiel für die Messung der Radrauheit mittels eines Wegaufnehmers



A: Wegaufnehmer zur Abtastung der Radfahrfläche; B: Magnetstativ zur Fixierung des Wegaufnehmers an einem festen Punkt. Das Rad ist frei drehbar.

Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

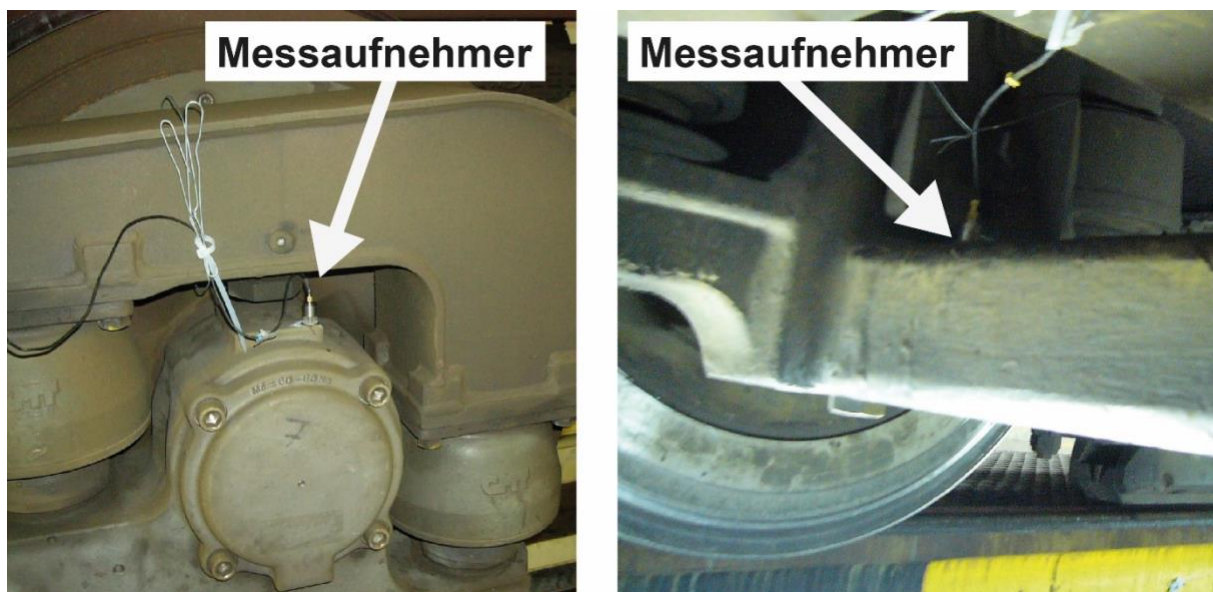
Bei diesem Verfahren ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rades messtechnisch zu erfassen. Zur Bewertung der Radrauheit sind in der DIN EN ISO 3095 keine Vorgaben enthalten.

2.5.2.2.5 Indirekte Rauheitsmessung

Bei der *indirekten* Rauheitsmessung wird der Körperschall auf einem Radsatzlager in vertikaler Richtung gemessen (Abbildung 20). Bei Niederflurfahrzeugen, bei denen eine Körperschallmessung auf einem Radsatzlager oft nicht möglich ist, kann der Messpunkt auf der Wiege (Verbindung zwischen den beiden Rädern) nahe dem Radsatzlager gewählt werden. Mit solchen Messungen kann die kombinierte Rad-/Schienenrauheit (Summenrauheit) ermittelt werden. Körperschallmessungen am Schienenfuß kennzeichnen ebenfalls die Summenrauheit von Rad und Schiene.

Abbildung 20: Körperschallmessung im Drehgestell bei einem Hochflur- und Niederflurfahrzeug

Der Messaufnehmer wurde beim Hochflurfahrzeug auf einem Radsatzlager platziert (links) bzw. beim Niederflurfahrzeug auf der Wiege (rechts).

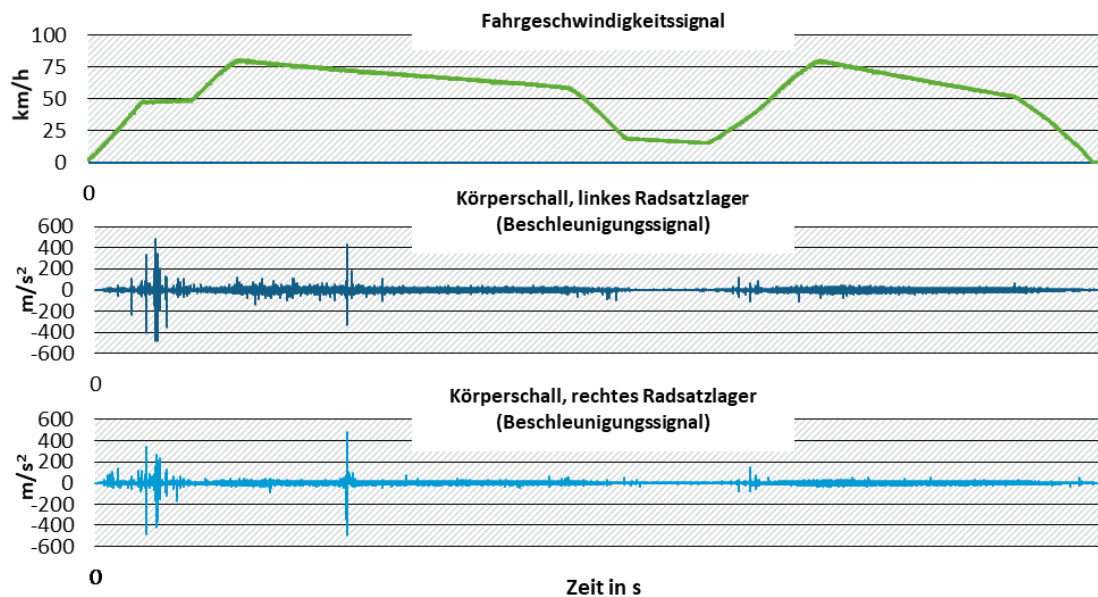


Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Beispielhaft zeigt Abbildung 21 ein Ergebnis von Körperschallmessungen auf den Radsatzlagern eines U-Bahn-Fahrzeuges. Aufgezeichnet wurden hier die Signale zwischen zwei Haltestellen. Oben ist die Geschwindigkeit dargestellt. Demnach wurde auf $v = 80 \text{ km/h}$ beschleunigt (Ausfahrt aus der Haltestelle mit einigen Weichen), danach rollte das Fahrzeug ohne Antrieb. Nach 180 Sekunden wurde dann wieder bis auf $v = 80 \text{ km/h}$ beschleunigt. Dieser Fahrzyklus spiegelt sich auch bei den Körperschallsignalen ab. Die Weichenüberfahrten, die Geschwindigkeitsänderungen und auch unterschiedliche Rauheitssignale von Rad und Schiene sind durch Ausschläge (Spitzen) zu erkennen.

Die akustisch relevanten Unebenheiten auf Schienen können heutzutage mithilfe von entsprechend ausgerüsteten Messwagen indirekt über Schallmessungen geortet werden. Hierzu wird im Eisenbahnbereich beispielsweise von der Deutschen Bahn der sogenannte Schallmesswagen eingesetzt, mit dem das gesamte Rad-/Schiene-Geräusch in einem akustisch toten Raum oberhalb eines Drehgestells gemessen wird. Für Straßenbahnsysteme ist ein entsprechendes Fahrzeug nicht vorhanden.

Abbildung 21: Messergebnisse einer Körperschallmessung auf den Radsatzlagern eines U-Bahnfahrzeugs



Die obere Kurve zeigt das Signal der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges, die Kurven darunter die Körperschallsignale auf dem jeweils linken und rechten Radsatzlager (bezogen auf die Fahrtrichtung der Straßenbahn). Die Spitzen in den Beschleunigungssignalen (A) repräsentieren Weichenüberfahrten (Stoßanregungen).

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Aufgrund der obigen Aussagen können die akustischen Eigenschaften eines Gleises über einen längeren Gleisabschnitt somit auch durch Körperschallmessungen auf den beiden Radsatzlagern eines Radsatzes (Fahrwerk) sowie durch Luftschallmessungen vor einem Rad oder in Radsatzmitte unterhalb des Fahrzeugbodens ermittelt werden. Um den Einfluss von möglichen Störgeräuschen (z. B. durch Antriebsgeräusche) gering zu halten, sollten die Messungen an einem nicht angetriebenen Radsatz erfolgen. Die Fahrgeschwindigkeit sollte während der Messungen konstant gehalten werden.

2.5.2.3 Kurvengeräusche

2.5.2.3.1 Ursachen und Merkmale von Kurvengeräuschen

Beim Fahren in Gleisbögen mit Radien kleiner 500 m werden Geräusche erzeugt, die entsprechend ihren typischen Klangbildern differenziert werden können und verschiedene Ursachen haben (Tabelle 3):

- ▶ Quietschen³,
- ▶ Zischen oder Zischeln,
- ▶ Rumpeln,
- ▶ sowie Rollgeräusche vergleichbar mit dem Rollgeräusch auf einer geraden Strecke.

³ Auch als „Kreischen“ bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch der Begriff „Quietschen“ bzw. „Kurvenquietschen“ verwendet.

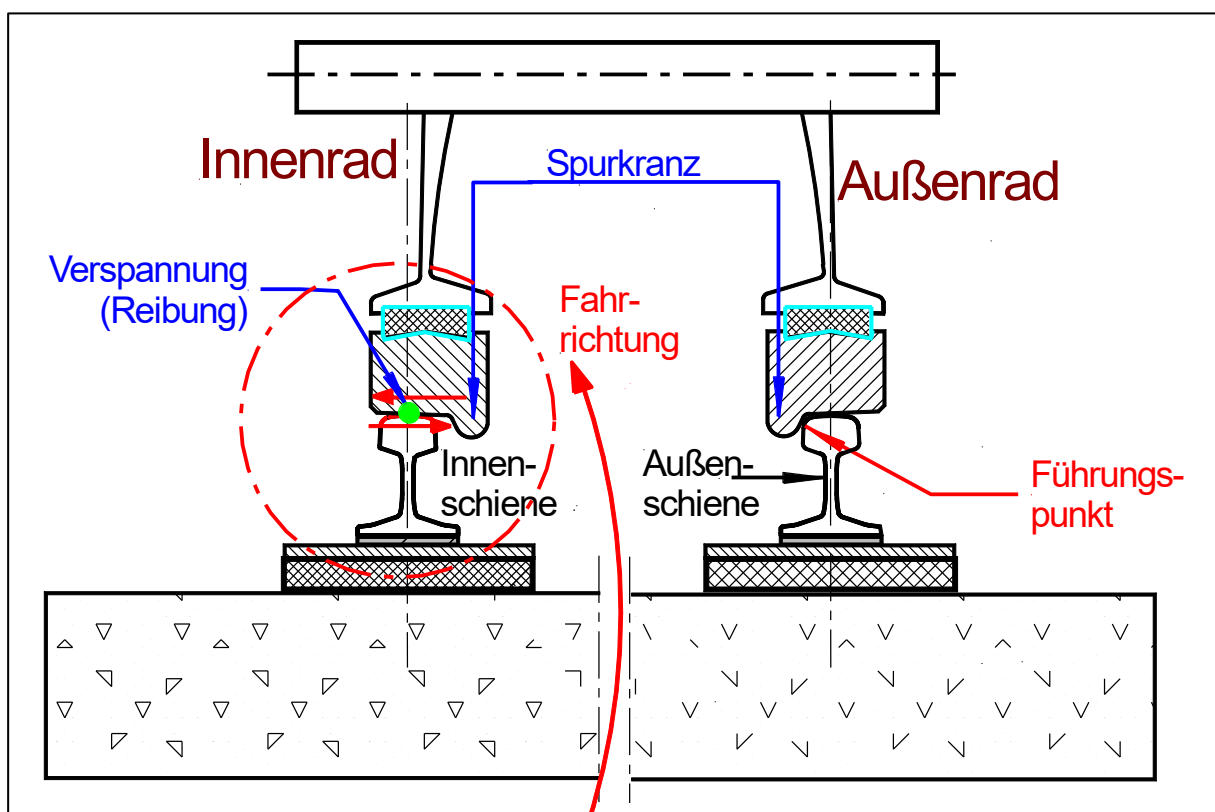
Tabelle 3: Unterschiedliche Kurvengeräusche und ihre Ursachen

Kurvengeräusch	Anregungsmechanismus
Quietschen	Stick-Slip-Effekte (kann beim Quergleiten des Rades auf der Schienenfahrfläche entstehen; Verspannung – Entspannung – Gleiten)
Zischen	Anlaufen des Spurkranzes (Reibung zwischen Spurkranz und Schienenkopf)
Rumpeln	Riffel und sonstige „Störstellen“ auf der Schienenfahrfläche im Gleisbogen

Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Die bei der Durchfahrt von Gleisbögen entstehenden tonalen Geräusche (Kurvenquietschen) sind auf ein Ruckgleiten (Stick-Slip-Effekt) der Radaufstandsflächen auf der Schiene beim Fahren durch enge Gleisbögen zurückzuführen (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009b). Hierbei wird das bogenaußen laufende Rad durch den anlaufenden Spurkranz zu einer kontinuierlichen Querbewegung zum Bogenmittelpunkt gezwungen (Abbildung 22).

Abbildung 22: Entstehung des Stick-slip-Effektes infolge der Radsatzstellung bei der Durchfahrt eines Gleisbogens (Linksbogen)



Darstellung eines Radsatzes im Gleisbogen (Linksbogen). Das rechte Rad hat eine feste Verbindung über den Spurkranz mit der Schiene. Es wird geführt und drückt den Radsatz nach links. Beim linken Rad ist eine solche Verbindung nicht vorhanden. Rad und Schiene werden hier über deren Fahrflächen mittels Reibung miteinander verbunden.

Quelle: Eigene Darstellung (nach Krüger 2006b, S. 185)

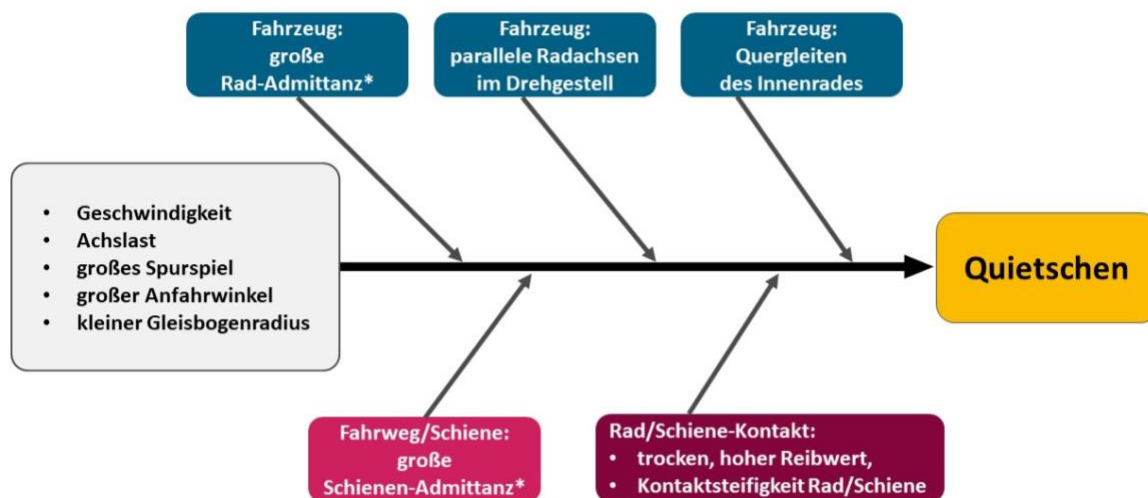
Durch die Querkräfte wird eine kraftschlüssige Verspannung (englisch: stick) zwischen dem inneren Rad (Fahrfläche) und der Schiene erzeugt. Sobald diese Spannung die Haftreibung übersteigt, kommt es zu einer ruckartigen Entspannung zwischen Rad und Schiene in Querrichtung und damit zum Quergleiten (englisch: slip) des Rades auf der Schiene. Dieser stick-

slip-Vorgang verursacht eine Instabilität und führt so zu einer Reibkraftanregung von Rad und Schiene. Der hierdurch angeregte Körperschall in beiden Bauteilen wird als Luftschall abgestrahlt und als Quietschen wahrgenommen. Bei Straßenbahnen liegt die dominante Frequenz für das Quietschen in der Regel zwischen 1.200 Hz und 1.800 Hz, teilweise auch höher (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009a, S. 92). Es können auch Zischgeräusche infolge von Reibung am Führungspunkt des Außenrades auftreten.

Die Ursache für den Wechsel zwischen Verspannung und ruckartiger Entspannung ist auf die Differenz zwischen den Haft- und Gleit-Reibwerten in der Kontaktfläche von Rad und Schiene zurückzuführen. Durch eine Fahrflächenbehandlung von Rad und/oder Schiene können die Reibbeiwerte für Haften und Gleiten weitgehend angeglichen werden. Hiermit wird der Anregungsmechanismus unterdrückt und somit das Kurvenquietschen vermindert oder ganz vermieden (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009b).

Untersuchungen haben weiterhin gezeigt (ebenda), dass das Auftreten von Kurvenquietschen, neben den oben genannten Reibungsverhältnissen zwischen Rad und Schiene, von zahlreichen weiteren Einflussgrößen beeinflusst wird. In Abbildung 23 sind diese zusammenfassend dargestellt. Diese verschiedenen Einflussgrößen auf das Quietschen erschweren sowohl eine Prognose als auch den messtechnischen Nachweis dieser Geräusche. So kommt es, bei sonst gleichen Randbedingungen, bei der einen Bogenfahrt zum Quietschen, bei der nächsten nicht. Es ist davon auszugehen, dass die in Abbildung 23 genannten Parameter bei jeder Bogenfahrt sich unterschiedlich einstellen. Dies erschwert auch eine Vorhersage des Auftretens der Quietschgeräusche.

Abbildung 23: Einflussgrößen beim Auftreten von Kurvenquietschen in Gleisbögen



* Die Admittanz beschreibt die Empfindlichkeit einer Struktur (hier Rad und Schiene) gegenüber einer Anregung: Je größer die Admittanz, desto leichter lässt sich die Struktur zu Schwingungen anregen.

Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Forschungsverbund Leiser Verkehr 2010, S. 9)

Das Auftreten von Kurvenquietschen ist u. a. in hohem Maße abhängig von den Reibungsverhältnissen zwischen Rad und Schiene. Bei nassen oder befeuchteten Schienenfahrflächen tritt in der Regel kein oder nur ein deutlich geringeres Quietschgeräusch auf als bei trockenen Fahrflächen. In zahlreichen praktischen Anwendungsfällen hat sich gezeigt, dass mit einer Fahrflächenkonditionierung (Auftragen eines Mittels zur Beeinflussung des Reibwertes zwischen Rad und Schiene) Quietschen weitgehend vermieden werden kann (Forschungsverbund Leiser Verkehr 2010, S. 11; STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009a, S. 19).

Zudem hat der Radius eines Gleisbogens einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Quietsch- oder Zischgeräuschen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zu erwartende Geräusche und Wahrscheinlichkeit des Auftretens in Abhängigkeit des Gleisbogenradius R

Bogenradius R	Geräuschart	Auftreten
bis 50 m	Quietschen	sehr wahrscheinlich
bis 100 m	Quietschen und Zischen	wahrscheinlich
bis 200 m	Zischen	wahrscheinlich
über 200 m	Zischen	möglich
über 500 m	Quietschen und Zischen	i. d. R. nicht zu erwarten

Quelle: VDV 2011a, S. 42

2.5.2.3.2 Messung von Kurvengeräuschen

Kurvenquietschen wird von vielen lokalen Randbedingungen beeinflusst (vgl. Abbildung 23). Um die Wirkung von Lösungen zur Vermeidung bzw. Verminderung dieser Geräusche zu finden, wurden beispielsweise Langzeitmessungen sowie Tagesmessungen in zwei verschiedenen Gleisbögen durchgeführt. Diese Messungen erfolgten vorwiegend an einer Eisenbahnstrecke Anfang der 1990er Jahre in Dortmund. Ergänzende Messungen wurden an Straßenbahngleisen und einem Gleisrost in einer Prüfhalle durchgeführt. Weitere Messungen wurden in einem Gleisbogen in eine Wendeschleife der KVB in Köln zwischen 2005 und 2009 durchgeführt (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009a).

Bei den Messungen in den 1990er Jahren wurde primär der Grad der Bestückung der Schienen mit Absorptionskörpern (Schienenstegbedämpfung) in Gleisbögen ermittelt, in dem weiteren Projekt wurden verschiedene Maßnahmen zur Minderung des Kurvenquietschens an einem Straßenbahngleis (Wendeschleife) untersucht.

Bei den *Langzeitmessungen*, die über zwei Jahre in einem Eisenbahn-Gleisbogen durchgeführt worden sind, wurden im Bogen in zwei Messquerschnitten jeweils ein Messmikrofon im Abstand von etwa 4 m zur Gleismitte installiert (Abbildung 24). Um einer möglichen Zerstörung der Mikrofone durch Vandalismus entgegenzuwirken, wurden sie in einem Kunststoffrohr installiert. Die Steuerung der Messdatenaufzeichnung erfolgte über insgesamt vier Geophone (je zwei für jedes Gleis), die jeweils auf einer Schwelle in Gleismitte aufgeschraubt waren. Die Aufzeichnung der Signale wurde gestartet bei Überschreitung eines vorher ermittelten Schwellwertes am ersten Geophon und gestoppt bei Unterschreiten des Schwellwertes am zweiten Geophon (erstes und zweites Geophon bezieht sich jeweils auf die Fahrtrichtung). Insgesamt wurden während der Langzeitmessung folgende Messdaten erfasst:

- ▶ die Vorbeifahrzeit T durch beide Messquerschnitte, wobei $T > T_p$ ist (T_p ist die Vorbeifahrtzeit des Zuges in einem Messquerschnitt),
- ▶ die Fahrtrichtung,
- ▶ das befahrene Gleis,
- ▶ der Maximal-Luftschallpegel L_{pAFmax} ,
- ▶ der Mittelungspegel $L_{pAeq,T}$ sowie

- die Pegelverteilung $L_{pAeq,T}$ in 2 dB-Schritten zwischen 40 dB(A) und 118 dB(A).

Abbildung 24: Mikrofonstandort für die Langzeitmessung in einem Messquerschnitt an einer Eisenbahnstrecke



„LS“: „Luftschall-Messpunkt“

Quelle: STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009a, S. 50

Zur Triggerung der Signalaufzeichnung an der Wendeschleife wurden sowohl ein Achszähler an der Außenschiene als auch eine Lichtschranke im Gleisbett installiert. Die emittierten Schalle wurden wiederum in zwei Querschnitten mit jeweils in einem Rohr installierten Mikrofonen aufgezeichnet. Auch hierbei ging es im Wesentlichen nur um die Ermittlung von Quietschen „ja“ oder „nein“.

Die Langzeituntersuchungen ergaben hier, dass die zusätzlich erhobenen Wetterdaten (Temperatur, rel. Feuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Sonnenscheindauer) keinen wesentlichen Einfluss auf das Entstehen von Kurvenquietschen hatten. Lediglich der Faktor Regen war hier entscheidend, denn nach dem Regen hörte das Kurvenquietschen für einen gewissen Zeitraum auf. Auch scheint der Taupunkt einen gewissen Einfluss auf die Entstehung dieser Geräusche zu haben, dies müsste jedoch noch intensiver untersucht werden. Der Taupunkt ist diejenige Temperatur, bei der sich Wasserdampf als Tau oder Nebel abscheidet. Am Taupunkt beträgt die Luftfeuchtigkeit 100 Prozent.

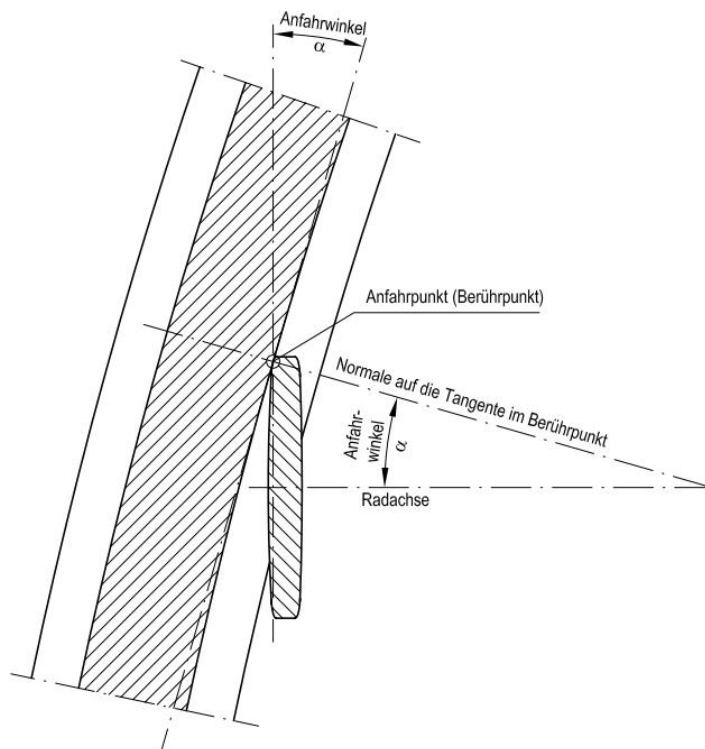
In beiden Projekten erfolgten, neben den Langzeitmessungen, auch Tagesmessungen. Bei den Tagesmessungen an der Wendeschleife konnte wiederholt festgestellt werden, dass nach durchfahrenden Schienenreinigungsfahrzeugen für eine lange Zeit Quietschgeräusche vollkommen unterdrückt worden sind (nasse Schienenfahrflächen).

Die Messungen mit einem unterschiedlichen Bestückungsgrad der Schienen mit Dämpfungselementen zeigte eindeutig, dass nur mit einer Vollbestückung (durchgehend beidseitig) ein gutes Ergebnis erreicht werden konnte. Bei diesen Messungen wurden die Schienen je eines Gleises nacheinander einseitig / zweiseitig mit Elementen bestückt. Für solche Teilbestückungen konnten zwar auch Minderungen festgestellt werden, sie waren jedoch relativ gering. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigten, dass die Pegelspitzen der Quietschfrequenzen gemindert werden konnten und das gesamte Vorbeigeräusch (Mittelwert) um etwa 2 dB(A) abgemindert worden ist. Des Weiteren wurden umfangreiche Messungen zur Auswirkung der

Größe des Anfahrwinkels⁴ (Abbildung 25) auf die Anregung von Quietschgeräuschen auf verschiedenen Gleisbögen von Straßenbahnen durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Kurvenquietschen nicht bei jeder Vorbeifahrt und auch nicht im gesamten Gleisbogen auftritt. Beispielsweise traten bei Anfahrwinkeln von über 0,5 Grad Quietschgeräusche auf. Jedoch zeigten die Untersuchungen auch, dass Fahrzeuge den Gleisbogen mit Anfahrwinkeln von 3 Grad ohne Quietschen durchfahren können. Kurvenquietschen tritt somit zwar erst ab einer bestimmten Anfahrwinkelgröße auf, jedoch führt allein die Überschreitung eines „Grenzanfahrwinkels“ nicht zwangsläufig zu Quietschen. Folglich ist die Anfahrwinkelgröße allein kein Kriterium für die Anregung von Kurvenquietschen.

Abbildung 25: Anfahrwinkel zwischen Rad und Schiene im Gleisbogen

Dargestellt ist der Anfahrwinkel α .



Quelle: TR Sp, S. 8

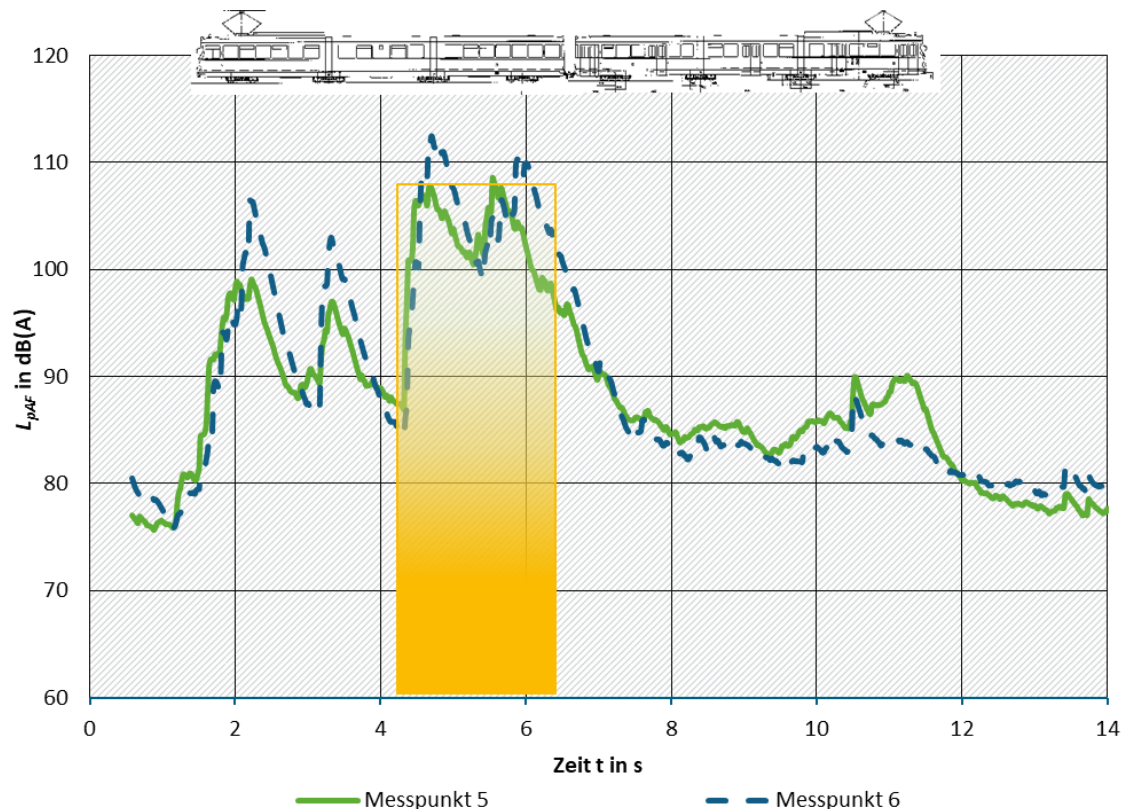
2.5.2.3.3 Ergebnisse von Kurvengeräuschmessungen

Die psychoakustische Kenngröße „Tonhaltigkeit“ ist ein Maß für die Ausgeprägtheit der Wahrnehmung der in einem Geräusch vorhandenen Einzeltöne. Ein Geräusch wird als tonhaltig bezeichnet, wenn einzelne Töne oder tonale Komponenten hörbar sind. Solche Komponenten können aus mehreren beieinanderliegenden Einzeltönen oder aus schmalbandigem Rauschen bestehen (vgl. VDV 2011b, S. 24). Kurvenquietschen ist charakterisiert durch tonhaltige Geräuschkomponenten sowie einer Pegelanhebung gegenüber dem Rollgeräusch um bis zu 35 dB(A). Diese Aussage gilt für den Maximalpegel L_{pAFmax} . Das Kurvenquietschen wird aufgrund seiner hohen Pegel und Tonhaltigkeit als ein besonders unangenehmes Geräusch im Bereich von Gleisbögen empfunden (VDV 2011a, S. 1). Hierbei kann es zu tonalen Frequenzen bis 10 kHz und Pegeln von über 100 dB(A) in direkter Nähe zum Fahrzeug kommen. Abbildung 26 zeigt

⁴ Der Anfahrwinkel α liegt in der horizontalen Schnittebene durch den Berührungspunkt Spurkranz und Schiene. Er ist der Winkel zwischen der Tangente an die Schiene im Berührungspunkt und der Rechtwinkligen zur Radachse (TR Sp, S. 5).

beispielhaft Schalldruckpegelverläufe an zwei Messpunkten während der Vorbeifahrt einer aus zwei Wageneinheiten zusammengesetzten Straßenbahn. Oberhalb der Schalldruckpegelverläufe ist die gesamte Straßenbahn mit acht Drehgestellen dargestellt. Deutlich ist die Zuordnung der Pegelanhebungen zu den einzelnen Drehgestellen zu erkennen. Quietschgeräusche traten hier nur an den vier ersten Drehgestellen der gesamten Fahrzeugeinheit auf. Trotz gleicher Fahrzeugeinheit verursachte der hintere Teil der gesamten Straßenbahn kein Quietschen. Dies zeigt sehr deutlich, dass das Quietschen auf viele unterschiedliche Ursachen zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 23).

Abbildung 26: Schalldruckpegelverläufe $L_{pAF}(t)$ während einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen



Die beiden Messpunkte (Mikrofone) hatten folgende Positionen: Messpunkt MP 5: 82 cm Abstand von der bogenäußeren Schiene, 33 cm über der Schienenoberkante (SO). Messpunkt MP 6: 82 cm Abstand von der bogeninneren Schiene, 33 cm über der Schienenoberfläche (SO).

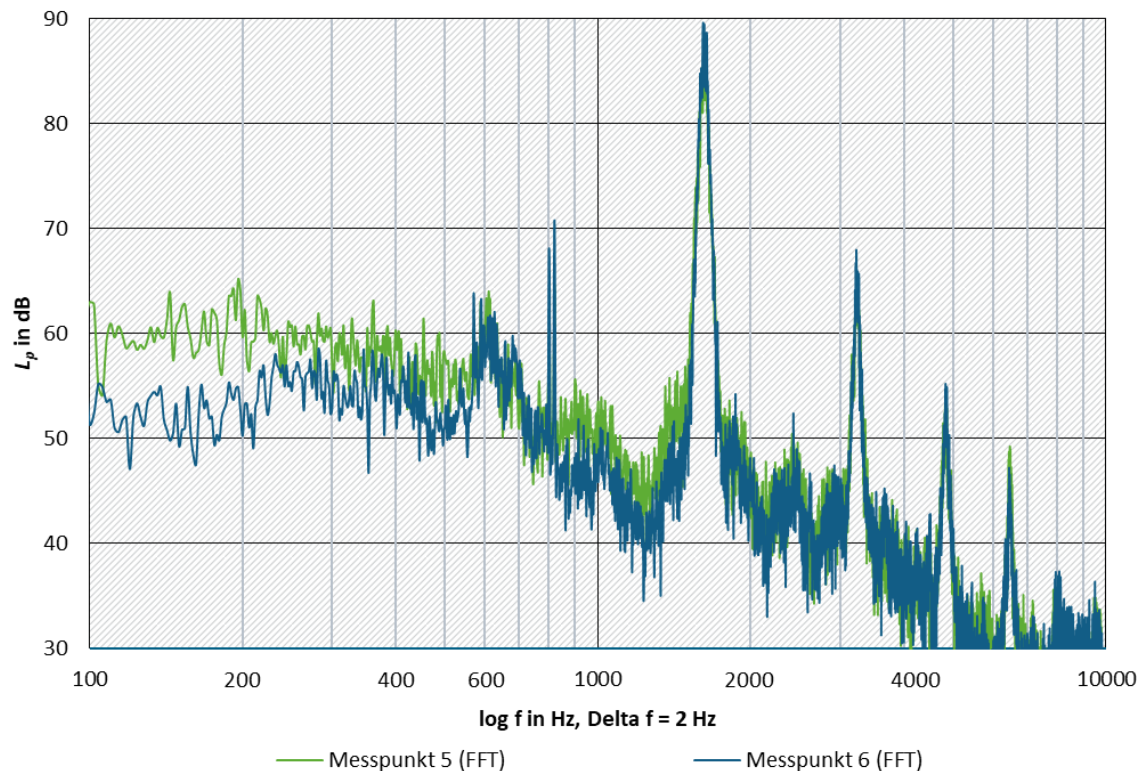
Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Im Innenbogenbereich (Messpunkt MP 6) wurde mit $L_{pAFmax} = 112,6 \text{ dB(A)}$ ein um 4,3 dB(A) höherer Pegel als im Außenbogenbereich (MP5) mit $L_{pAFmax} = 108,3 \text{ dB(A)}$ gemessen. Dies ist ein typisches Ergebnis. In der Regel werden Quietschgeräusche auf der Innenbogenschiene angeregt, da hier vorrangig die Stick-Slip-Effekte (Ruckgleiten) zwischen Rad und Schiene auftreten (vgl. Abschnitt 2.5.2.3.1).

In Abbildung 27 sind die Schmalbandspektren (FFT, Fast Fourier Transformation), für den in Abbildung 26 gelb markierten Bereich (Quietschen) dargestellt. Die Maximalpegel liegen hier bei rund 95 dB und bei einer Grundfrequenz von 1.620 Hz. Die Oberwellen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz) reichen bis näherungsweise 10 kHz. Zu beachten ist, dass in Abbildung 27 die Frequenzskala (Abszisse) logarithmisch für die Frequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz dargestellt ist.

Abbildung 27: Schalldruckpegel einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – Schmalbandspektrum

Schmalbandspektrum (FFT) für den in Abbildung 26 gelb markierten Bereich.



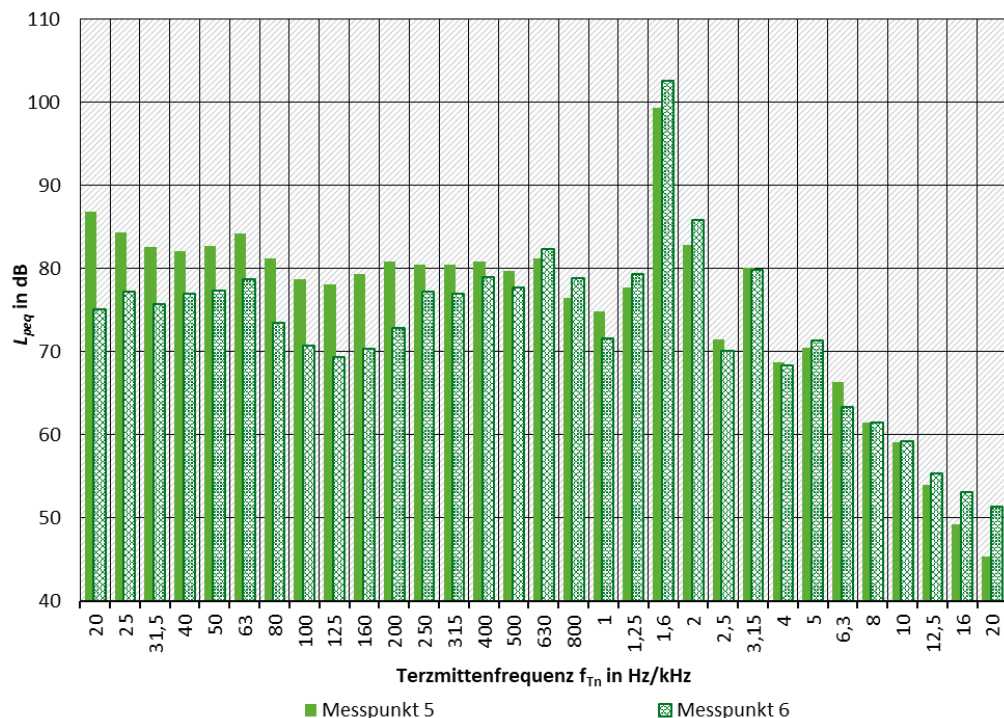
Quelle: Eigene Messung (STUVA)

In Abbildung 28 sind für den in Abbildung 26 gelb hinterlegten Bereich zwischen 4,3 Sekunden und 6,5 Sekunden Terzspektren dargestellt. In Abbildung 28 wird hiervon das unbewertete Spektrum, in Abbildung 29 das A-bewertete Spektrum dargestellt. Infolge der A-Bewertung dominieren die durch das Quietschen erzeugten Frequenzen (hier 1.600 Hz) im Spektrum besonders stark.

Anmerkung: Eine Terz wird beschrieben durch zwei Frequenzen, eine untere Frequenz f_u und eine obere Frequenz f_o , die in einem festgelegten Verhältnis zu einander stehen. Die Terz selbst wird durch ihre Mittenfrequenz f_m charakterisiert. Zum Beispiel gilt für die Terz 1.600 Hz $f_u = 1.410$ Hz, $f_o = 1.780$ Hz und $f_m = 1.600$ Hz.

Abbildung 28: Schalldruckpegel-Terzspektren einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – unbewertetes Spektrum $L_{peq}(f_{Tn})$

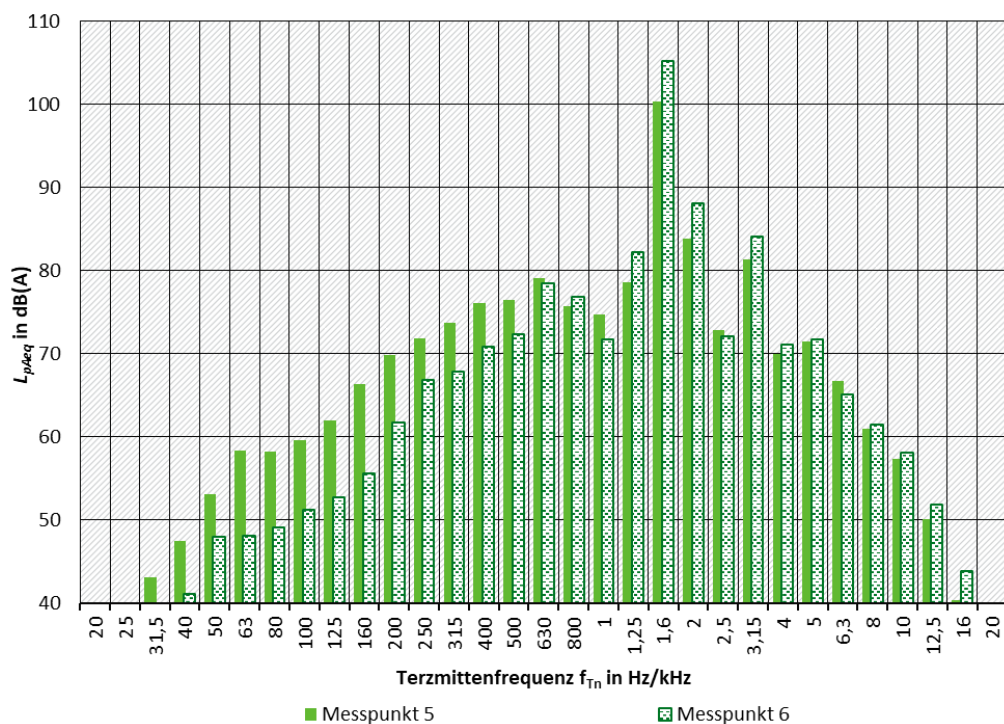
Vergleiche gelb markierter Bereich (zwischen 4,3 und 6,5 Sekunden Messdauer) aus Abbildung 26.



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Abbildung 29: Schalldruckpegel-Terzspektren einer Vorbeifahrt mit Quietschgeräuschen – A-bewertetes Spektrum $L_{pAeq}(f_{Tn})$

Vergleiche gelb markierter Bereich (zwischen 4,3 und 6,5 Sekunden Messdauer) aus Abbildung 26.



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

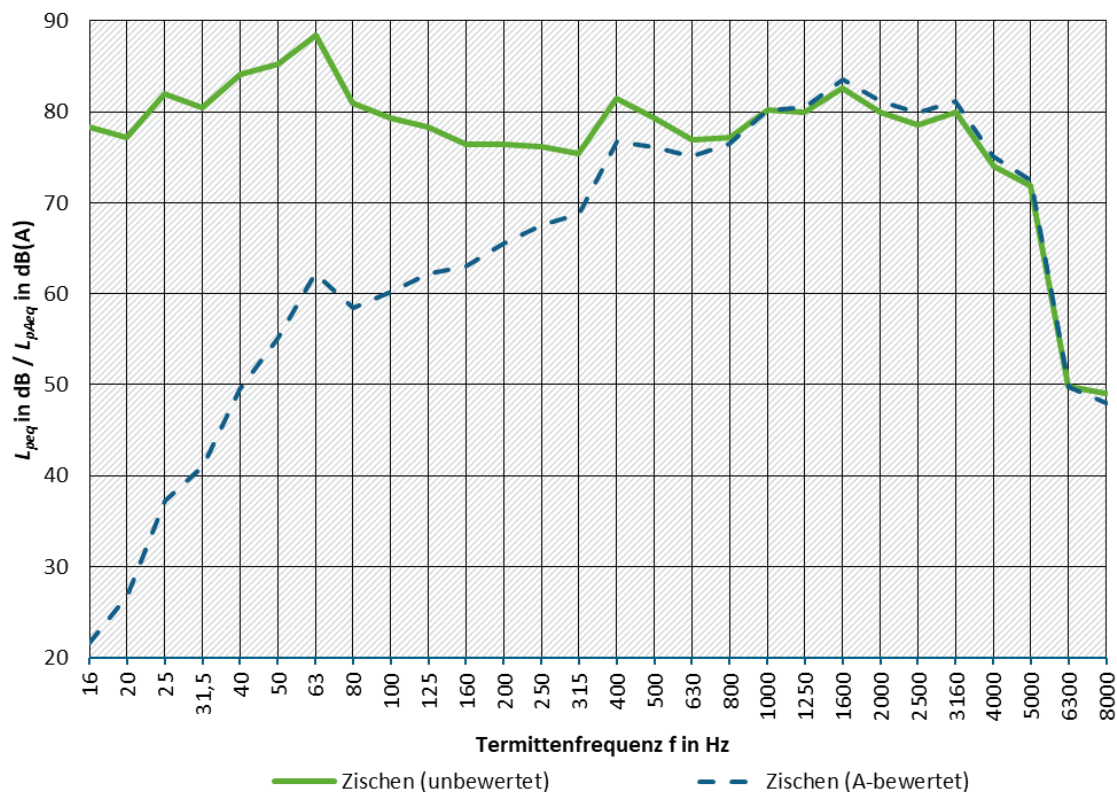
2.5.2.3.4 Zischen

Die Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene sind auch für das Auftreten von Zischgeräuschen maßgebend. Zischgeräusche werden durch Gleitreibung des Spurkranzes an der Fahrflanke der angefahrenen Schiene bzw. bei Rillenschienen auch an der Rillenflanke, erzeugt (Abbildung 22, rechtes Rad).

Zischgeräusche haben gegenüber Quietschgeräuschen einen geringeren maximalen Schalldruckpegel. Sie sind zudem im Spektrum breitbandiger und ohne stark ausgeprägte Einzelspitzen. Ein Beispiel für ein unbewertetes und A-bewertetes Schalldruckpegel-Terzspektrum mit Zischgeräuschen zeigt Abbildung 30.

Abbildung 30: Beispiel für ein Schallpegel-Terzspektrum beim Auftreten von Zischgeräuschen

Schallpegel-Terzspektrum unbewertet und A-bewertet.



Quelle: VDV 2011a, S. 4

2.5.2.4 Stoßgeräusche – Ursachen und Merkmale

Beim Überfahren von Stoßstellen (Lücken im Gleis), z. B. bei Gleiskreuzungen und Weichen, werden kurzzeitig große vertikale Kräfte im Rad-/Schiene-Kontaktbereich ausgelöst und beide Teile zu Körperschall angeregt der dann als Luftschall abgestrahlt wird (Krüger 2006b, S. 182).

Da die einzelnen Schienenstücke schweißtechnisch miteinander verbunden werden, treten dort in der Regel bei der Überfahrt keine Stoßgeräusche mehr auf. Diese Aussage gilt nur für ein gepflegtes Gleis, da Schweißverbindungen mit der Zeit ausgefahren werden können.

Stoß- oder Schlaggeräusche kommen insbesondere in folgenden Bereichen bzw. aufgrund folgender Störquellen vor:

- Herzstücke in Weichen (Herzstücklücken),

- ▶ Gleis-Kreuzungspunkte (Abbildung 31),
- ▶ Isolierstöße,
- ▶ Schweißverbindungen im (ungeschliffenen) Neuzustand oder nach längerem Befahren,
- ▶ Flachstellen an den Rädern,
- ▶ Auffahrungen, z. B. Kaugummi oder Asphalt, auf den Schienen- (insbesondere bei in Straßen verlegten Gleisen) oder auch auf den Radfahrflächen,
- ▶ bei verriffelten Schienen- und Radfahrflächen sowie bei
- ▶ unrunden Rädern (Polygone, siehe Abschnitt 2.5.2.2.1).

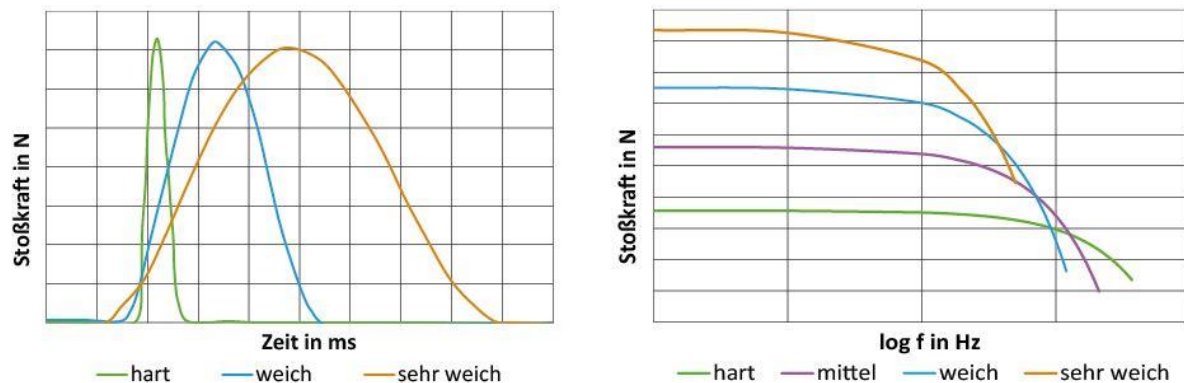
Abbildung 31: Beispiel für einen Kreuzungspunkt mit Rillenschienen und eine Stoßstelle aufgrund eines Schienenbruchs



Der Kreuzungspunkt wurde mit einer Flachrille ausgeführt. Dadurch kann ein hartes Stoßgeräusch bei der Überfahrt der Räder vermieden werden. Allerdings fahren die Räder auf dem Spurranz, was dort einen größeren Verschleiß bedingt. Fotos: Eigene Darstellung (STUVA)

Beim Überfahren von Schienenstößen, Weichen und Kreuzungen ist eine zusätzliche Geräuscentwicklung nahezu unvermeidbar. Durch die Stöße werden die Eigenfrequenzen der durch den Stoß angeregten Bauteile angeregt. Die Anregung umfasst dabei unterschiedliche Frequenzbereiche in Abhängigkeit von der Dauer („Härte“) des Stoßes (Abbildung 32 zeigt ein Beispiel für die Anregung mit einem Prüfhammer). Prinzipiell lassen sich diese Ergebnisse auch auf eine Stoßanregung im Rad-Schiene-Bereich übertragen. Da dort in der Regel jedoch mehrere Anregungen zusammenwirken, ist eine „saubere“ Trennung der Einflüsse nahezu unmöglich. Neben den Eigenfrequenzen der angeregten Bauteile ist auch die Stoßfrequenz selbst im Körper- und Luftschallsignal enthalten, z. B. Anregung durch verriffelte Schienenfahrflächen (Abschnitt 2.5.2.2.1).

Abbildung 32: Abhängigkeit der angeregten Frequenzbereiche von der Zeitdauer eines Stoßes



Links Darstellung der mittels eines Prüfhammers angeregten Stoßkräfte $F(t)$ mit unterschiedlichen Aufschlagtipps (hart, weich, sehr weich) im Zeitbereich. Der Aufschlagtip ist das elastische Element eines Prüfhammers mit dem ein Bauteil angeregt wird. Ein solcher Hammer hat einen eingebauten Kraftaufnehmer. Hiermit können die Stoßkräfte messtechnisch ermittelt werden. Rechts Darstellung der Stoßkräfte $F(f)$ im Frequenzbereich, Frequenz im logarithmischen Maßstab.

Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Krüger 2006b, S. 183)

Bei Schienenriffeln oder an Schienenstößen (Weichen, Schweiß- und Isolierstöße) sind gegenüber glatten Flächen Pegelerhöhungen bis zu 15 dB(A) möglich.

2.5.3 Antriebs- und Aggregatgeräusche

Neben den Rollgeräuschen infolge des Rad-/Schiene-Kontakts gehen vom Bahnbetrieb weitere Schallemissionen aus, die durch den Antrieb beziehungsweise das Bremsen der Fahrzeuge entstehen und Folge des Betriebs unterschiedlicher Aggregate oder technischer Einrichtungen sind. Diese Geräusche sind vornehmlich in Haltestellen oder im Bereich der Endhaltestellen von Bedeutung, da dort das Rollgeräusch in den Hintergrund tritt und zudem ggf. längere Haltezeiten der Fahrzeuge auftreten können.

Umfangreiche Schallmessungen haben ergeben, dass die Stärke der Schallemissionen in erster Linie von folgenden Faktoren abhängt (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 95).

- ▶ Fahrzeugmotoren und deren Steuerung (durch Umrichter), v. a. beim Beschleunigen und elektrischen Bremsvorgang (mit Energierückgewinnung),
- ▶ Getriebe (insbesondere bei „verschlissenen“ Getriebe),
- ▶ Lüfter zur Kühlung der Fahrmotoren sowie
- ▶ Klimaanlage (besonders problematisch bei längeren Haltezeiten an Endhaltestellen mit naheliegender Bebauung).

2.5.3.1 Antriebsgeräusche

2.5.3.1.1 Stromrichter, Fahrmotorenlüfter und Getriebe

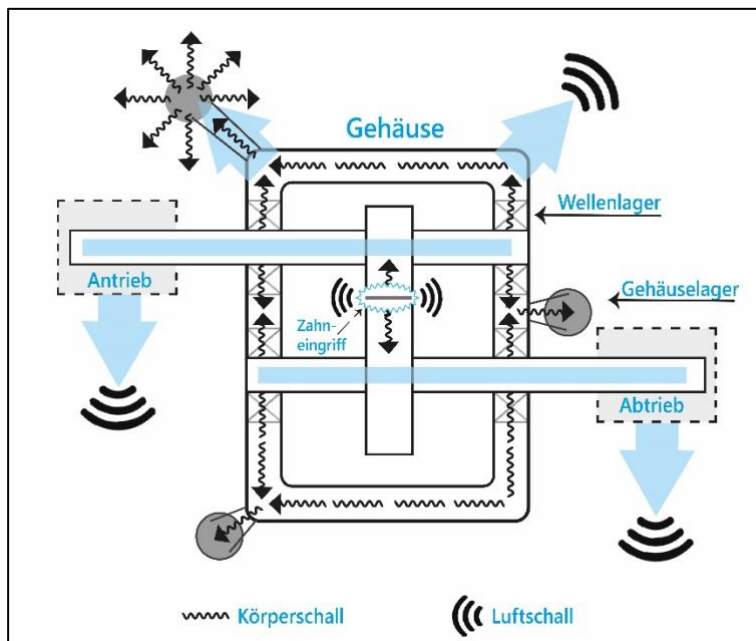
Antriebsgeräusche treten in der Regel nur bei anfahrenden oder bremsenden Fahrzeugen deutlich aus dem Rollgeräusch hervor, welches ab etwa 30 km/h dominierend ist. Antriebsstromrichter und Hilfsbetriebeumformer können tonalen Luftschall erzeugen. Sind Kühlventilatoren für die Motoren vorhanden, ergeben sich weitere Schallquellen, die insgesamt breitbandig sein können.

Die Art der Geräuschemission ist von der Art des Antriebs (d. h. der Art des Stromrichters) abhängig. So ist bei Drehstromantrieben GTO-Stromrichter (Gate-turn-off Thyristor, elektronischer Leistungs-Halbleiter zur Motorsteuerung elektrischer Antriebe) aufgrund diskret vorgegebener Pulsmuster in der Regel ein deutliches und tonal wahrnehmbares Geräusch zu hören, welches in der Tonart wechselt. Bei neueren Antrieben mit IGBT-Gleichrichtern (Insulated Gate Bipolar Transistor, elektronischer Leistungs-Halbleiter zur Motorsteuerung elektrischer Antriebe) wird der tonale Anteil durch permanente Änderung der Frequenzen verwischt, sodass sich ein breitbandiges Spektrum ergibt. Dies wird in der Regel als weniger störend wahrgenommen (vgl. VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 306).

Die Geräuschemission des Getriebes steigt mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit an. Die Höhe des Schallpegels steht in Abhängigkeit zur Größe der Abstrahlflächen (z. B. Getriebeglocke), da diese eine hohe Körperschallanregung bewirken können (vgl. Abbildung 33). Aufgrund der starken Abhängigkeit des Rollgeräuschs von der Fahrgeschwindigkeit wird das Getriebegeräusch in der Regel hierdurch übertönt. Deutlich hörbare Geräuschemissionen können sich allerdings ergeben, wenn ein Getriebeschaden vorliegt. Die Bauteile können dann zu hohem Körperschall angeregt werden, der als Luftschall abgestrahlt wird. Auch die Geometrie des Getriebegehäuses lässt sich akustisch optimieren.

Zudem spielt die Verzahnungsgeometrie eine entscheidende Rolle bei der durch das Getriebe erzeugten Schallleistung.

Abbildung 33: Schallentstehung und Weiterleitung im Getriebe



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Hensel et al. 2016)

2.5.3.1.2 Bremsgeräusche

Beim Bremsen von Schienenfahrzeugen können ähnliche Geräusche auftreten wie beim Kurvenquietschen. Bremsenquietschen lässt sich auf eine Erregung der Eigenfrequenzen der Brems Scheibe infolge der Reibkräfte zwischen dieser und dem Bremsbelag zurückführen (vgl. Berndt 1987). Aufgrund der dichten Haltestellenfolge in innerstädtischen Straßenbahnnetzen hat eine Verminderung des Bremsgeräusches eine hohe Bedeutung. Straßenbahnen werden jedoch bis runter auf etwa 5 km/h elektrisch gebremst, die mechanische Bremse ist somit nur bei sehr geringen Geschwindigkeiten wirksam.

2.5.3.1.3 Stromabnehmer

Geräusche von Stromabnehmern auf dem Dach der Fahrzeuge sind oftmals auf aerodynamische Geräusche zurückzuführen. Diese treten im Hochgeschwindigkeitsverkehr bei Geschwindigkeiten ab 200 km/h hörbar auf. Im Nahverkehr bei Streckenhöchstgeschwindigkeiten von maximal 80 km/h spielen sie keine Rolle und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

2.5.3.2 Aggregatgeräusche

2.5.3.2.1 Geräte für Heizung, Lüftung und Klima

Beim Betrieb von Straßenbahnen können für Hilfsantriebe stark wechselnde Betriebszustände auftreten. Bei Heizungs-, Klima- und Lüftungsgeräten sind die durch den Betrieb der jeweiligen Lüfter auftretenden Geräusche maßgebend. Gegebenenfalls bestehen weitere Geräuschquellen durch Kompressoren, z. B. für Klimageräte. Die Lüfterdrehzahlen oder der Betriebszustand des Kompressors und damit die Geräuschemissionen sind abhängig von der Kühlanforderung, z. B. infolge der Temperatureinstellung oder des Besetzungszustands der Fahrzeuge.

Die Aggregatgeräusche spielen vor allem bei längeren Haltezeiten, z. B. in Endhaltestellen oder Abstellanlagen, eine Rolle. Oberhalb einer Geschwindigkeit $v = 30 \text{ km/h}$ dominieren in der Regel die Rollgeräusche (Kapitel 2.5.2.2).

2.5.3.2.2 Türgeräusche

An den Haltestellen werden für den Nutzendenwechsel die Fahrzeugtüren geöffnet. Dies kann über eine zentrale Türsteuerung (Öffnen aller Türen) durch das Fahrpersonal oder auf Anforderung durch Nutzende (Öffnung der für den Nutzendenwechsel benötigten Türen) erfolgen.

Besonders störende Geräuschemissionen gehen von druckluftbetriebenen Türsystemen mit Außenschwingtüren aus. Bei diesen Türsystemen ist beim Öffnen der Türen ein lautes Zischgeräusch zu vernehmen. Dies entsteht, wenn (Druck-)Luft beim Öffnen der Türen schlagartig entweicht. Druckluftbetriebene Türsysteme werden zunehmend durch elektrisch betriebene Türsysteme (Außenschwenkschiebetüren) abgelöst, bei denen der Öffnungs- und Schließvorgang deutlich leiser erfolgt.

Zusätzliche Geräusche können durch Türschließsignale auftreten, die als Warnhinweis für Nutzende eingesetzt werden, wenn der Türschließvorgang beginnt.

2.5.4 Einfluss des Oberbaus

Die Stärke und Frequenz von Geräuschemissionen werden neben der Art des Fahrzeugs (hochflurig oder niederflurig) auch stark durch die Oberbauform beeinflusst (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 61). Bei einem schallharten Oberbau mit einer Asphalt- oder Betonoberfläche wird der angeregte Schall (Roll- oder Antriebsgeräusche) reflektiert. Dadurch erhöht sich der gesamte emittierte Schall um den reflektierten Schallanteil. Ist der Oberbau hingegen schallabsorbierend (Schotter oder begrünt), kommt es zu einer Minderung der Schallemissionen (Abbildung 34 und vgl. König 2016).

In Straßenfahrbahnen eingebettete Gleise mit Rillenschienen oder Feste Fahrbahnen mit rillenlosen Schienen können im Vergleich zum Schotteroberbau oder einem begrüntem Bahnkörper aufgrund der fehlenden Absorption um zwischen 3 dB(A) und 7 dB(A) erhöhte Schallpegel auftreten (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a). Abbildung 34 zeigt beispielhaft gemessene Schallpegelverläufe im Bereich eines Drehgestells eines Straßenbahnfahrzeugs bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h für drei verschiedene

Fahrwegarten (Gleis mit Asphaltedeckung, begrünter Bahnkörper mit hochliegender Vegetationsebene und Schottergleis). Die Bahnkörper befanden sich während der Messungen jeweils in einem durchschnittlich gepflegten Zustand, d. h. es waren keine Riffel oder sonstige Unebenheiten auf den Schienenfahrflächen vorhanden. Folgende gemittelte Schallpegel L_{pAm} wurden hierbei ermittelt:

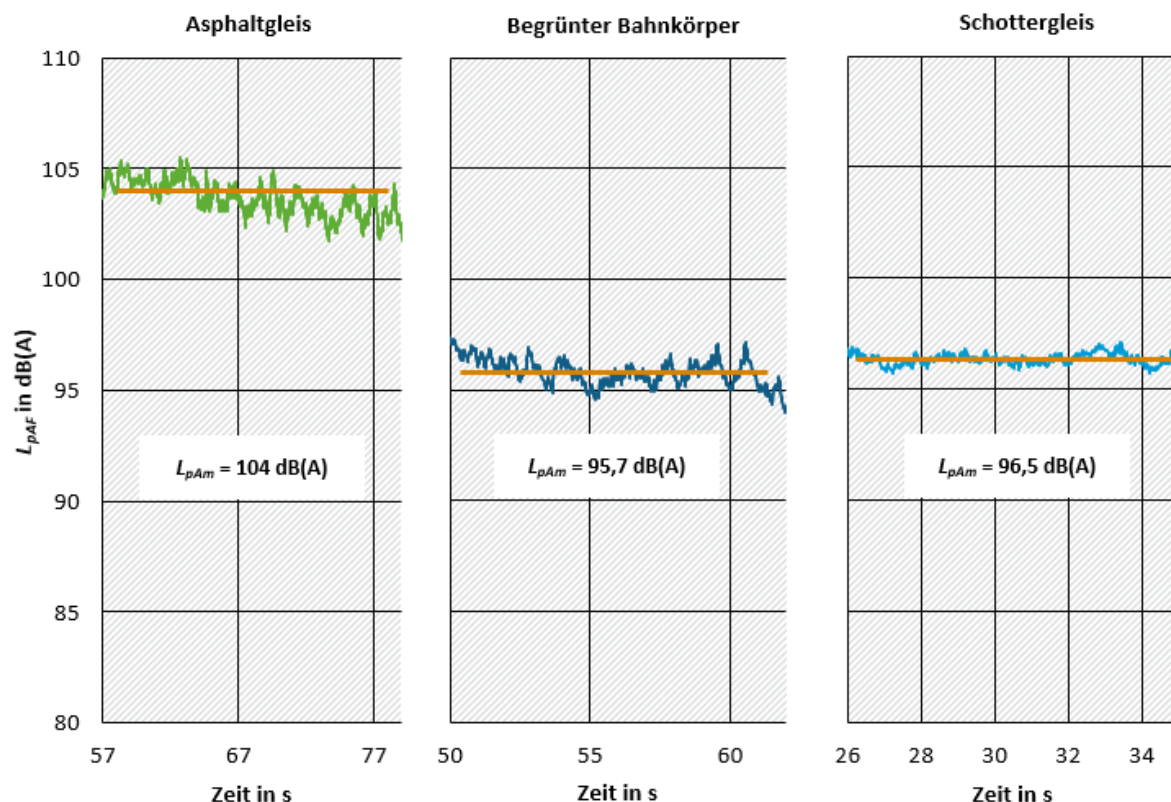
- Asphaltgleis (in die Fahrbahn eingebettetes Gleis): 104 dB(A),
- Begrünter Bahnkörper: 95,7 dB(A),
- Schottergleis: 96,5 dB(A).

Die Abbildung zeigt, dass bei diesen Messungen nahezu gleiche Mittelungspegel bei Fahrten auf einem Schottergleis und bei Fahrten auf einem begrünten Bahnkörper erzielt wurden. Dagegen wurden bei einer Fahrt auf einem eingebetteten Gleis (hier: Asphaltgleis) um ca. 6 dB(A) bis 8 dB(A) Schallpegel gemessen. Dies entspricht näherungsweise den Festlegungen in Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV zum akustischen Unterschied zwischen den genannten Fahrwegearten.

Abbildung 34 zeigt auch, dass sowohl beim Asphaltgleis als auch beim begrünten Bahnkörper deutlichere Pegelschwankungen auftraten als beim Schottergleis.

Abbildung 34: A-bewertete Schalldruckpegel $L_{pAF}(t)$ bei Fahrt auf verschiedenen Oberbauformen

Gemessen während Messfahrten unter einem Straßenbahnfahrzeug im Bereich eines Drehgestells bei Fahrt mit $v = 50 \text{ km/h}$ auf verschiedenen Oberbauformen in Freiburg im Breisgau.



Quelle: Eigene Messung (vgl. VDV und VDV-Förderkreis e. V. (Hg.) 2007, S. 445)

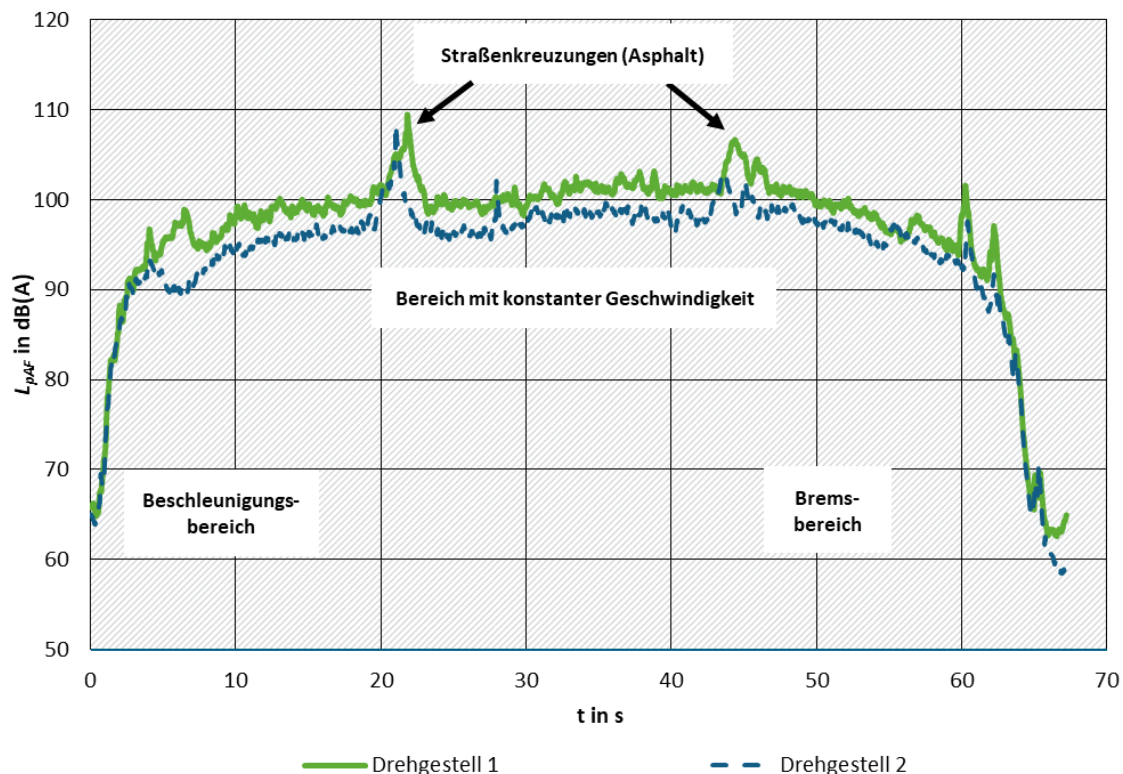
Da die Messungen kurz hintereinander mit demselben Fahrzeug erfolgten, können diese Pegelschwankungen auf unterschiedliche Rauheiten der Schienenfahrflächen zurückgeführt

werden. Die Pegel-Zeit-Signale zeigen zudem deutlich das Potenzial von glatten Schienenfahrflächen auf. Werden die unteren Pegel der beiden Fahrbahnarten Asphaltgleis und begrünter Bahnkörper betrachtet, dann ergeben sich für diese näherungsweise 2 dB(A) bis 3 dB(A) geringere Emissionspegel.

In der Regel ist ein besonderer Bahnkörper nicht kontinuierlich mit derselben Oberbauform auszuführen. Nach Abschnitt 2.1.2 liegt der besondere Bahnkörper im Verkehrsraum einer öffentlichen Straße. Dadurch ergeben sich zwangsläufig Kreuzungspunkte mit dem Individualverkehr (z. B. an Knotenpunkten oder Gleisquerungen für Kraftfahrzeuge, Rad- und Fußverkehr). Auch wenn die Gleise in ihrem überwiegenden Verlauf als Schotteroberbau oder als begrünter Bahnkörper ausgeführt werden und die Schallemissionen damit grundsätzlich gesenkt werden können, gibt es regelmäßig Abschnitte mit schallhartem Oberbau. Diese sind in der Regel in Asphalt- oder Betonbauweise oder Fertigteilen mit einer Lagerung der Schienen in Gummielementen ausgeführt. In diesen Bereichen ergibt sich somit abschnittsweise ein deutlicher Anstieg des Schalldruckpegels gegenüber den Abschnitten mit schallabsorbierendem Oberbau. Abbildung 35 zeigt beispielsweise das Ergebnis einer Schallmessung unterhalb eines Fahrzeugs beim Befahren eines begrünten Bahnkörpers und von zwei Straßenkreuzungen mit Asphalteindeckung. Beim Befahren der Straßenkreuzungen kam es zu Anhebungen der Maximalpegel L_{pAFmax} von 4 dB(A) bis 9 dB(A).

Abbildung 35: Auswirkungen eines schallharten und schallabsorbierenden Oberbaus auf den Schalldruckpegel

Am Beispiel von Überfahrten über asphaltierte Kreuzungsbereiche im Zuge eines begrünten Bahnkörpers (Messung in Bremen unter dem Fahrzeug im Bereich der Drehgestelle).



Darstellung des Schalldruckpegels L_{pAF} in Abhängigkeit von der Zeit. Die Zeit steht hier für einen befahrenen Gleisabschnitt. Bei diesen Messungen betrug die Geschwindigkeit der Straßenbahn zwischen ca. 0 km/h und 50 km/h. Die gemessenen Maximalpegel liegen zwischen ca. 106 dB(A) und 110 dB(A) beim Befahren von Asphaltgleisen. Bei Fahrt im Bereich der begrünten Bahnkörper liegen die Pegel im Mittel bei ca. 100 dB(A).

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

2.5.5 Sonstige sekundäre Schallquellen

Weitere Geräusche können auch als sekundäre Schallquellen in Form von Reflexionen an der Fahrbahn, an der Fahrzeugunterseite und an den Begrenzungsflächen in Tunneln und Trögen auftreten. Die Ausbreitungsbedingungen für Schall (z. B. Bodenoberfläche, Reflexionsmöglichkeiten) haben auch einen entscheidenden Einfluss auf den gesamten Schallemissionspegel, denn durch Mehrfachreflexionen kann es zu starken Schallpegelerhöhungen kommen (vgl. VDV 2011b, S. 3).

3 Wettbewerbliche Situation

3.1 Organisation des ÖPNV

In der Organisation des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) sind verschiedenste Handlungsakteurinnen und -akteure involviert und bilden ein eng verbundenes Geflecht. Die Europäische Union (EU) stellt dabei die oberste politische gesetzgebende Ebene dar. Für die Mitgliedsstaaten steckt die EU mit Verordnungen und Richtlinien den verkehrspolitischen Rahmen ab. Auf der nächsten Ebene folgen die Gesetze des Bundes, die die Europäische Ebene auf die nationale Ebene übertragen und Schwerpunkte setzen. Die ÖPNV-Gesetze der Länder bilden den eigentlichen Handlungsrahmen für die KVV. Daraus haben sich verschiedene Modelle der ÖPNV-Organisation ergeben, die auf kommunaler Ebene durch Nahverkehrspläne gesteuert und mit Praxisbeispielen angereichert werden.

Seit dem 03. Dezember 2009 regelt die Verordnung (EG) 1370/2007 die europaweite Wettbewerbsordnung und ist aus der Forderung zur Liberalisierung des ÖPNV-Marktes entstanden.

Die Richtlinie RL 2012/34/EU soll lediglich kurz erwähnt werden, da ihr Fokus vor allem auf dem Eisenbahnverkehr liegt. Die Richtlinie gilt als Basis für das novellierte Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) und war in der Europäischen Union (EU) zentraler Baustein zur Öffnung des Eisenbahnmarktes. Die zwei zentralen Bausteine waren die Trennung von Fahrweg und Betrieb sowie der diskriminierungsfreie Zugang zur Infrastruktur für Dritte.

Die drei gesetzlichen Eckpfeiler im Bund bilden

- ▶ das Regionalisierungsgesetz (RegG), welches seit dem 01. Januar 1996 in Kraft ist,
- ▶ das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG), welches die RL 2012/34/EU umsetzt und
- ▶ das Personenbeförderungsgesetz (PBefG), welches für den straßen- und schienengebundenen öffentlichen Personenverkehr gilt.

Alle drei Gesetze werden, falls erforderlich, an aktuelle EU-Gesetze angepasst und sind in ihrer letzten aktuellen Fassung gültig.

Mit ihren Landesnahverkehrsgesetzen regeln die Bundesländer die weiteren Zuständigkeiten bzw. die landesinterne Aufteilung der Finanzierungsmittel. Weitere Bausteine bei der Organisation des ÖPNV bilden die verschiedenen ÖPNV-Betreibermodelle und die Nahverkehrspläne der einzelnen Städte und Kommunen (vgl. König 2016). Auf die einzelnen Bausteine wird in den nächsten Seiten näher eingegangen.

Bei der Vergabe von Verkehrsleistungen im ÖPNV kommt die Verordnung (EG) 1370/2007 des europäischen Parlaments vom 23. Oktober 2007 über öffentliche Personenverkehrsleistungen auf Schiene und Straße zur Anwendung. Angemerkt sei, dass die Umsetzung der Verordnung (EG) 1370/2007 große Disparitäten zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten aufweist. Die Verordnung eröffnete verschiedene Möglichkeiten zur Vergabe von Verkehrsleistungen nach dem Prinzip des kontrollierten Wettbewerbs. Das wettbewerbliche Verfahren nach Art. 5 Abs. 3 der VO genießt dabei grundsätzlich Vorrang. Die Direktvergabe nach Art. 5 Abs.2 und Abs. 4-6 der VO ist nur in gesetzlich geregelten Ausnahmefällen zulässig. Bei allen Vergabeverfahren beschränkt sich die Verordnung (EG) 1370/2007 auf die Vorgabe wettbewerblicher Mindeststandards, um den Aufgabenträgern einen möglichst großen Handlungsspielraum zu gewährleisten. Darüber hinaus unterliegt die Verfahrensgestaltung dem Gestaltungsermessen

des Aufgabenträgers inkl. der genauen Vorgabe von Zuschlagskriterien. Lärmemissionsgrenzen können somit als Zuschlagskriterien vom Aufgabenträger definiert werden (vgl. König 2017a, 2017c).

Aus dieser Vergabeverordnung heraus ergeben sich vielfältige Vergabeformen hinsichtlich ihrer Unternehmens- und Vergabestruktur sowie ihre Organisation. Diese Struktur bzw. Organisation hat nicht nur einen Einfluss auf die getroffenen Entscheidungen bezüglich Investitions- und Betriebskosten, sondern erzeugt verschiedene Schnittstellen, an denen Übergabe- bzw. Umgangskriterien definiert werden können. Diese Kriterien umfassen beispielsweise die Pünktlichkeit, bestimmte Qualitätsanforderungen an das Fahrzeug wie Sauberkeit oder Personalbesetzung aber auch Anforderungen an das Fahrzeug bezüglich Lärmemissionen. Um besser zu verstehen, wie diese Entscheidungen in Richtung Lärminderung beeinflusst werden können, ist es sinnvoll, die verschiedenen Strukturen zu analysieren. Interessant ist es auch, die typischen Strukturen in Deutschland mit den in anderen europäischen Ländern zu vergleichen.

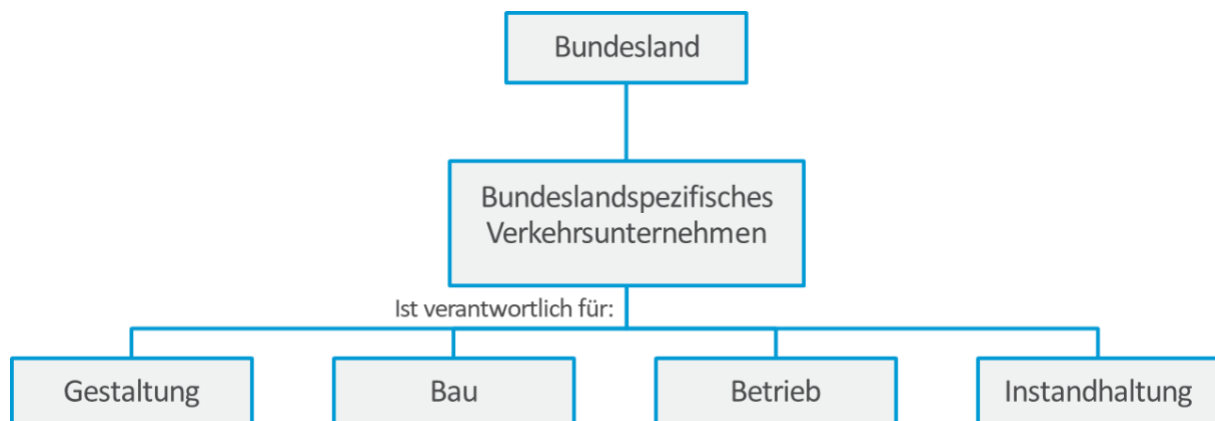
Die Aufgaben für den schienengebundenen ÖPNV können in vier Hauptbereiche aufgeteilt werden:

- a) Planung: von der strategischen Planung im frühen Stadium, bis zur Erstellung der Bauausführungspläne.
- b) Bau: der Fahrwege und Beschaffung der Fahrzeuge
- c) Betrieb: Erbringung von Verkehrsleistung
- d) Instandhaltung der Fahrwege und der Fahrzeuge

Das europäische Forschungsvorhaben Urban Track (Bearbeitungszeit 2006-2010) zielte auf die Harmonisierung der europäischen Straßenbahninfrastruktur und Instandhaltungsprozesse ab, um so die Lebenszykluskosten zu senken. Im Rahmen dieses Projekts wurden in vielfältigen Interviews drei Hauptorganisationsformen im schienengebundenen ÖPNV herausgearbeitet: ein integriertes Verkehrsunternehmen, mehrere teilintegrierte Verkehrsunternehmen sowie einer (nahezu) vollständigen Trennung der Aufgabenbereiche.

In einem integrierten Verkehrsunternehmen werden alle Aufgaben des ÖPNV von einem Unternehmen übernommen. Meistens gehört dieses Unternehmen zu 100 Prozent der öffentlichen Hand und ist für Planung, Bau und Beschaffung, Erbringung der Verkehrsleistung sowie Instandhaltung von Fahrzeug und Fahrweg verantwortlich (Abbildung 36).

Abbildung 36: Integriertes Verkehrsunternehmen im schienengebundenen ÖPNV

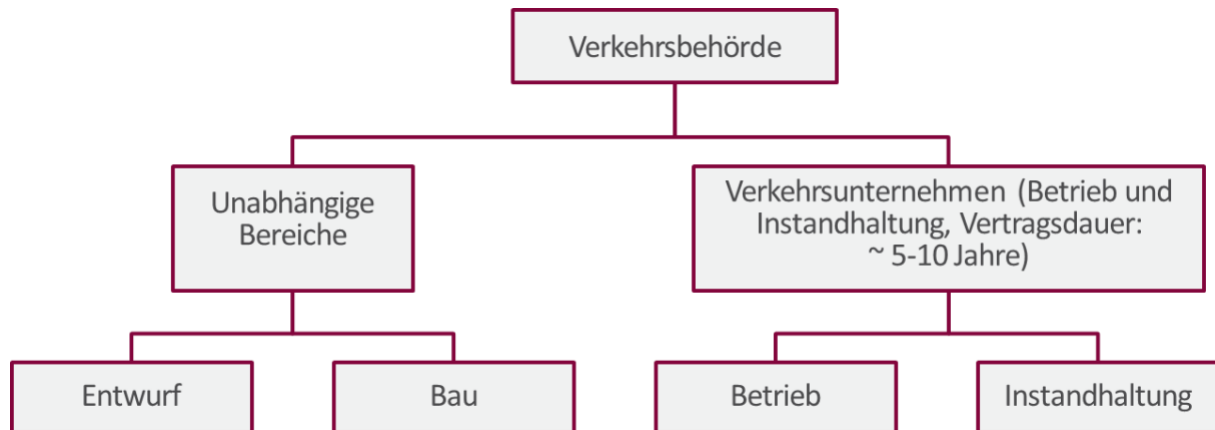


Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Rodriguez 2010, S. 21)

Einzelne Leistungen werden im Unterauftrag weiter vergeben bzw. Fahrzeuge beschafft oder die Erstellung des Fahrwegs vergeben. Der Aufgabenträger vergibt lediglich die Gesamtleistung des schienengebundenen ÖPNV an das integrierte Verkehrsunternehmen. In den deutschen Städten ist diese Struktur nahezu flächendeckend vertreten.

Bei einer teilintegrierten Organisationsstruktur vergibt der Aufgabenträger die Hauptaufgaben an Verkehrsunternehmen. Die Planung wird zum Teil direkt vom Aufgabenträger durchgeführt oder ebenfalls an ein Planungsbüro vergeben. Die Auftragnehmer können öffentliche oder private Unternehmen sein. Eine mögliche Organisationsstruktur ist in Abbildung 37 dargestellt.

Abbildung 37: Teilintegrierte Organisationsstruktur im schienengebundenen ÖPNV

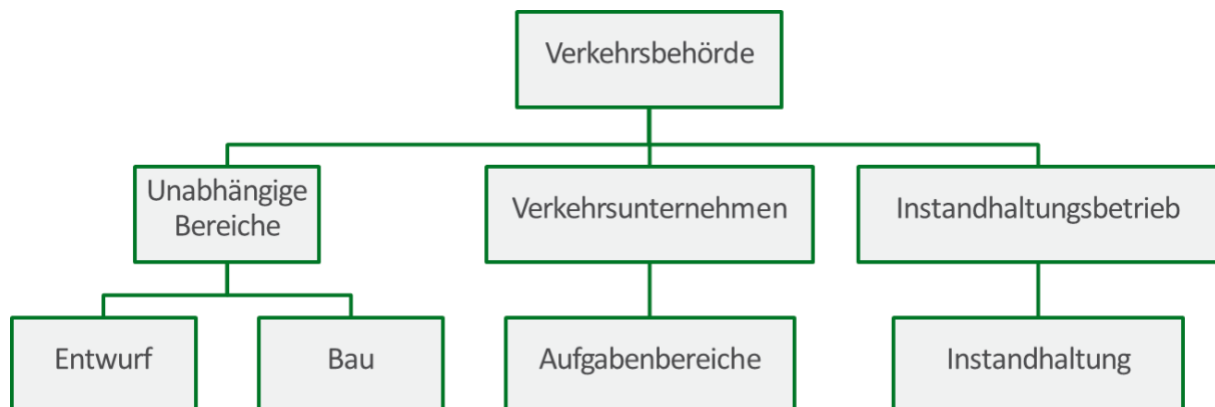


Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Rodriguez 2010, S. 22)

In diesem Fall hat der Aufgabenträger zwei Hauptverträge abgeschlossen: die Planungs- und Bauleistung wird von einem Konsortium erbracht und die für die Erbringung der Verkehrsleistung sowie die Instandhaltung von Fahrweg und Fahrzeug zeichnet sich ein anderes Unternehmen verantwortlich. Diese Verträge werden zeitlich begrenzt geschlossen.

In einer vollständig getrennten Organisationsstruktur (Abbildung 38) vergibt der Aufgabenträger mehrere Verträge für die Hauptaufgaben. Hierbei gibt es eine Vielzahl verschiedener Vergabeformen, teilweise sogar mit Trennung der Hauptaufgaben (Bau, Verkehrsleistung und Instandhaltung) in z. B. Instandhaltung Fahrweg und Instandhaltung Fahrzeug oder einer getrennten Beschaffung der Fahrzeuge durch den Aufgabenträger.

Abbildung 38: Trennung der Aufgabenbereiche im schienengebundenen ÖPNV



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Rodriguez 2010, S. 22)

In der Regel laufen die verschiedenen Verträge parallel. Bei dieser Organisationsstruktur liegt der Koordinationsaufwand beim Aufgabenträger, aber auch die Steuerungsmöglichkeiten über Definition von Vergabekriterien.

In der Europäischen Union sind die teilintegrierten und vollständig getrennten Strukturen vorherrschend, lediglich in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind vollintegrierte Verkehrsunternehmen die Regel.

Die Erfahrung zeigt, dass im Wesentlichen alle Organisationsformen gut funktionieren können. Sie führen aber zu unterschiedlichen Kosten für die Aufgabenträger, verschiedene Transparenzniveaus und der Einbeziehung und Koordinierung unterschiedlicher Akteurinnen und Akteure.

3.2 Marktsituation

Die Verordnung (EG) 1370/2007 ist gültig für den gesamten öffentlichen Personenverkehr auf Schiene und Straße. Hinsichtlich der Umsetzung der Verordnung zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten existieren jedoch große Disparitäten. Im Wesentlichen regelt die Verordnung (EG) 1370/2007 die Vergabe der Verkehrsleistungen. Die Verfahren sind wie folgt gegliedert:

- ▶ Wettbewerblichen Verfahren besitzen grundsätzlich Vorrang (Art. 5 Abs. 3 Verordnung (EG) 1370/2007).
- ▶ Direktvergaben sind nur in gesetzlich geregelten Ausnahmefällen möglich (Art. 5 Abs. 2 und Abs. 4-6 Verordnung (EG) 1370/2007).

Die Verordnung (EG) 1370/2007 beschränkt sich auf Vorgabe wettbewerblicher Mindeststandards. Die Verfahrensgestaltung unterliegt dabei dem Gestaltungsermessen des Aufgabenträgers inklusive der Vorgabe von Zuschlagskriterien.

Damit lässt die Verordnung Anforderungen an den Lärmschutz zu. So lautet es zunächst in Abschnitt 4 der VO, dass unter umweltpolitischen und raumplanerischen Faktoren der öffentliche Personenverkehrsdienst garantiert werden soll. Weiter lautet es im Abschnitt 17 der VO: „Gemäß dem Subsidiaritätsprinzip steht es den zuständigen Behörden frei, Kriterien und Qualitätskriterien festzulegen, um Qualitätsstandards für gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen aufrechtzuerhalten und zu erhöhen, beispielsweise bezüglich [...] des Umweltschutzes [...] an dem Ort, an dem der Dienst erbracht wird.“

Die Vergabeanforderungen müssen im EU-Amtsblatt nach Verordnung (EG) 1370/2007 vorab bekannt gemacht werden. Vergabeanforderungen beinhalten u.a.:

- ▶ Fahrplan,
- ▶ Beförderungsentgelt,
- ▶ Qualitätsstandards,
- ▶ Umfang: Netz, Teilnetz, Linienbündel,
- ▶ Verweis auf Nahverkehrsplan.

In Deutschland betreffen definierte Qualitätsstandards und deren Anforderungen unter anderem:

- Fahrzeugtypen,
- Schadstoffklassen,
- Ausrüstung.

Bei einer stichprobenartigen Untersuchung wurde dieses Mittel von den kommunalen Aufgabenträgern begrenzt genutzt. So fordert die Stadt Dresden als Aufgabenträger z. B. in ihrer „Vorabinformation zur beabsichtigten Direktvergabe eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags der Landeshauptstadt Dresden über die Linienbündel Straßenbahn Dresden und Bus Stadt Dresden als Gesamtleistung an die Dresdner Verkehrsbetriebe AG“ unter Abschnitt C, Absatz 5, Punkt 8 die „Errichtung der Betriebsanlagen insbesondere der Gleisinfrastruktur unter Maßgabe einer Vermeidung der Emission von Luft- und Körperschall und Einsatz geeigneter Oberbauformen, nach Möglichkeit unter Nutzung von luftschallmindernden Deckenschlussystemen (bspw. begrünter Bahnkörper), bedarfsweiser Einbau von Gleisbogenschmieranlagen“ (Landeshauptstadt Dresden 2015).

Die Vorabinformationen unter anderem der Städte Stuttgart (Landeshauptstadt Stuttgart 2016), Köln, Duisburg, Essen und Chemnitz weisen keine lärmindernden Anforderungen an die Infrastruktur auf. Des Weiteren lassen sich in keinem der genannten Dokumente detaillierte lärmindernde Anforderungen für Straßenbahnfahrzeuge finden.

Bereits in den Vorinformationen für öffentliche Dienstleistungsaufträge (öDa) können von Aufgabenträgern Anforderungen an den zukünftigen Betreiber in Bezug auf Lärmemissionsgrenzwerte im Rahmen von Qualitätsstandards oder mit Verweis auf den Nahverkehrsplan gestellt werden. Dieses erfolgt in Deutschland bisher jedoch kaum.

Während im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und Schienenpersonennahverkehr (SPNV) eine klare Trennung zwischen Infrastruktur und Betrieb vorliegt und sich in den letzten Jahren ein Wettbewerb in einigen europäischen Mitgliedsstaaten, unter anderem in Deutschland, etabliert hat, ist dies hingegen im schienengebundenen ÖPNV deutlich seltener der Fall und stellt eher die Ausnahme dar.

Dabei ist die Marktsituation im ÖPNV in der EU weitgehend in kommunaler und regionaler Aufgabenträgerschaft. In einigen Mitgliedsstaaten, wie Dänemark und Schweden, haben sich die Ausschreibung von ÖPNV-Leistungen und der Einsatz von wettbewerblich Vergabeverfahren langjährig eingespielt. So sind unter anderem bei neueren Straßenbahnbetrieben wie z. B. in Aarhus, Odense, Kopenhagen (alle Städte in Dänemark) und Tampere (Finnland) die Geschäftsfelder in zwei bis drei Verantwortungsbereiche untergliedert: Betrieb, Instandsetzung Infrastruktur und Instandsetzung Fahrzeuge. So betreiben in Aarhus unter anderem drei private Unternehmen im Auftrag von Midttrafik den Betrieb, die Fahrzeuginstandsetzung und die Infrastrukturinstandsetzung in eigenwirtschaftlicher Verantwortung.

Hingegen wird in Mitgliedsstaaten wie Frankreich der ÖPNV als klare staatliche Aufgabe angesehen und die öffentlichen Verkehrsunternehmen als ausführende Akteurinnen und Akteure staatlicher Planung (vgl. Eichmann 2006; ICLEI Europasekretariat 2004).

In Deutschland regelt das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) die entgeltliche oder geschäftsmäßige Beförderung von Personen mit Straßenbahnen, Oberleitungsbussen oder Kraftfahrzeugen im Linien- bzw. Gelegenheitsverkehr. Dabei regelt das PBefG den Geltungsbereich der Verordnung (EG) 1370/2007 und schränkt diesen teilweise ein).

Der eigenwirtschaftliche Betrieb genießt immer Vorrang nach PBefG (§ 8 Abs. 4 Satz 1 PBefG). Die Verordnung (EG) 1370/2007 greift erst dann wieder, wenn dies nicht möglich ist bzw. wenn

kein eigenwirtschaftlicher Antrag zur Erbringung der Verkehrsleistung eingegangen ist. Bei einem Antrag auf eigenwirtschaftlichen Betrieb darf der Antrag vom vorgesehenen Verkehrsangebot nicht wesentlich abweichen (§ 13 Abs. 2a PBefG) und der Betrieb muss gewährleistet werden. Beim Eingang von mehreren eigenwirtschaftlichen Anträgen findet ein Genehmigungswettbewerb statt. In diesem Fall erhält das Unternehmen mit dem besseren und wirtschaftlicheren Verkehrsangebot die Genehmigung von der Behörde. Aber auch für den eigenwirtschaftlichen Betrieb können Kriterien vorgegeben werden.

Im Hinblick auf die Rechtssicherheit bei Direktvergaben und der Selbsterbringung von Verkehrsleistungen von kommunalen Unternehmen hat das OLG Düsseldorf Fragen zur Anwendbarkeit der Verordnung (EG) 1370/2007 an den Europäischen Gerichtshof (EuGH) zur Beantwortung gerichtet (Lenz und Jürschik 2018). Der Gerichtshof antwortete daraufhin in ihrem Urteil vom 21. März 2019, dass nach Art. 5 Abs. 2 die Verordnung (EG) 1370/2007 auf die Direktvergabe von Verträgen über öffentliche Personenverkehrsleistungen mit Bussen nicht anwendbar ist, die nicht die Form von Dienstleistungskonzessionen annehmen, (EuGH, Urteil vom 21.03.2019). Dienstleistungsverträge mit Straßenbahnen unterliegen auch im Hinblick auf die Regeln zur Direktvergabe den neuen präziseren Vergaberichtlinien RL 2014/24/EU und RL 2014/25/EU, welche die alten Richtlinien 2004/17/EG und 2004/18/EG aufheben und ersetzen.

Das Regionalisierungsgesetz des Bundes (RegG) ist seit dem 1. Januar 1996 in Kraft. Politisch resultiert das in Artikel 106a des Grundgesetzes implementierte RegG aus der Gründung der Deutschen Bahn AG und der Regionalisierung des Schienenpersonennahverkehrs. Bis zu diesem Zeitpunkt waren kommunale und private Verkehrsunternehmen eigenverantwortlich für die Organisation, Planung und Durchführung des öffentlichen Verkehrs (ÖV) zuständig. Die Regionalisierung hatte zur Folge, dass die Zuständigkeiten auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene klar geregelt wurden. Durch die Aufgabendefinitionen der Daseinsvorsorge und die Begriffsdefinitionen im ÖV wurden weitere Klarheiten geschaffen.

Gemäß § 2 RegG handelt es sich bei einer auf der Schiene erbrachten Beförderungsdienstleistung um ein Angebot des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV), *„wenn in der Mehrzahl der Beförderungsfälle [...] die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt.“*

In § 2 RegG wird ebenfalls der ÖPNV definiert als *„allgemein zugängliche Beförderung von Personen mit Verkehrsmitteln im Linienverkehr, die überwiegend dazu bestimmt sind, die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr zu befriedigen“ und dabei „die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt.“*

Demzufolge wurde die Verantwortung des SPNV von Bundes- auf Landesebene delegiert. Somit sind seitdem die Bundesländer Aufgabenträger im SPNV. Im Gegenzug stattet der Bund die Länder mit Regionalisierungsmitteln aus. Im ÖPNV wurden die Kommunen zum Aufgabenträger bestimmt und sind seitdem für die Bestellung und Vergabe von ÖPNV-Dienstleistungen zuständig. Darüber hinaus regelt § 5 Abs. 3 RegG die Verteilung der Finanzmittel auf die jeweiligen Bundesländer nach einem prozentualen Verteilungsschlüssel.

Nach der Regionalisierung im Jahr 1996 wurden in den Bundesländern, mit Ausnahme der Freien und Hansestadt Hamburg, eigene bundeslandspezifische ÖPNV-Gesetze erlassen. Diese ÖPNV-Gesetze regeln in jedem Bundesland die Zuständigkeiten, Finanzierung und die Förderung des regionalen und kommunalen ÖV. In allen ÖPNV-Gesetzen der Bundesländer ist der ÖPNV zur Aufgabe der Kreise und kreisfreien Städte deklariert. Hingegen ist die Aufgabenträgerschaft im SPNV in einigen Bundesländern beim Land angesiedelt, in anderen Bundesländern bei regionalen Verkehrsverbünden oder kommunalen Zweckverbänden.

Die Aufgaben der Aufgabenträgerschaft beinhalten die Planung und Organisation eines Nahverkehrssystems, die Sicherstellung der Verkehrsleistungen durch die Betreiberinnen der öffentlichen Dienstleistungskonzession und die Sicherstellung der Einhaltung der Anforderungskriterien an die Betreiberinnen (vgl. König 2017b).

Die Aufgabenträger sind verantwortlich für die Planung, Organisation und Finanzierung des ÖPNV. Die Ziele, zeitliche Vorgaben und erforderliche Maßnahmen, werden seitens des Aufgabenträgers im Nahverkehrsplan formuliert. Ein wesentliches Element eines Nahverkehrsplans stellt die Umweltqualität dar, dieser kann den Themenbereich Lärmemissionen beinhalten (vgl. König 2017d).

Neben der marktrechtlichen Situation wird in Deutschland der kaum vorhandene Wettbewerb im schienengebundenen ÖPNV häufig mit den über Jahrzehnten gewachsenen Straßenbahn-Infrastrukturen mit ihren jeweiligen speziellen technischen Anforderungen an Gleis und Fahrzeuge als teilnormierte Inselsysteme begründet. Diese technischen Anforderungen können unter anderem die Spurweite, das Lichtraumprofil, die Elektrifizierung, das Richtungssystem, die Fahrzeugeinstiegshöhe und weitere technische Spezifikationen betreffen. Nicht nur aus diesem Grund vergeben die Aufgabenträger in Deutschland ihre Verkehrsleistungen im schienengebundenen ÖPNV Inhouse an die eigenen KVV, obwohl diese Verkehre in der Regel gemeinwirtschaftlich betrieben werden (vgl. König 2016).

3.3 Regulierung

Der Korrekturwert des Schienenverkehrslärms, auch als Schienenbonus bezeichnet, ging als Resultat aus verschiedenen sozio-akustischen Analysen in den 1970er und 1980er Jahren hervor. Der Korrekturwert 5 dB(A) war bei der Berechnung der Beurteilungspegel für Planfeststellungsverfahren für Neu- und Ausbauprojekt von Schienenstrecken anzusetzen. Dieser Bonus war in § 3 16. BImSchV verankert.

In den 1990er Jahren erfolgten weitere Lärmwirkungsstudien, die den Schienenbonus in Frage stellten. Die Ergebnisse dieser Studien führten schlussendlich zu dessen Abschaffung zum 1. Januar 2015. Für Stadt- und Straßenbahnen gewährte die gesetzgebende Instanz eine Übergangsfrist bis zum 31. Dezember 2018.

Im Nationalen Verkehrslärmschutzpaket II von 2009 wird ausgehend vom Jahr 2008, eine Halbierung des Schienenverkehrslärms bis zum Jahre 2020 angestrebt. Für den Straßenverkehr wird eine Minderung um 30 Prozent angestrebt. Spezifizierte Geräuschoptimierungen an Schienenfahrzeugen sind insbesondere für den Güterverkehr näher beschrieben. Im 3-Punkte-Strategie Papier des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zum Lärmschutz im Güterverkehr gilt insbesondere die Umrüstung von herkömmlichen Grauguss-Sohlen auf LL-Sohlen mit einem Reduktionspotenzial von insgesamt 10 dB(A) als vielversprechendste Maßnahme zur Schallverminderung an der Quelle (vgl. BMVBS 2009; BMVI 2016; Gerike 2016).

Für Stadt- und Straßenbahnen sind hingegen keine näheren Reduktionsziele erwähnt.

Auch bei der Lärmaktionsplanung ist eine Richtlinie auf EU-Ebene in Kraft, welche Auswirkungen auf den Bund sowie auf die Städte und Gemeinden hat. Mit der EU-Umgebungslärmrichtlinie gibt es erstmals einen gemeinsamen europäischen Ansatz zur Minderung der Lärmbelastung der Bevölkerung. Dabei werden nach vergleichbaren Verfahren Lärmschwerpunkte durch eine umfassende, strategische Lärmkartierung ermittelt (Umweltbundesamt 2019b).

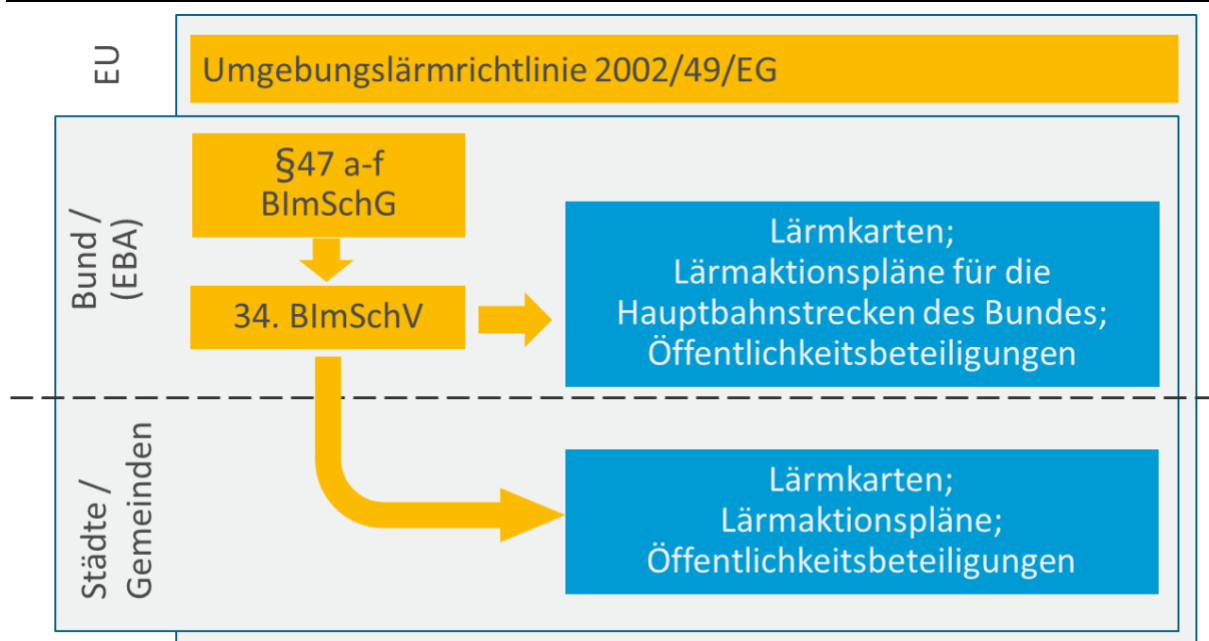
Mit der Änderung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) ging die Umgebungslärmrichtlinie in deutsches Recht über. Auf Grundlage des § 47f BImSchG trat am 16. März 2006 die „Verordnung über die Lärmkartierung“ (34. BImSchV) in Kraft. Diese regelt detailliert die Kartierung von Umgebungslärm und konkretisiert die Anforderungen an Lärmkarten nach § 47c BImSchG. Die Lärmkarten dienen als Grundlage für die Erarbeitung von Maßnahmen zur Minderung der Lärmbelastung der Bevölkerung in Lärmaktionsplänen (Ziel der Umgebungslärmrichtlinie) (Umweltbundesamt 2018a, 2018b).

Für die Erstellung der Lärmkarten und Lärmaktionspläne sind die Städte und Gemeinden oder die nach Landesrecht zuständigen Behörden verantwortlich, während das Eisenbahnbundesamt (EBA) bundesweit für die Hauptbahnstrecken des Bundes verantwortlich ist (Abbildung 39).

Erstellt werden müssen Lärmkarten und Lärmaktionspläne für

- ▶ Ballungsräume mit mehr als 100.000 Einwohnenden bei einer Dichte von 1.000 Einwohnenden pro Quadratkilometer,
- ▶ Hauptverkehrsstraßen mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 3 Mio. Kraftfahrzeugen pro Jahr,
- ▶ Haupteisenbahnstrecken mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 30.000 Zügen pro Jahr und
- ▶ Großflughäfen mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 50.000 Bewegungen pro Jahr.

Abbildung 39: Übersicht Einfluss der EU-Ebene auf die Lärmaktionsplanung in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

In Deutschland sind davon 70 Ballungsräume mit rund 24,4 Mio. Einwohnenden, 49.000 km Hauptverkehrsstraßen, 14.000 km Haupteisenbahnstrecken und alle elf Großflughäfen betroffen (Umweltbundesamt 2020).

Lärmkarten wurden in Deutschland erstmals 2007 erstellt, 2012 erfolgte die zweite und 2017 die dritte Stufe der Lärmkartierung. Mindestens alle fünf Jahre sind die Lärmkarten zu

überprüfen und bei Bedarf zu überarbeiten. Die daraus abgeleiteten Lärmaktionspläne (LAP) sind für alle kartierten Hauptverkehrsstraßen, Haupteisenbahnstrecken und Ballungsräume aufzustellen. Dabei sind Bereiche entsprechend der EU-Vorgaben Lärmbelastungen $L_{DEN} \geq 55$ dB(A) oder $L_{Night} \geq 50$ dB(A) zu berücksichtigen. In Deutschland wird dieses jedoch je nach Bundesland unterschiedlich ausgelegt.

Ist eine Maßnahme nach Fachrecht zulässig und rechtsfehlerfrei im Lärmaktionsplan aufgenommen, folgt die Umsetzung durch die Fachbehörde. Zum Beispiel in Baden-Württemberg prüft diese das Vorliegen der Tatbestandsvoraussetzungen. Liegen diese vor, ist sie zur Umsetzung der Maßnahme verpflichtet (Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 2018). In der übrigen Republik kann im Zweifelsfall die Straßenverkehrsbehörde des entsprechenden Bundeslandes die Kommune übersteuern.

Die folgende Abbildung stellt die Empfehlungen vom UBA zu Auslösekriterien für die Lärmaktionsplanung dar. Beim Überschreiten einer der beiden Werte des 24-Stunden Tag-Abend-Nacht-Lärmindeks L_{DEN} (DEN = Day/Evening/Night) oder des Nachtwertes L_{Night} wird eine Lärmaktionsplanung aus Sicht des UBA empfohlen (Tabelle 5, Umweltbundesamt 2018a).

Tabelle 5: Empfehlungen zu Auslösekriterien für die Lärmaktionsplanung

Umwelthandlungsziel	Zeitraum	L_{DEN}	L_{Night}
Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen	Kurzfristig	65 dB(A)	55 dB(A)
Vermeidung erheblicher Belästigungen	Mittelfristig	55 dB(A)	45 dB(A)
Vermeidung von Belästigungen	Langfristig	50 dB(A)	40 dB(A)

Quelle: Umweltbundesamt 2018a

In Übereinstimmung mit Artikel 6.2 der RL 2002/49/EG (Umgebungslärmrichtlinie) hat die Europäische Kommission 2012 gemeinsame Lärmbewertungsmethoden (Common Noise Assessment Methods in Europe, kurz: CNOSSOS-EU, vgl. European Commission 2012) für Straßen-, Eisenbahn-, Luftfahrzeug- und Industrielärm entwickelt, die nach der Annahme durch die Mitgliedstaaten zum Zwecke der strategischen Lärmkartierung gemäß Artikel 7 der RL 2002/49/EG gültig sind. Für die Gewährleistung der europaweiten Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde versucht eine Harmonisierung der Berechnungsverfahren vorzunehmen. Der Hintergrund dafür ist, dass Mitgliedstaaten Interimsverfahren oder national angepasste Verfahren für die Lärmkartierung verwenden können. Zukünftig sollen die EU-weit harmonisierten Lärmberechnungsmethoden der CNOSSOS-EU beachtet werden (Myck 2015).

Ein wichtiger Bestandteil der Lärmaktionsplanung ist das frühzeitige Einbeziehen aller Beteiligten (berührte Fachbehörden, Öffentlichkeit, sonstige Träger öffentlicher Belange). Diese sollen die Möglichkeit haben an der Ausarbeitung, der Überprüfung und der erforderlichenfalls erfolgenden Überarbeitung der Lärmaktionspläne mitzuwirken. Neben der Erarbeitung von u. a. Lärminderungsmaßnahmen, sind sie ebenfalls daran zu beteiligen, welche ruhigen Gebiete geschützt werden sollen (Umweltbundesamt 2018a; Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 2018).

In Deutschland verkehren in 70 Städten urbane Straßenbahnen. Im Jahr 2019 verfügen davon 40 Städte über mehr als 100 000 Einwohnenden und eine Bevölkerungsdichte von mehr als 1.000 Einwohnenden je Quadratkilometer. Diese Städte sind deswegen verpflichtet, im Lärmaktionsplan die Straßenbahnen zu berücksichtigen (Tabelle 6). Von den 30 übrigen Städten

verfügen bereits 21 ebenfalls über einen Lärmaktionsplan (und zwei erstellen zum Zeitpunkt des Gutachtens einen LAP. Die übrigen sieben Städte verfügen über keinen Lärmaktionsplan.

Tabelle 6: Übersicht über die Berücksichtigung von Straßenbahnen in der Lärmaktionsplanung

Status der Berücksichtigung in der Lärmaktionsplanung	Städte
Straßenbahn ist Bestandteil des Lärmaktionsplans	Augsburg, Berlin, Bielefeld, Bochum, Bonn, Braunschweig, Bremen, Chemnitz, Darmstadt, Dortmund, Dresden, Duisburg, Düsseldorf, Essen, Frankfurt am Main, Freiburg im Breisgau, Gelsenkirchen, Halle (Saale), Hannover, Heidelberg, Heilbronn, Karlsruhe, Kassel, Köln, Krefeld, Leipzig, Ludwigshafen, Magdeburg, Mainz, Mannheim, Mülheim an der Ruhr, München, Nürnberg, Oberhausen, Potsdam, Rostock, Saarbrücken, Stuttgart, Ulm, Würzburg
Straßenbahn ist nicht Bestandteil des Lärmaktionsplans	Bad Wildbad, Brandenburg an der Havel, Cottbus, Dessau, Döbeln, Eppelheim, Erfurt, Frankfurt an der Oder, Gera, Gotha, Halberstadt, Jena, Kehl, Leimen, Merseburg, Nordhausen, Schöneiche (bei Berlin), Schwerin, Strausberg, Woltersdorf, Zwickau
Städte mit Straßenbahn ohne Lärmaktionsplan	Bad Schandau, Grünwald, Naumburg (Saale), Plauen, Weil am Rhein, Witten, Wörth am Rhein

Quelle: Eigene Darstellung

3.4 Finanzierung und Förderung

In diesem Abschnitt soll das Augenmerk auf die verschiedenen Finanzierungsbestimmungen und Förderprogramme hauptsächlich von Bund und Ländern geworfen werden.

Auf Bundesebene gilt für die allgemeine Finanzierung das Gesetz über Finanzhilfen des Bundes zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse der Gemeinden (Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz – GVFG).

Der Bund regelt einen Teil der Finanzierung mit dem GVFG. Die Bundesmittel können dabei für verschiedene schienengebundene öffentliche Verkehrsprojekte beantragt werden, im Straßenbahnbereich jedoch nur für Neubauprojekte. Wartung und Instandhaltung von Straßenbahnprojekten sind nicht förderfähig. Des Weiteren werden nur Maßnahmen gefördert, die dem Grundsatz der Sparsamkeit und Wirtschaftlichkeit entsprechen.

Neben diesen Bundesmitteln stehen den Ländern Entflechtungsmittel nach dem Entflechtungsgesetz zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse zur Verfügung. Die Verteilung der Finanzierungsmittel obliegt nach der Föderalismusreform I gänzlich den Ländern.

Weitere Finanzierungsmittel stellen die Regionalisierungsmittel nach dem Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (RegG) dar. Die Finanzmittel stellen dabei sicher, dass der Bevölkerung eine ausreichende Bedienung mit Verkehrsleistungen im öffentlichen Personennahverkehr angeboten werden kann.

Die Auswertung der Fördertexte zu Fahrzeugen, Betriebshöfen und Infrastrukturanlagen hat ergeben, dass lediglich die Bundesländer Baden-Württemberg (LGVFG BW), Niedersachsen (NGVFG), Sachsen-Anhalt (VV-EntflechtG/Verkehr) und Schleswig-Holstein (GVFG-SH)

Schallgrenzwerte bzw. Lärm erwähnen. In den meisten Förderprogrammen spielt der Klimaschutz im Sinne der Kohlenstoffdioxidreduktion die dominierende Rolle.

Beispielhafte Auszüge der Verwaltungsvorschrift zum LGVFG BW (VwV-LGVFG):

- § 2 VwV-LGVFG Förderungsfähige Vorhaben, Absatz 2: Lärmschutzmaßnahmen an bestehenden Straßen in Baulast von Gemeinden, Landkreisen oder kommunalen Zusammenschlüssen, die an Stelle von Gemeinden oder Landkreisen Tragende der Baulast sind.
- § 3 VwV-LGVFG Voraussetzungen der Förderung, Absatz 1a: Voraussetzung für die Förderung nach § 2 LGVFG BW ist, dass das Vorhaben nach Art und Umfang zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse, der Lärmsituation oder der Luftsituation dringend erforderlich ist, die Ziele der Raumordnung beachtet und deren Grundsätze berücksichtigen,
- § 3 VwV-LGVFG Voraussetzungen der Förderung, Absatz 1b: Voraussetzung für die Förderung nach § 2 LGVFG BW ist, dass das Vorhaben in einem Generalverkehrsplan oder einem für die Beurteilung gleichwertigen Plan oder qualifizierten Fachkonzept vorgesehen oder als Lärmschutzmaßnahme in einem Lärmaktionsplan nach § 47 d Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) oder in einem Luftreinhalteplan nach § 47 BImSchG vorgesehen sein.

Ähnliche Formulierungen finden sich im niedersächsischen GVFG (NGVFG) und im GVFG-Schleswig-Holstein (GVFG-SH).

Möchte eine Vorhabenträgerin oder Vorhabenträger den vollständigen Förderrahmen gemäß GVFG ausschöpfen, ist für die Prüfung zur Förderfähigkeit von Investitionen ein Vorgehen nach dem Verfahren der Standardisierten Bewertung notwendig. Der Anwendungsbereich gilt für Maßnahmen ab einem Projektvolumen von 25 Mio. Euro für förderfähige Investitionen in ortsfeste Infrastruktur.

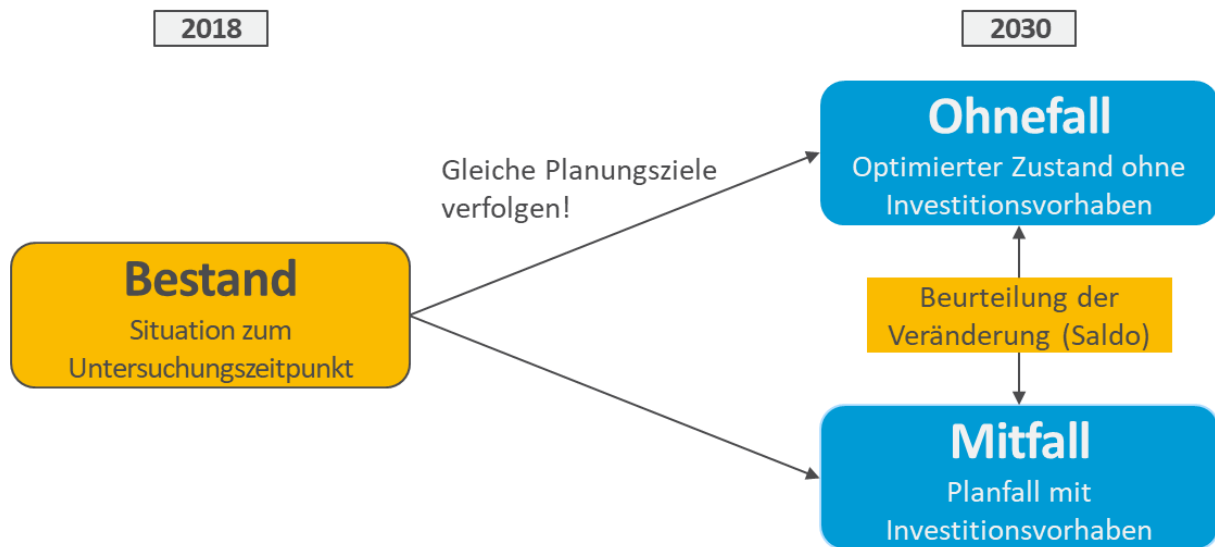
Das Vorgehen der standardisierten Bewertung erfolgt nach „mit- und Ohnefall“-Prinzip (Abbildung 40). Dabei werden vom Bestandszustand ausgehend Szenarien entworfen, die zum einen die Auswirkungen ohne Maßnahmen und zum anderen die Auswirkungen mit einer oder mehreren Maßnahmen untersuchen. Der Anwendungsbereich ist im Hinblick auf eine Geräuschbelastung möglich, jedoch nur als Ersatzmaßnahme für die bestehende Infrastruktur. Zurzeit schlagen Lärmschutzmaßnahmen als Belastungen (Kosten) in der standardisierten Bewertung zu Buche. Dadurch verringert sich der Nutzen-Kosten-Indikator. Eine monetäre Bewertung der Verbesserung durch die Lärmschutzmaßnahme kann stattfinden.

Innerhalb der EU, des Bundes und der einzelnen Bundesländer gibt es weitere spezifische Fördermaßnahmen zur Beschaffung von Fahrzeugen, Betriebshöfen und Infrastrukturanlagen. Diese unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander. Der alleinige Lärmaspekt ist jedoch selten ein Förderkriterium. Dominierend in der aktuellen Debatte sind die Reduzierung der Luftschadstoffbelastung und die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im ÖPNV.

Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen können Fördermittel von der EU aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) (2014-2020) beantragen. Dieser unterstützt, soweit die Förderkriterien eingehalten sind, sowohl Fahrzeuge als auch Infrastruktur. Individuellere Förderinitiativen wie JIVE (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe, Gemeinsame Initiative für Wasserstofffahrzeuge in Europa) sollen z. B. neue Antriebsformen bei Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs markt- und serientauglicher machen.

Finanzielle Förderungen auf Bundesebene gibt es z. B. für Fahrzeuge, wie das Nationale Innovationsprogramm (NIP) für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Abbildung 40: Standardisierte Bewertung – Mit-/Ohnefall-Prinzip



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Die einzelnen Bundesländer haben darüber hinaus in Richtlinien und Fördergesetzen Regelungen zur Finanzierung von Fahrzeugen, Betriebshöfen und Infrastruktur festgelegt. In Baden-Württemberg regelt die Richtlinie Schienenfahrzeugförderung (RL SFF) die Förderung von Schienenfahrzeugen, in Bayern die Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen des Freistaates Bayern für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV-Zuwendungsrichtlinien – RZÖPNV), etc.

Ein beispielhafter Auszug folgt aus der Richtlinie des Ministeriums für Infrastruktur und Landesplanung zur Senkung des CO₂-Ausstoßes im Verkehr (Rili Mobilität). Gemäß der Richtlinie sind energieeffiziente und klimafreundliche Antriebe im ÖPNV förderfähig, wenn bestimmte Kriterien eingehalten werden. Demnach gilt für Omnibusse, dass die Lärmemissionen maximal 75 dB(A) bei einer Motorleistung von höchstens 150 kW bzw. 77 dB(A) bei einer Motorleistung von mehr als 150 kW betragen dürfen. Alle Fahrzeuge sind mit lärmarmen Reifen auszurüsten, deren Rollgeräusche nach der Richtlinie RL 2001/43/EG einen Wert von 71 dB(A) bei Lenkachs- bzw. 75 dB(A) bei Antriebsreifen nicht überschreiten.

Die Richtlinie zeigt auf, dass lärmspezifische Grenzwertkriterien für ÖPNV-Fahrzeuge festgelegt werden können, um Fördermittel zu beantragen. Somit besteht auch für Straßenbahnen ein grundsätzliches Potenzial, lärmspezifische Förderkriterien festzulegen.

3.5 Relevante Akteurinnen und Akteure zur Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen

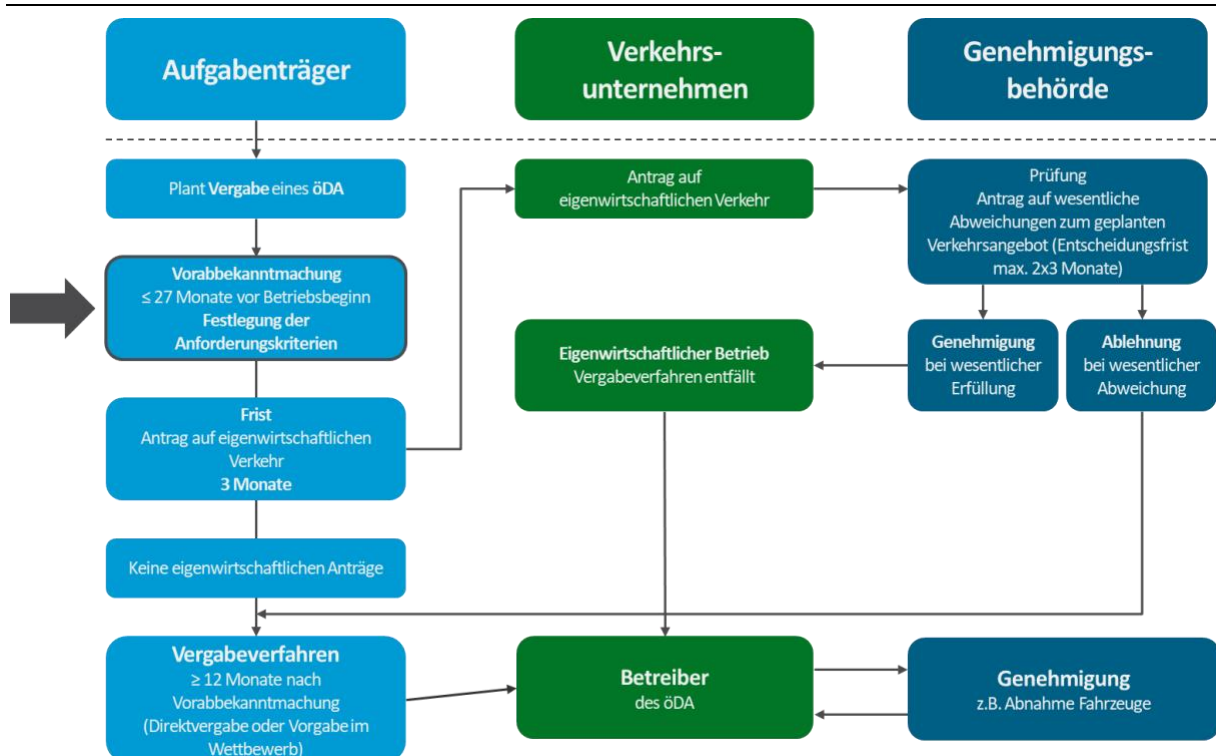
Den größten Handlungsspielraum halten die Aufgabenträger inne. Dies sind im ÖPNV die kreisfreien Städte, Kreise, Zweckverbände, Verkehrsverbünde oder teilweise auch die Länder. Die Aufgabenträger können Kriterien in unterschiedlichen Verträgen und Plänen definieren. Diese Kriterien können unter anderem im Nahverkehrsplan, in den Ausschreibungsdokumenten oder im finalen öffentlichen Dienstleistungsvertrag festgehalten werden.

Die weiteren Akteurinnen und Akteure, die Verkehrsunternehmen und die Genehmigungsbehörden, besitzen jeweils einen begrenzten Handlungsspielraum. Die Verkehrsunternehmen müssen dabei die Vorgaben der Aufgabenträger aus den Verträgen und Plänen konkret umsetzen. Der Handlungsspielraum begrenzt sich somit auf die Auswahl der konkreten Fahrzeuge, der Maßnahmen an der Infrastruktur oder der Maßnahmen im Betriebsablauf. Aufgrund der oft hohen Investitionskosten für lärm mindernde Maßnahmen fehlt ein ausreichendes Anreizsystem für Verkehrsunternehmen in diesen Aspekt zu investieren. Lediglich die Faktoren Imagegewinn und technischer Vorreiter könnten Anreize sein.

Auch die Genehmigungsbehörde hat einen mehr ausführenden und kontrollierenden Auftrag als die Festsetzung von Schallemissionsgrenzwerten. Die Behörde ist für die Abnahme von Neubaustrecken oder neuen Fahrzeugen verantwortlich und muss dabei auf die Einhaltung der Grenzwerte und Normen achten. Bei nicht einhalten von Grenzwerten kann somit die Genehmigungsbehörde die Betriebserlaubnis verweigern oder einschränken.

Zur Verdeutlichung des großen Handlungsspielraums der Aufgabenträgerseite ist in Abbildung 41 ein Vergabeablauf mit Zeitangaben in Deutschland schematisch dargestellt. Plant der Aufgabenträger eine Vergabe eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags (öDA), so werden mit der Vorabkennzeichnung mindestens 27 Monate vor Betriebsbeginn die Festlegung der Anforderungskriterien definiert. Bereits in diesem frühen Stadium der Vergabe können die Aufgabenträger verbindliche Lärmemissionsgrenzen für neue oder instandgesetzte Infrastruktur und Fahrzeuge im Stadt- und Straßenbahnbereich festlegen. Eigenwirtschaftliche und gemeinwirtschaftliche Verkehre müssen sich an die definierten Anforderungskriterien halten. Diese Einhaltung wird von der jeweiligen Genehmigungsbehörde kontrolliert.

Abbildung 41: Vergabeverfahren eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags für die Bestellung von Verkehrsleistungen in Deutschland – Schematische Darstellung



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Es bleibt festzuhalten, dass die Anforderungskriterien weit im Voraus der finalen Vergabe des öffentlichen Dienstleistungsauftrages erarbeitet und definiert werden müssen.

Im Bereich des ÖPNV mit Stadt- und Straßenbahnen in Deutschland herrscht auf Betreiberseite im Grunde kein Wettbewerb. In der Regel werden die städtischen oder kommunalen Verkehrsunternehmen durch die jeweiligen Aufgabenträger direkt mit der Erbringung der Verkehrsleistung betraut. Es handelt sich also um ein (natürliches) Monopol.

Es hat sich herausgestellt, dass die Aufgabenträger den vorhandenen Spielraum zur Lärminderung im Vergabeverfahren für öffentliche Dienstleistungsaufträge nicht immer nutzen, um (lärmspezifische) Vergabekriterien zu definieren. Eine Ursache kann darin liegen, dass Lärminderungsmaßnahmen kostenintensiv sind und in der Regel von Seiten des Aufgabenträgers direkt oder indirekt auch zu tragen sind.

Auf der anderen Seite stehen insbesondere die Städte im Attraktivitätswettbewerb untereinander. Lebenswertigkeit ist ein Standortvorteil, zu dem auch eine Minimierung der Lärmemissionen gehört. Folglich sollten die Aufgabenträger im Straßenbereich ein ureigenes Interesse in der Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen besitzen, ohne Straßenbahnen im Wettbewerb der Verkehrssysteme untereinander zu benachteiligen.

4 Rechtlicher Rahmen

4.1 Einleitung

Das klassische Instrumentarium der Ordnungspolitik ist die Festlegung von Schutzziele durch die Setzung von Geräuschgrenzwerten. Es lassen sich unterscheiden:

- ▶ Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrzeuge (Abschnitt 4.2),
- ▶ Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrwege (Abschnitt 4.3),
- ▶ Grenzwerte für die Geräuschimmissionen des Schienenverkehrs (Abschnitt 4.4).

Das Ordnungsrecht ist für die im deutschen Immissionsschutzrecht grundlegende Unterscheidung von Lärmvorsorge (Bau und wesentliche Änderung der Infrastruktur) und Lärmsanierung (Lärminderungsmaßnahmen an Bestandsstrecken) zu differenzieren.

Grenzen für die Geräuschemissionen können auch indirekt vorgegeben werden. In der deutschen Vorschrift zur Berechnung der Immissionen des Schienenverkehrs, der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV, werden z. B. im Abschnitt 3.2 Emissionsannahmen definiert, die sich auf den „durchschnittlichen Fahrflächenzustand“ beziehen. Implizit bedeutet dies, dass bei Zugrundelegung dieser Emissionsannahme ihre dauerhafte Einhaltung gewährleistet sein muss. Auch bei den Fahrzeugen geht die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV von durchschnittlichen Emissionen im realen Verkehr aus. Damit sind Wartungsvorkehrungen erforderlich, um diesen Zustand im Mittel sicherzustellen. Die indirekten Vorgaben der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV sollen deshalb auch zum ordnungsrechtlichen Instrumentarium gerechnet werden (Abschnitt 4.5).

Vorgaben für die Geräuschemissionen der Straßenbahnen können auch auf kommunaler bzw. regionaler Ebene konzipiert werden, z. B. in Form von Beschaffungsvorgaben und Wartungsaufträgen. Das dazu eingeführte Instrumentarium sind Nahverkehrspläne (NVP).

Richtlinien wie die VDV-Schrift 154 (VDV 2011b) zu den Geräuschen des Öffentlichen Schienennahverkehrs sind zwar nur Empfehlungen, sie beschreiben aber auch das, was die Verkehrsverbünde als wirtschaftsverträglichen Stand der Technik bei den Geräuschemissionen ansehen. Sie finden deshalb auch Eingang in die NVP

Zum Ordnungsrecht gehören schließlich auch Betriebsbeschränkungen des Schienenverkehrs zum Ziel der Minderung der Geräuschimmissionen, z. B.:

- ▶ Fahrverbote zu bestimmten schutzwürdigen Zeiten,
- ▶ Geschwindigkeitsbegrenzungen zur Minderung der Geräuschemissionen.

Ausnahmen von Betriebsbeschränkungen für leise Straßenbahnen liefern einen Anreiz, derartige Fahrzeuge zu beschaffen und einzusetzen, in der umweltpolitischen Diskussion werden derartige Regelungen als Benutzendenvorteile bezeichnet.

Schließlich kann auch die Verpflichtung zur Lärmaktionsplanung gemäß der EU-Umgebungslärm-Richtlinie (RL 2002/49/EG) dem Ordnungsrecht zugeordnet werden.

Bei der Bewertung des ordnungsrechtlichen Instrumentariums sind die Besonderheiten des Straßenbahnverkehrs in Deutschland zu beachten:

- Der Straßenbahnverkehr besteht fast ausschließlich aus integrierten Betrieben (Fahrzeuge, Infrastruktur) mit isolierten Netzen.
- Verbunden damit ist der fehlende Wettbewerb auf Verkehrsunternehmerischer Seite (in der Regel Vergabe der Verkehrsleistungen an kommunale Verkehrsunternehmen, z. T. gibt es Querfinanzierung durch andere kommunale Unternehmen).
- Zwischen den Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Genehmigungsbehörden bestehen in der Regel vielfältige und komplexe Rechtsverhältnisse (z. B. in Berlin), die bei der Gestaltung des ordnungsrechtlichen Instrumentariums zu beachten sind.

Auflagen zur Lärminderung müssen in einem „gerechten“ Gesamtkonzept für den Lärmschutz des gesamten Verkehrs gestaltet werden, damit keine Wettbewerbsverzerrungen zu Ungunsten der Straßenbahnen entstehen und das Ziel der Förderung des Umweltverbundes nicht gefährdet wird.

4.2 Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrzeuge

4.2.1 Definition

Grenzwerte für die Geräuschemissionen bestehen in der Regel aus Festlegungen von Schalldruckpegel in dB(A) und einem zugeordneten Messverfahren. Die nach diesem Messverfahren ermittelten Emissionen der Fahrzeuge dürfen den Grenzwert nicht überschreiten. Das Verfahren wird vorrangig bei der Zulassung von neuen Fahrzeugtypen eingesetzt.

4.2.2 Wirkung des Instruments

Mit der Setzung von anspruchsvollen Grenzwerten für die Geräuschemissionen der Straßenbahnen kann sichergestellt werden, dass alle technischen Maßnahmen zur Geräuschminderung umgesetzt werden, die dem jeweiligen Stand der Technik entsprechen, praktisch geeignet und wirtschaftlich verhältnismäßig sind. Sie stellen somit sicher, dass die Verursachenden der Geräuschbelastung alle Maßnahmen ergriffen haben, die ihnen zugemutet werden können (Verursacherprinzip)⁵. Als Maßnahme an der Quelle sind Emissionsgrenzwerte im gesamten Einsatzbereich der Produkte wirksam, sie reduzieren die Notwendigkeit von Maßnahmen auf dem Schallausbreitungsweg und am Immissionsort, die in der Regel weniger effizient und raumverträglich sind (Prinzip des Vorrangs quellenbezogener Maßnahmen).

Bekanntlich hängen die Gesamtemissionen des Straßenbahnbetriebs neben denen der Fahrzeuge auch vom Fahrweg ab (siehe Abschnitt 4.3). Ein schlechter Zustand der Fahrflächen z. B. kann gegenüber einer sehr glatten Schiene zu Pegelerhöhungen bis zu 20 dB(A) führen und damit Minderungsmaßnahmen am Fahrzeug wirkungslos machen.

Geräuschemissionsgrenzwerte für die Fahrzeuge müssen deshalb durch Vorgaben für die akustische Qualität des Fahrwegs ergänzt werden.

Es ist ferner bekannt, dass sich auch die Emissionen des Fahrzeuges mit der Zeit verändern können, z. B. durch eine Verschlechterung des Zustands der Radlaufflächen. Es sind deshalb Wartungsvorgaben erforderlich, die die (im Mittel) dauerhafte Einhaltung der

⁵ Vgl. dazu: „Die Umweltpolitik der Gemeinschaft zielt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gegebenheiten in den einzelnen Regionen der Gemeinschaft auf ein hohes Schutzniveau ab. Sie beruht auf den Grundsätzen der Vorsorge und Vorbeugung, auf dem Grundsatz, Umweltbeeinträchtigungen mit **Vorrang an ihrem Ursprung** zu bekämpfen, sowie auf dem **Verursacherprinzip**.“ (Artikel 191 AEUV).

Geräuschemissionsgrenzwerte sicherstellen. Diese können sich auf Kenngrößen beziehen, die eine einfache Überprüfung der Einhaltung ermöglichen, z. B. die Radrauheit.

4.2.3 Zuständigkeiten für die Festsetzung von Geräuschgrenzwerten

4.2.3.1 Europäische Union

Zuständig für die Festsetzung dieser Grenzwerte ist grundsätzlich die Europäische Union gemäß Artikel 114 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union (Konsolidierte Fassung von 2012, AEUV): „Das Europäische Parlament und der Rat erlassen gemäß dem ordentlichen Gesetzgebungsverfahren und nach Anhörung des Wirtschafts- und Sozialausschusses die Maßnahmen zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten, welche die Errichtung und das Funktionieren des Binnenmarkts zum Gegenstand hat.“

Speziell für die europäischen Eisenbahnnetze liefert Artikel 171 AEUV einen weiteren Rechtfertigungsgrund für die Zuständigkeit der EU: „Sie [die EU] führt jede Aktion durch, die sich gegebenenfalls als notwendig erweist, um die Interoperabilität der Netze zu gewährleisten, insbesondere im Bereich der Harmonisierung der technischen Normen“. Die EU hat dazu seit 1996 Richtlinien zur Interoperabilität der transeuropäischen Schienennetze erlassen. Den normativen Rahmen setzt dabei aktuell die Richtlinie RL (EU) 2016/797. Für die dort in Anhang II definierten Teilsysteme muss zudem eine Technische Spezifikation zur Interoperabilität (TSI) erstellt werden. Die RL (EU) 2016/797 definiert „grundlegende Anforderungen“, die das Eisenbahnsystem der Union. Diese müssen die Teilsysteme und die Interoperabilitätskomponenten einschließlich der Schnittstellen erfüllen. Dazu gehören auch Lärmschutzbestimmungen: „Konzeption und Betrieb des Eisenbahnsystems dürfen nicht zu einer Überschreitung der zulässigen Grenzwerte der vom System ausgehenden Lärmemissionen führen (siehe Anhang III Ziffer 1.4.4. in der RL (EU) 2016/797):

- in den in der Nähe einer Eisenbahninfrastruktur gelegenen Gebieten
- im Führerstand“.

Für den Straßenbahnbetrieb auf isolierten Netzen können selbstverständlich die Interoperabilitätsvorschriften nicht als Begründung für Geräuschvorgaben herangezogen werden. Europäische Geräuschvorschriften für Straßenbahnen müssten deshalb auf der Basis der EU-Zuständigkeiten für den funktionierenden Binnenmarkt und den Umweltschutz entwickelt werden, wie es bei den Fahrzeugen des Straßenverkehrs, Kfz-Reifen, Geräte und Maschinen, die im Freien betrieben werden, der Fall ist.

Die europäischen Geräuschemissionsgrenzwerte gelten aus Gründen des Bestandsschutzes bislang nur für neue und wesentlich geänderte Produkte. Mit der Richtlinie zur Interoperabilität von 2016 (RL (EU) 2016/797) ist eine Anwendung der TSI auch auf den Bestand zulässig.⁶

⁶ Artikel 4 RL (EU) 2016/797 Inhalt der Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität

„(3) In jeder TSI wird bzw. werden, soweit dies für die Verwirklichung der in Artikel 1 genannten Ziele dieser Richtlinie erforderlich ist, [...]

f) die Strategie zur Anwendung der TSI angegeben. Insbesondere sind unter Berücksichtigung der absehbaren Kosten und des absehbaren Nutzens sowie der voraussichtlichen Auswirkungen auf die betroffenen Beteiligten die zu erreichenden Etappen festzulegen, damit sich schrittweise ein Übergang vom gegebenen Zustand zum Endzustand, in dem die TSI allgemein eingehalten werden, ergibt. Ist eine koordinierte Anwendung der TSI — etwa entlang eines Korridors oder zwischen Infrastrukturbetreibern und Eisenbahnunternehmen — erforderlich, so kann die Strategie Vorschläge für einen stufenweisen Abschluss einschließen [...]

h) die für bestehende Teilsysteme und Fahrzeuge geltenden Bestimmungen angegeben, insbesondere in Bezug auf Aufrüstungen und Erneuerungen, und in diesen Fällen unter Angabe der Änderungsarbeiten, die einen Antrag für eine neue Genehmigung erforderlich machen.“

4.2.3.2 Deutschland

Falls die EU ihre Regelungskompetenz nicht wahrnimmt – z. B. im Fall isolierter Produktmärkte oder Verkehrsnetze – kann Deutschland auf der Basis des § 38 BImSchG „Beschaffenheit und Betrieb von Fahrzeugen“ Geräuschemissionsvorschriften erlassen: Mit § 38 Absatz 2 BImSchG werden Bundesumwelt- und Bundesverkehrsministerium ermächtigt, „durch Rechtsverordnung [...] die zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen notwendigen Anforderungen an die Beschaffenheit, die Ausrüstung, den Betrieb und die Prüfung [von Fahrzeugen]“ zu bestimmen.

Anforderungen an die Beschaffenheit von Fahrzeugen wenden sich an deren Hersteller oder Importeure, Anforderungen an den Betrieb in einer engen Interpretation des § 38 BImSchG an den „Fahrzeugführer bzw. Fahrzeughalter (hier: das Verkehrsunternehmen)“ (VDV 2008, S. 10). In einer erweiterten Anwendung des § 38 könnte auch das Infrastrukturunternehmen in die Regelung mit einbezogen werden, da es nicht unerheblich am Zustandekommen von schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche beteiligt ist.

4.2.4 Aktueller Stand bei der Festlegung von Geräuschgrenzwerten

Die EU hat Geräuschgrenzwerte für Straßenbahnen bislang nicht erlassen. Ebenso wenig hat Deutschland von der Ermächtigung des § 38 BImSchG Gebrauch gemacht. Eine Geräuschvorschrift für Schienenfahrzeuge gibt es allerdings seit 1993 in Österreich. Die damalige „Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über die Lärmzulässigkeit von Schienenfahrzeugen (Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung – SchLV)“ ist immer noch gültig und umfasst auch Straßenbahnen (§ 1). Sie definiert u. a. Außengrenzwerte für das Fahr- und Standgeräusch (z. B. Fahrgeräuschgrenzwert von 82 dB(A)⁷ für Straßenbahnen als elektrische Triebwagen in 7,5 Meter Entfernung bei Geschwindigkeiten nicht über 80 km/h). Die Vorschrift ist technisch veraltet, so wird für den Schienenzustand lediglich verlangt, dass die Schienenoberfläche riffelfrei und trocken sein muss. Zu beachten ist ferner, dass die Vorschrift vor dem Eintritt Österreichs in die EU am 01.01.1995 verabschiedet worden ist, für Mitgliedsstaaten ist die Entwicklung nationaler Regelungen nur im Einklang mit dem EU-Recht möglich.

Auf EU-Ebene wurden auf der Basis der EU-Richtlinie zur Interoperabilität (Richtlinie (EU) 2016/797) Geräuschemissionsvorschriften für sogenannte interoperable Schienenfahrzeuge entwickelt. Wenngleich diese auf Straßenbahnen nicht anwendbar sind, werden sie hier dennoch erläutert, da Struktur und Methodik der Vorschriften für interoperable Fahrzeuge prinzipiell auch für lokale Netze anwendbar sind (z. B. Messverfahren, Betriebszustände usw.) Die genannten Vorschriften wurden zunächst für solche des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems im Jahr 2002 (2002/735/EG), dann für Schienenfahrzeuge des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems im Jahr 2006 (2006/66/EG) eingeführt. Im Jahr 2014 wurden beide Vorschriften überarbeitet und zusammengefasst in der Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität TSI des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ (Verordnung (EU) 1304/2014). Die Grenzwerte für die Geräuschemissionen gehören zu einer Reihe von TSI für die transeuropäischen Bahnsysteme⁸. Für den technischen und geographischen Anwendungsbereich verweist die TSI des Teilsystems „Fahrzeuge - Lärm auf allgemeine fahrzeugbezogene TSI, z. B. auf die TSI für das Teilsystem „Fahrzeuge - Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Verordnung (EU)

⁷ Der vom VDV empfohlenen Außenwert für das Fahrgeräusch in der VDV-Schrift 154 (VDV 2011b) würde auf 80 km/h umgerechnet 81,7 dB(A) ergeben

⁸ Eine Zusammenstellung der TSI ist unter folgendem Link abzurufen:
https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/GesetzeundRegelwerk/TSI/TSI_Uebersicht.xls?__blob=publicationFile&v=20 (28.08.2020).

1302/2014). Letztere TSI schließt vom technischen Anwendungsbereich u. a. folgende Punkte aus:

- ▶ „Untergrundbahnen, Straßenbahnen und andere Stadt- und Regionalbahnsysteme“,
- ▶ „Netze, die vom übrigen Eisenbahnsystem funktional getrennt sind und die nur für die Personenbeförderung im örtlichen Verkehr, Stadt- oder Vorortverkehr genutzt werden“

Der geografische Anwendungsbereich dieser TSI ist das gesamte Eisenbahnnetz der EU. Die Geräuschvorschriften gelten für das:

- ▶ Standgeräusch,
- ▶ Anfahrgeschwindigkeit,
- ▶ Vorbeifahrtgeräusch,
- ▶ Innengeräusch im Führerstand

von folgenden Fahrzeugeinheiten:

- ▶ Elektrolokomotiven und Gleisbaumaschinen mit elektrischem Antrieb,
- ▶ Diesellokomotiven und Gleisbaumaschinen mit Dieselantrieb,
- ▶ Elektrotriebzüge (ETZ),
- ▶ Dieseltriebzüge (DTZ),
- ▶ Reisezugwagen,
- ▶ Güterwagen.

Die TSI des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ definiert in der aktuellen Version keine eigene Messvorschrift, sondern verweist auf die internationale Norm DIN EN ISO 3095 „Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen“. In dieser Norm ist auch das Referenzgleis mit Anforderungen an die „akustisch relevante Schienenrauheit und die Dämpfungsraten“ definiert. Das Referenzgleis ist ein relativ leises Gleis, damit die Geräuschemissionsmessung möglichst wenig von den Fahrbahneigenschaften beeinflusst wird. Damit sind aber auch die Typprüfemissionen in der Regel niedriger als die realen Emissionen auf dem Netz. Die DIN EN ISO 3095 ist grundsätzlich auch für Straßenbahnen anwendbar. Für eine Geräuschvorschrift für Straßenbahnen müssten deshalb im Wesentlichen die Geräuschgrenzwerte festgelegt werden.

Die TSI des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ definiert keine akustisch bezogenen Instandhaltungsvorschriften, diesbezügliche Anforderungen sind für die Teilsysteme „Fahrzeuge“, z. B. in der Verordnung (EU) 1302/2014 beschrieben. Die Vorschrift gilt grundsätzlich nur für Neufahrzeuge. Werden Fahrzeuge erneuert oder umgerüstet, gelten Sonderregelungen.

Aktuell ist aber im Rahmen einer europäischen Strategie zur Minderung des Schienengüterverkehrslärms die Anwendung der Geräuschgrenzwerte der Güterwagen auch für die bestehende Flotte eingeführt worden. Am 16.05.2019 hat die EU-Kommission eine entsprechende Änderung der TSI Fahrzeuge Lärm beschlossen (Durchführungsverordnung (EU)

2019/774), Danach ist für Güterwagen, die der TSI-Geräuschvorschrift nicht genügen oder keine „leiseren Bremssohlen“ haben – also die graugussklotzgebremsten Wagen – grundsätzlich der Betrieb auf den so genannten „Leiseren Strecken“ ab dem 08. Dezember 2024 untersagt (allerdings mit zahlreichen Ausnahmen). Leiserer Strecken sind alle Schienenstrecken mit einer Minimallänge von 20 km, auf denen nachts durchschnittlich mehr als zwölf Güterzüge fahren. Grundsätzlich ist damit auch auf europäischer Ebene möglich, Geräuschvorschriften für den Fahrzeugbestand einzuführen. Das gilt dann theoretisch auch für Straßenbahnen.

4.2.5 Initiativen für eine Geräuschemissionsvorschrift für Straßenbahnen

Die 57. Umweltministerkonferenz (UMK) am 29./30.11.2001 hatte den folgenden Beschluss gefasst (Umweltministerkonferenz 2001):

„Die UMK bittet die Bundesregierung, möglichst umgehend zur Reduzierung der Geräuschemissionen von Straßenbahnen eine Initiative in der Europäischen Gemeinschaft zu ergreifen, damit anspruchsvolle Emissionsgrenzwerte gemeinschaftsweit durch eine Richtlinie festgelegt werden“. Das Umweltbundesamt hat daraufhin im Auftrag des BMU ein so genanntes Memorandum vorbereitet, das – in Abstimmung mit dem BMVI die Grundlage einer entsprechenden Initiative Deutschlands bei der Europäischen Kommission sein sollte.

Die Europäische Kommission hat dann Ende 2004 einen Richtlinienentwurf zur umfassenden Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Einrichtungen des städtischen schienengebundenen Personennahverkehrs vorgelegt (European Commission 2004), mit dem die Hindernisse des freien Warenverkehrs durch eine Harmonisierung der einzelstaatlichen Rechtsvorschriften beseitigt werden sollten. Dabei sollte wegen des Ziels einer nachhaltigen Verkehrspolitik der Gemeinschaft auch auf eine Verringerung der Umweltauswirkungen des Verkehrs hingewirkt werden. Neben der allgemeinen technischen Harmonisierung waren deshalb auch Grenzwerte für Außengeräusche, Innengeräusche und für Erschütterungen nach außen vorgesehen.

Die Kommission hat in einer öffentlichen Konsultation von Dez. 2004 bis März 2005 die Regulierungsphilosophie des Richtlinienentwurfs bewerten lassen. 190 Personen und Einrichtungen⁹ haben daran teilgenommen. Zentrale Aussagen des Berichts der EU-Kommission (European Commission 2005) waren:

- Die Frage „Sollte die Kommission anstreben, das Funktionieren des Binnenmarkts für den Sektor zu verbessern?“ haben 54,7 Prozent der Teilnehmenden verneint, 4,1 Prozent haben mit Ja geantwortet.
- Bezüglich der Frage, wodurch eine Verbesserung des Binnenmarkts erreicht werden könnte,
 - plädieren 29,5 Prozent für „EU Legislation“,
 - aber 49,5 Prozent bevorzugen eine Harmonisierung von Normen.

Die Europäische Kommission hat deshalb 2011 das Normungsmandat M/486 gestartet (European Commission 2011). Harmonisierte europäische Normen für den „Urban Rail“-Sektor – deren Anwendung freiwillig ist – sollen diesen wettbewerbsfähiger machen und zu einer

⁹ Unter den 190 Teilnehmenden waren 68 Privatpersonen aus elf Ländern und 122 Institutionen und Organisationen aus 15 Ländern. 56 Prozent der teilnehmenden Bürgerinnen und Bürger und 58 Prozent der Institutionen/Organisationen kamen allein aus Deutschland. Es nahmen 60 Verkehrsunternehmen, 15 Hersteller und 27 Regierungsorganisationen auf lokaler und nationaler Ebene teil.

klimaschützenden Verlagerung vom Motorisierten Individualverkehr (MIV) auf die Schiene beitragen.

Normen können allerdings keine verbindlichen Geräuschvorschriften ersetzen, da letztere das Ergebnis eines politischen Entscheidungs- und Abwägungsprozesses (technische Machbarkeit versus wirtschaftliche Vertretbarkeit) und damit demokratisch legitimiert sind. Sie haben deshalb grundsätzlich den Vorrang vor Normen. Normen können aber einen wichtigen Beitrag zur Festlegung eines nach Fahrzeugklassen und Betriebszuständen (siehe Abschnitt 4.2.6.2) differenzierten Messverfahrens in Emissionsvorschriften leisten. Sie können dann integraler Bestandteil der Geräuschvorschriften und in der Entstehungsgeschichte diesen vorgelagert sein.

4.2.6 Gestaltungserfordernisse und -optionen

4.2.6.1 Grenzwerte und Messverfahren

Die Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte – z. B. bei der Zulassung von Straßenbahntypen – erfolgt i. d. R. messtechnisch auf einer Prüfstrecke unter definierten Bedingungen. Grenzwerte und zugeordnete Messvorschrift bilden eine Einheit. Die Messvorschrift muss den folgenden Ansprüchen genügen:

- ▶ Sie muss zu akkuraten Ergebnissen führen.
- ▶ Die Messergebnisse müssen reproduzierbar sein
- ▶ Die Umgehung der Grenzwertvorschriften durch Wahl besonderer Betriebszustände oder Prüforten muss verhindert werden.
- ▶ Die Prüfbedingungen müssen entweder repräsentativ für die realen Betriebszustände oder eindeutig auf reale Emissionen transformierbar sein.
- ▶ Prüfverfahren sollen wirtschaftlich vertretbar sein.
- ▶ Die Verfügbarkeit von ausreichenden Prüforten ohne große Transportwege muss gewährleistet sein.

4.2.6.2 Betriebszustände, Fahrsituationen

Beeinträchtigungen durch Geräusche des Straßenbahnbetriebs hängen von dem jeweiligen Betriebszustand oder Straßenbahnabschnitt ab. Auch die Minderungsmaßnahmen unterscheiden sich für die verschiedenen Fahrsituationen (z. B. Maßnahmen gegen das Kurvenquietschen.).

Grundsätzlich sind alle relevanten Betriebszustände bzw. Geräuschquellen zu berücksichtigen bzw. zu begrenzen, im Wesentlichen:

- ▶ Geräusche bei Konstantfahrt auf gerader Strecke („Fahrgeräusch“),
- ▶ Anfahrgeräusche,
- ▶ Standgeräusch,
- ▶ Geräusche bei Kurvenfahrten – diese sind ein besonderes Problem bei den Straßenbahnen,
- ▶ Bremsgeräusche,

► Innengeräusche.

4.2.6.3 Anwendungsbereich

Geräuschgrenzwerte werden aus Gründen des Bestandsschutzes in der Regel nur für Neufahrzeuge festgesetzt. Bei Fahrzeugen des Bestandes steht zudem nur ein begrenztes Repertoire an Maßnahmen mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zur Verfügung. Deshalb werden Geräuschgrenzwerte fast ausschließlich für neue oder wesentlich geänderte Fahrzeuge erlassen. Eine Ausnahme ist die indirekte Einführung von Grenzwerten durch das Fahrverbot für laute Güterwagen der Bestandsflotte ab 2024 (siehe Abschnitt 4.2.4).

4.2.7 Zusammenfassung

Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Straßenbahnen sind ein effektives Instrument, den Stand der Technik bei der Lärminderung bei neuen Fahrzeugen umzusetzen. Diese sind bislang aber noch nicht eingeführt worden. Grundsätzlich wäre die EU die zuständige politische Einheit, es ist aber auch eine nationale Einführung möglich. Mit den entsprechenden Vorschriften für die interoperablen Schienenfahrzeuge liegt ein gutes Beispiel für die grundsätzliche Konzeption des Verfahrenswegs einer solchen Vorschrift vor.

4.3 Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrwege

4.3.1 Definition

Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrwege bestehen aus Festlegungen von Schalldruckpegel in dB(A) und einem zugeordneten Messverfahren. Die nach diesem Messverfahren ermittelten Emissionen der Fahrbahnen dürfen den Grenzwert nicht überschreiten. Derartige Vorschriften werden aktuell nicht angewandt.

4.3.2 Wirkung des Instruments

Wie bei der Setzung von anspruchsvollen Grenzwerten für die Geräuschemissionen der Straßenbahnfahrzeuge ist eine Emissionsvorschrift für die Fahrwege ein effektives Instrument, den Stand der Lärminderungstechnik durchzusetzen gemäß dem Verursacherprinzip und dem Prinzip des Vorrangs quellenbezogener Maßnahmen. Die Typprüfung von Fahrbahnen könnte mit sehr leisen Schienenfahrzeugen vorgenommen werden. Alternativ könnte dies auch als Vorschrift zum Fahrflächenzustand ausgeführt werden, um einen langfristigen Effekt zu erzielen.

Die wichtigsten Elemente einer solchen Vorschrift wäre die Begrenzung der Schienenrauheit und ein Mindestmaß an Dämpfung der Schiene.

Es wurde schon zum einen darauf hingewiesen, dass die Gesamtemissionen von Fahrzeug und Fahrweg gemeinsam erzeugt werden. Deshalb setzt eine gute Wirksamkeit voraus, dass der Stand der Technik sowohl bei den Fahrzeugen wie den Fahrwegen umgesetzt ist. Zum anderen ist das mögliche Anwachsen der Emissionen der Fahrwege durch die Verschlechterung des Fahrflächenzustands besonders problematisch (siehe Abschnitt 4.2.2). Vorgaben für die Wartung der Infrastruktur sind deshalb ein wichtiger Teil der Geräuschemissionsvorgaben für die Fahrwege. Diese können auch in den Berechnungsvorschriften für die Geräuschemissionen implementiert werden (siehe Abschnitt 4.5), indem z. B. explizit Verfahren zur dauerhaften Sicherung eines sehr guten Fahrflächenzustands wie das Konzept des „besonders überwachten Gleises“ (büG) (siehe Abschnitt 4.5.1) vorgegeben werden.

4.3.3 Zuständigkeiten

4.3.3.1 Europäische Union

Das Unionsziel eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums liefert wegen des Zusammenwirkens von Fahrzeugbetrieb und Fahrwegen bei der Entstehung von Geräuschemissionen einen Rechtfertigungsgrund auch für Vorschriften für die Geräuschemissionen der Fahrwege der Eisenbahnen. Aus der Zielsetzung des Binnenmarkts ist Vergleichbares nur schwerlich abzuleiten. Für Fahrwege der Straßenbahnen in isolierten Netzen ist eine Zuständigkeit der EU nicht abzuleiten.

In der TSI zur Infrastruktur des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems von 2007 (2008/217/EG) war der Einfluss der Infrastruktur bei der Entstehung der Geräuschemissionen noch thematisiert worden:

- In Abschnitt 4.2.19 der TSI heißt es „Bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit von Vorhaben zum Bau oder Ausbau von Hochgeschwindigkeitsstrecken sind die Emissionsschallpegel der Züge, die der TSI Fahrzeuge des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems entsprechen, bei ihrer jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Bei der Untersuchung müssen auch die anderen auf der Strecke verkehrenden Züge berücksichtigt werden sowie die tatsächliche Gleisqualität und die topologischen und geografischen Zwänge.“
- In Abschnitt 7.4. Überarbeitung dieser TSI heißt es: Aktualisierte TSI werden regelmäßig im Abstand von drei Jahren veröffentlicht. Hierdurch besteht auch die Möglichkeit, Geräuschparameter für die Infrastruktur einzubeziehen. Die Untersuchung soll auf diejenigen Strecken beschränkt bleiben, für die gemäß der Umgebungslärm-Richtlinie (RL 2002/49/EG) die Erstellung einer Lärmkarte erforderlich ist. An der Infrastruktur durchzuführende Maßnahmen sind auf eine Ursachenbehandlung zu beschränken, z. B. die Überwachung der Rauheit des Schienenkopfes und die akustische Optimierung der dynamischen Gleiseigenschaften.“

In der aktuellen TSI Infrastruktur von 2014 (Verordnung (EU) 1299/2014) sind die Themen Geräusche oder Lärm nicht mehr enthalten. Dies macht deutlich, dass das Problembewusstsein für die Interaktion von Fahrzeugen und Fahrwegen bei der Emission von Geräuschen bei der Kommission geschwunden ist oder dass auf Druck der Mitgliedsstaaten und Verbände einheitliche europäische Vorgaben nicht mehr erwünscht sind.

4.3.3.2 Deutschland

In einer erweiterten Interpretation des § 38 BImSchG (siehe Grenzwerte für die Geräuschemissionen der Schienenfahrzeuge/Zuständigkeiten/Deutschland) wären auch Geräuschemissionsvorschriften für die Fahrwege zur Vermeidung von schädlichen Umwelteinwirkungen durch den Betrieb von Straßenbahnen denkbar. Eine solche Vorschrift sollte mindestens Vorgaben für die Schienenfahrflächen enthalten.

4.3.4 Aktueller Stand

Aktuell existieren keine expliziten Geräuschvorschriften für die Fahrwege. Indirekte Festlegungen werden in der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV getroffen (siehe Abschnitt 4.5)

4.3.5 Gestaltungserfordernisse und -optionen

Eine Vorschrift für die Emissionen der Fahrwege müsste zweierlei leisten:

- ▶ Für die verschiedenen Anwendungsfälle des Schienenverkehrs (Lärmvorsorge, Lärmsanierung bzw. Lärmaktionsplanung) wären Geräuschemissionsgrenzwerte (dabei mindestens verbindlichen Vorgaben für den Fahrflächenzustand) nach dem Stand der Technik einzuführen.
- ▶ Es wären vor allem für den Fahrflächenzustand akustisch bezogenen Instandhaltungsvorschriften vorzugeben, mit denen die jeweiligen Emissionsannahmen dauerhaft sichergestellt werden.

Letztere Vorgabe könnte auch in der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV verankert werden. Für den besonders guten Fahrflächenzustand bei den Eisenbahnen ist das mit dem Konzept des „besonders überwachten Gleises“ (büG) bereits realisiert und damit grundsätzlich auch für das durchschnittlich gute Gleis relativ einfach umsetzbar. Bei den Straßenbahnen müssten entsprechende Monitoringsysteme eingeführt werden. Das Konzept einer regelmäßigen Pflege des Schienenzustands auf der Basis von Messungen der Glattheit des Fahrflächenzustands wäre ein wichtiger Schritt zur Minderung der Geräuschemissionen der Straßenbahnen.

4.3.6 Zusammenfassung

Akustische Vorgaben für die Qualität der Fahrwege sind wegen des Zusammenwirkens von Fahrzeugen und Fahrwegen unumgänglich. Geräuschgrenzwerte für die Emissionen der Fahrwege bzw. für die Qualität der Fahrflächen sind dazu das effektivste Verfahren. Die Analyse der bisherigen Vorgaben für die Fahrwege zeigt aber, dass dieses Instrument keine besonders großen Umsetzungschancen hat. Alternativ sind deshalb auch andere Strategien zu beachten. Die hier empfohlene pragmatische Lösung wäre die Einführung von gestaffelten Emissionsannahmen für verschiedenen Fahrwegvarianten und von verbindlichen Kontrollen der Fahrwegemissionen auf der Grundlage von Berechnungsverfahren für die Geräuschimmissionen wie der Anlage 2 zur 16. BImSchV in Deutschland (siehe Abschnitt 4.5).

4.4 Grenzwerte für die Geräuschimmissionen des Schienenverkehrs

4.4.1 Definition

Die Geräuschimmissionen des Schienenverkehrs dürfen an den Immissionsorten, die für die Nachbarschaft von Bahnstrecken definiert werden, die Grenzwerte nicht überschreiten. Dazu werden für ein bestimmtes Betriebsprogramm auf der Bahnstrecke die Geräuschemissionen und mit einer Schallausbreitungsrechnung die Immissionspegel grundsätzlich rechnerisch bestimmt. Die Ermittlung der Immissionen erfolgt mit Prognosemodellen, in Deutschland ist es die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV, die sogenannte Schall03.

4.4.2 Wirkung des Instruments

Immissionsgrenzwerte sind aus Sicht der Lärmwirkungsforschung ein effektives Instrument zur Lärminderung, da sie auf die Minderung der Belastungen abzielen und in der Folge auch die belastungsabhängigen schädlichen Einwirkungen bzw. Beeinträchtigungen reduzieren. Sie sind auch das primäre Instrument zur verursachergerechten Internalisierung externer Kosten, wenn Immissionspegel erreicht werden können, die nicht mehr zu externen Kosten führen.

Im deutschen Immissionsschutzrecht sind als Immissionsorte vorrangig Punkte außerhalb der zu schützenden Nutzungen definiert, nach Abschnitt 2.2.10 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV, z. B. „auf der Fassade der zu schützenden Räume“ oder in der Flächenmitte der Außenwohnbereiche, damit die Qualität des Lärmschutzes unabhängig von der Dämmung der Außenfassade und auch bei (teil)geöffneten Fenstern sowie auf Balkonen, Terrassen und Gärten gewährleistet ist.

Damit die Immissionsgrenzwerte wirksam sind,

- ▶ müssen sie sich an den Zielwerten der Lärmbekämpfung orientieren (vergleiche Vorschläge des Umweltbundesamtes im nächsten Absatz)
- ▶ und für alle Konfliktfälle gelten, die aus dem Schienenverkehrslärm entstehen (Neubau und wesentliche Änderung, Bestandsstrecken).

Das Umweltbundesamt schlägt z. B. zur Vermeidung erheblicher Belästigungen einen Grenzwert für die Beurteilungspegel von 55 dB(A) am Tag und 45 dB(A) in der Nacht vor. Erhebliche Belästigungen sind schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG), die beim Neubau und der wesentlichen Änderung von Verkehrswegen zu vermeiden sind. Für Bestandssituationen empfiehlt das Umweltbundesamt zum Schutz der Gesundheit das kurzfristige Grenzwertziel von 65/55 dB(A) tags/nachts. Langfristig sollten 50/40 dB(A) tags/nachts nicht überschritten werden (Umweltbundesamt 2019a). In der Realität ist das nur eingeschränkt der Fall (siehe Abschnitt 4.4.4).

Die Außen-Immissionsgrenzwerte können durch ein Bündel von Instrumenten und Maßnahmen eingehalten werden:

- ▶ Reduktion der Quellenzahl, z. B. durch Verkehrsvermeidung,
- ▶ Maßnahmen an der Quelle (Fahrzeuge, Fahrwege),
- ▶ Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg.

Beim Straßenbahnverkehr im urbanen Raum kommt der Minderung der Emissionen der Quellen eine besondere Bedeutung zu, da umweltpolitisch eine Zunahme des Straßenbahnverkehrs erwünscht ist und Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg wegen der räumlichen Situation nur eingeschränkt möglich sind. Geräuschemissionsgrenzwerte liefern somit einen bedeutenden Anreiz für den Einsatz lärmmindernder Maßnahmen an Fahrzeugen und Fahrwegen: Je geringer die Emissionen sind, desto mehr Straßenbahnen können auf einem Streckenabschnitt verkehren und desto eher kann auf die Notlösung passiver Maßnahmen (Schallschutzfenster usw.) – die ohnehin nur geringe Akzeptanz haben – verzichtet werden.

Hier liegt allerdings das Problem, dass im Straßenverkehr nicht nur die Straßenbahn Lärm erzeugt. Wenn also der Lärm der Straßenbahnen sinkt, muss sich das nicht auf die Gesamtlärmsituation auswirken. Daher ist bei Straßenbahnen im Straßenraum mit dem Straßenverkehr ein Gesamtkonzept für beide Quellen erforderlich, da ansonsten bei relevanten Geräuschemissionen des Straßenverkehrs die Minderungsmaßnahmen an den Straßenbahnen kaum zur Minderung des Gesamtpegels beitragen.

Hier liegt dann die Benachteiligung der Straßenbahn, diese wird teurer, da mehr Lärmschutz integriert wird, der Lärmpegel sinkt aber nicht insgesamt. Es braucht also ein Gesamtkonzept, in das sich die Straßenbahn einreicht. Zum Beispiel wäre eine Verkehrsberuhigung denkbar, bei der dann die leise Straßenbahn ihr volles Potential ausspielen kann.

4.4.3 Zuständigkeiten

Immissionsbezogene Vorschriften sind traditionell in der Zuständigkeit der Mitgliedsstaaten der EU. So hat der deutsche Gesetzgeber mit dem § 43 (1), Nr. 1 BImSchG i. d. F. von 1974 die Bundesregierung ermächtigt, Geräuschimmissionsgrenzwerte für den Neubau und die wesentliche Änderung von Verkehrswegen zu erlassen. Dies ist 1990 mit der 16. Verordnung zum BImSchG (Verkehrslärmschutzverordnung) umgesetzt worden. Grundsätzlich kann aber auch die EU nach Art. 5 der konsolidierten Fassungen des Vertrags über die Europäische Union (2008/C 115/13) Immissionsgrenzwerte festsetzen, wenn die damit verbundenen Schutzziele „auf Unionsebene besser zu verwirklichen sind“ (Art. 5 (3) des Vertrags). Ein Beispiel dafür ist die Richtlinie RL 2008/50/EG vom 21. 05.2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Im Erwägungsgrund (25) der Richtlinie wird das Handeln der EU mit dem „grenzüberschreitenden Charakter von Luftschadstoffen“ begründet. Das Überschreiten der Immissionsgrenzwerte für die Luftschadstoffe verpflichtet die Mitgliedsstaaten zu Aufstellung von Luftreinhalteplänen. Die Betroffenen haben einen Rechtsanspruch auf Einhaltung der Grenzwerte.

Immissionsgrenzwerte sind vom Infrastrukturbetreiber zu beachten. Er ist damit gewissermaßen Generalunternehmer für die Lärmbekämpfung, obwohl er nicht die Zuständigkeit für die folgenden Maßnahmen der Lärmbekämpfung hat:

- ▶ Verkehrsvermeidung,
- ▶ leiserer Betrieb,
- ▶ Einsatz leiserer Wagen,
- ▶ die akustische Optimierung des Verkehrsmanagements (Wahl von Verkehrsrouten und Transportzeiten mit der geringsten Lärmsensibilität).

Es werden deshalb Instrumente benötigt, um den Beitrag der Betreiber (EVU) zu stimulieren oder zu generieren. Dazu kommen z. B. in Frage:

- ▶ Ökonomische Anreize zum Einsatz leiserer Fahrzeuge und zur akustischen Optimierung des Betriebsprogramms (z. B. in Form lärmabhängiger Trassenpreise, die das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) gestaltet).
- ▶ Geräuschgrenzwerte für die Fahrzeuge.

4.4.4 Aktueller Stand

In Deutschland wurden 1990 Geräuschimmissionsgrenzwerte nur für den Neubau und die wesentliche Änderung von Schienenwegen nach AEG und BImSchG (Lärmvorsorge) eingeführt.

Die schalltechnische Beurteilung des Neubaus oder Ausbaus von Schienenwegen ist in §§ 41 und 42 BImSchG und in der aufgrund von § 43 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG erlassenen 16. BImSchV geregelt. Sie unterscheidet zwischen dem „Neubau“ und der „wesentlichen Änderung“. Bei letzterer handelt es sich um eine wesentliche akustische Änderung, verursacht durch einen erheblichen baulichen Eingriff. Eine Erhöhung der Beurteilungspegel infolge von betrieblichen Änderungen führt wegen § 2 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG nicht zu Schallschutzansprüchen.

Die Grenzwerte sind Beurteilungspegel außen, d. h. Mittelungspegel außen die nicht überschritten werden dürfen; sie sind baunutzungsabhängig und im Folgenden dargestellt (§ 2 Abs. 1 16. BImSchV).

Die Grenzwerte folgen der Schutzkonzeption des BImSchG, das für schädliche Umwelteinwirkungen durch Lärm eine Erheblichkeitsschwelle voraussetzt. Die Grenzwerte liegen für Wohngebiete je nach Baunutzung um 2 dB(A) bis 9 dB(A) über den Zielwerten für erhebliche Belästigungen (siehe Abschnitt 4.4.2). Die Abweichungen sind auch nicht von der Lärmwirkung her begründet, sondern sind das Ergebnis der Abwägung von Schutzziele und finanzieller Belastung der staatlichen Haushalte.

Erfordert die Einhaltung der Grenzwerte Maßnahmen, deren Kosten außer Verhältnis zum Schutzzweck stehen § 41 Abs. 2 BImSchG, darf auf die Einhaltung der Grenzwerte der Außenpegel verzichtet werden. Stattdessen sind nun Maßnahmen des baulichen Schallschutzes (so genannte passive Maßnahmen) zu treffen, die die Einhaltung von zulässigen Innenpegeln gemäß 24. BImSchV gewährleisten. Die Option des baulichen Schallschutzes kann das Erfordernis vermindern, die Geräuschemissionen so weit wie möglich zu reduzieren.

Die Schallimmissionen von Schienenwegen werden mit Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV berechnet. Im Übrigen ließen sich Schallschutzmaßnahmen an geplanten Verkehrswegen ohne vorherige Berechnung nicht bemessen. Bei der Prüfung auf „wesentliche Änderung“ im Falle eines erheblichen baulichen Eingriffs sind für die Bauzustände vor dem Umbau und nach dem Umbau jeweils die Prognoseverkehrsmengen anzusetzen und die daraus jeweils entstehenden Beurteilungspegel miteinander zu vergleichen. Der Prognosezeitraum beträgt im Allgemeinen zehn bis 20 Jahre. Der Emissionspegel für den Nachtzeitraum wird aus der Anzahl der Züge für den gesamten Nacht-Zeitraum (acht Stunden von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) errechnet. Es wird die Anzahl der Züge nicht nur auf die nächtliche Spitzenstunde oder auf die nächtliche Betriebsdauer, bezogen.

Beim erheblichen baulichen Eingriff muss die Substanz des Verkehrsweges berührt werden. Als „erheblicher baulicher Eingriff“ gilt z. B. die Verschwenkung von Gleisen oder ihre Höhenänderung. Aus lärmschutzfachlicher Sicht und auch bautechnisch ist der Einbau von Straßenbahngleisen ein erheblicher Eingriff in den Straßenkörper. Juristen sehen dies teilweise anders als die Bau- und Lärmschutzfachleute. Baumaßnahmen zur Bahnstreckenunterhaltung, und der Einbau von Weichen, z. B. zur Verbindung von zwei Gleisen, und ähnliche Baumaßnahmen gelten nicht als erheblicher baulicher Eingriff.

4.4.5 Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen

4.4.5.1 Grenzwerte und Ermittlungsverfahren:

Auch für Immissionsvorschriften gilt der enge Zusammenhang zwischen Grenzwerten und Ermittlung der Belastungen. Letztere wird aus den oben genannten Gründen rechnerisch gemacht. Es wird im Allgemeinen angestrebt, dass die rechnerisch ermittelten Belastungen zu Gunsten der Betroffenen über den realen Belastungen liegen. In Deutschland gilt beim landgebundenen Verkehr zudem die Besonderheit, dass auf meteorologische Ausbreitungsbedingungen abgestellt wird, die zu höheren Belastungen führen (Mitwind, Inversion). Das erschwert z. B. den Vergleich mit Berechnungsverfahren zur Lärmkartierung nach der Richtlinie zum Umgebungslärm, welche die durchschnittlichen meteorologischen Situationen voraussetzen.

Die Emissionsannahmen müssen den über die Zeit gemittelten realen Emissionen der Fahrzeuge und Fahrwege widerspiegeln. Dazu sind bestimmte Wartungszyklen abzubilden und entsprechend umzusetzen.

4.4.5.2 Anwendungsbereich

Geräuschimmissionsgrenzwerte sollten grundsätzlich für alle Konfliktfälle gelten, d. h. neben der Lärmvorsorge auch die Situation an Bestandsstrecken umfassen.

4.4.5.3 Zusammenfassung

Geräuschimmissionsgrenzwerte sind zur Vermeidung von schädlichen Umwelteinwirkungen ein effektives Instrument zur Minderung von schädlichen Umwelteinwirkungen durch Lärm. Auf die Emissionen der Fahrzeuge und Fahrwege wirken sie nur indirekt. In engen Straßenräumen lassen sich Geräuschimmissionsgrenzwerte allerdings fast nur durch Emissionsminderungen erreichen (neben den eigentlich betrieblich unerwünschten Geschwindigkeitsreduktionen und Mengenbegrenzungen).

Geräuschimmissionsgrenzwerte sind bislang nur für den Fall der Lärmvorsorge eingeführt worden. Sie müssten deshalb auch auf Bestandsstrecken Anwendung finden. Zur Vermeidung von schädlichen Umwelteinwirkungen sind Grenzwerte einzuführen, die aus der Lärmwirkungsforschung abgeleitet sind. Die anspruchsvollsten Vorgaben beziehen sich auf die Vermeidung erheblicher Belästigungen (siehe BImSchG), wofür das Umweltbundesamt Zielpegel von 55/45 dB(A) tags/nachts vorschlägt (siehe auch Abschnitt 4.4.2).

Die Verfahren zur Bestimmung der Immissionen müssen von den realen durchschnittlichen Emissionen der Fahrzeuge und Fahrwege ausgehen.

4.5 Indirekte Vorgaben für die Geräuschemissionen in der 16. BImSchV und in CNOSSOS-DE

Die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV ist das rechtlich vorgeschriebene Verfahren für die Bestimmung der Geräuschimmissionen des Schienenverkehrs für die beiden nationalen Anwendungsfälle der Lärmvorsorge (Eisenbahnen, Straßenbahnen) und der Lärmsanierung (nur Eisenbahnen). Für die Lärmaktionsplanung war bis zur Lärmkartierung im Jahr 2017 die vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen vom 22. Mai 2006 (VBUSch) zu verwenden, die aus Modifikationen der Schall 03 von 1990 entwickelt worden ist. Sie wurde am 01.01.2019 durch das einheitliche Verfahren CNOSSOS-EU (European Commission 2012) ersetzt, dessen nationale Umsetzung in der Form von CNOSSOS-DE Ende 2018 vollzogen worden ist. CNOSSOS-DE wurde mit der Bekanntmachung durch das BMU und das BMVI vom 28.12.2018 in Kraft gesetzt (BMU; BMVI 28.12.2018). Für den Schienenverkehr besteht das Verfahren aus den folgenden Teilen:

- Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB) (siehe CNOSSOS-DE BUB),
- Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm (BEB) (siehe CNOSSOS-DE BEB),
- Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D) (siehe CNOSSOS-DE BUB-D).

Das BMVI lässt aktuell in dem bis Ende 2020 laufenden Vorhaben „Harmonisierung des Lärmsanierungsprogramms mit der Lärmaktionsplanung“¹⁰ untersuchen, wie das

¹⁰ Das Projekt wird von einem Konsortium bestehend aus den Firmen Disy Informationssysteme GmbH, Lärmkontor GmbH und Soundplan GmbH durchgeführt.

Lärmsanierungsprogramm und die Lärmaktionsplanung zusammengeführt werden können. Da CNOSSOS-DE in der Lärmkartierung vorgeschrieben ist, wird eine harmonisierte Vorgehensweise nicht mehr auf die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV zurückgreifen. Im Folgenden wird zunächst die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV analysiert, um die indirekten Vorgaben in den Berechnungsvorschriften zu verstehen. Anschließend wird dann die Berechnungsvorschrift CNOSSOS-DE beschrieben.

4.5.1 Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV (Schall 03)

Die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV definiert die Emissionsannahmen für die Straßenbahnen in Kapitel 5. Im Gegensatz zu den Eisenbahnen ist das Repertoire von leiseren technischen Optionen für die Quellen sehr begrenzt (Begrünter Bahnkörper).

Die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV arbeitet mit Annahmen für die Emissionen, die in realen Betriebssituationen bestimmt worden sind. Die akustische Qualität der Komponenten von Fahrzeugen und Fahrwegen ist dabei in einem durchschnittlichen Zustand. Am Beispiel des Rollgeräusches lässt sich dieser durchschnittliche Zustand präziser beschreiben: Das Rollgeräusch wird erzeugt durch die kombinierte Rauheit von Radlauf- und Schienenfahrflächen als Abweichung von glatten Rädern und Schienen. Die Rauheit beider Komponenten wächst mit der Zeit, damit steigen die Geräuschemissionen an, bis mit dem Schleifen von Rädern und Schienen wieder ein relativ glatter Zustand erzeugt wird (der zeitliche Verlauf der Emissionen kann vereinfacht als Sägezahnkurve dargestellt werden). Die über eine Schleifperiode (energetisch) gemittelten Emissionen geben den durchschnittlichen Zustand an. Für die Schienenfahrflächen der Eisenbahnen wurde in der Schall 03 (Ausgabe 1990) angenommen (Werner 1991), dass durch das übliche Wartungsschleifen – das aus betrieblichen Gründen erfolgt – ein Pegel L_0 (unterer Schwellenwert) erreicht wird und wieder geschliffen wird, wenn der Emissionspegel auf $L_0 + 5,7$ dB(A) (oberer Schwellenwert) angestiegen ist. Der über einen Schleifzyklus energetisch gemittelte Emissionspegel liegt dann bei $L_0 + 3$ dB(A) und entspricht dem durchschnittlichen Fahrflächenzustand. Dieses Konzept wurde unverändert in die neue Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV übernommen und gilt auch für die Straßenbahnen.

Problematisch ist, dass die entsprechenden Wartungsvorgaben – akustische Qualität des Wartungsschleifens, Überwachung der Emissionen, Einführung eines Schwellenwertes für das Erfordernis erneuten Schleifens – nicht normativ festgelegt worden sind. Es ist bekannt, dass auf Grund unterlassenen Schienenschleifens Pegelerhöhungen bis zu 15 dB(A) selbst auf planfestgestellten Neubaustrecken vorkommen.

Während die DB Netz AG bei den Eisenbahnen durchaus über Instrumente verfügt, die Einhaltung der Emissionsannahmen sicherzustellen (Emissionskontrolle durch den Schallmesswagen, geeignete Schleifverfahren), ist die Situation bei den Straßenbahnen sehr viel undurchsichtiger. Wie die Umfrageergebnisse bei den Verkehrsbetrieben im Rahmen des Vorhabens zeigen, schleift gut die Hälfte der befragten KVV (56 Prozent) die Schienen ihres Netzes. Details zu den Schleifverfahren, den erreichbaren Minderungen und dem Überwachungssystem sind in der Regel nicht zugänglich.

Die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV zeigt auch den grundsätzlichen Weg zur Verbesserung der akustischen Schienenqualität auf: Für die Eisenbahnen wurde das Konzept des „besonders überwachten Gleises“ (bÜG) normiert (Abschnitt 4.5 Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV):

- Mit besonderen akustisch optimierten Schleifverfahren werden besonders niedrige Ausgangspegel L_0 erreicht,

- ▶ zudem wird ein Überwachungssystem festgelegt, in dem die Emissionen regelmäßig mit dem Schallmesswagen der Deutschen Bahn gemessen werden.
- ▶ Bei Erreichen des oberen Schwellenwerts muss erneut geschliffen werden.

4.5.2 CNOSSOS-DE

Die deutsche Adaption von CNOSSOS-EU führt die Kategorisierungen der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV ein. So werden in Tabelle B-7 der Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (BUB) die Fahrbahnzuschläge für die speziellen Fahrbahnen der Straßenbahn- und U-Bahn-Fahrzeuge definiert - neben dem klassischen Schwellengleis im Schotterbett:

- ▶ Straßenbündiger Bahnkörper und Feste Fahrbahn
- ▶ Begrünter Bahnkörper –tiefliegende Vegetationsebene
- ▶ Begrünter Bahnkörper –hochliegende Vegetationsebene

Dies entspricht der Tabelle 15 in der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV.

Es werden die Fahrzeugkategorien:

- ▶ Straßenbahn-Hochflurfahrzeug
- ▶ U-Bahn-Fahrzeug
- ▶ Straßenbahn Niederflurfahrzeug

eingeführt Da keine weiteren Lärmschutzmaßnahmen abgebildet werden, bildet CNOSSOS-DE nur den begrünten Bahnkörper als Lärmschutzmaßnahme ab.

4.5.3 Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen

Die Weiterentwicklung der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV oder von CNOSSOS-DE in Richtung einer differenzierteren Beschreibung der Emissionsannahmen für Straßenbahnkomponenten ist ein relativ flexibles und pragmatisches Instrument mit einem hohen Grad an Umsetzungspotenzial. Es sollte deshalb der Katalog der technischen Komponenten mit Lärminderungspotenzial – auch für die Nachrüstung des Fahrzeug- und Fahrwegbestands – erweitert werden.

4.6 Geräuschemissionsvorgaben in Nahverkehrsplänen

Nahverkehrspläne nach § 8 Abs. 3 PBefG definieren u. a. die Umweltqualität des Angebots von Verkehrsleistungen und damit auch die Qualität des Lärmschutzes. Sie können als gewissermaßen lokale Emissionsvorschriften die Lücken im bestehenden nationalen und europäischen Recht ausfüllen. Sie legen Vorgaben für den Lärmschutz vornehmlich für die Beschaffung von Fahrzeugen aber auch für die Wartung von Fahrzeugen und Fahrwegen fest. Sie können Bindungswirkung sowohl für den kommunalen Eigenbetrieb als auch für die Vergabe von Verkehrsleistungen im Wettbewerb entfalten.

Die Vorgaben für die Geräuschemissionen des Nahverkehrs sollen exemplarisch am Beispiel des Berliner Nahverkehrsplans (NVP) 2019-2023 mit Stand vom 25. Februar 2019 dargestellt werden.

Im Berliner NVP werden im Abschnitt „III.6.4 Lärmschutz“ Anforderungen an die Geräuschemissionen von Straßenbahnen formuliert. U. a. ist die VDV-Schrift 154 „Geräusche von Schienenfahrzeugen des Öffentlichen Personen-Nahverkehrs“ (VDV 2011b) zu beachten. So dürfen „vom gesamten Fahrzeug und von allen Antriebs- und Hilfsbetrieben [...] keine tonhaltigen Geräusche gemäß VDV-Schrift 154 Kapitel 4.5 ausgehen“ (Land Berlin 2019, S. 207).

„Die Fahrzeughersteller sind vom Verkehrsunternehmen verbindlich auf Geräuschpegelhöchstwerte entsprechend dem Stand der Technik sowie der nachfolgenden Ausführungen zu verpflichten. Die Schallpegelwerte der Fahrzeugtypen sind unmittelbar vor bzw. nach Lieferung sowie nach 2 Jahren Betriebseinsatz zu ermitteln und müssen (bei ordnungsgemäßer betriebsüblicher Wartung der Fahrzeuge) die gleichen Grenzwerte einhalten. Bei der Neubeschaffung von Straßenbahnen und U-Bahnen gibt der Betreiber mindestens die in Tabelle 7 benannten Pegelhöchstwerte für Außengeräusche vor.“ (Land Berlin 2019, S. 207)

Tabelle 7: Pegelhöchstwerte für Neufahrzeuge¹¹

Kriterium	für Straßenbahnen ¹²	für U-Bahnen
Im Stand mit eingeschalteten Einzelkomponenten als L_{pAeq} ohne Klimaanlage	45 dB(A)	45 -55 dB(A)
Im Stand mit eingeschalteten Einzelkomponenten als L_{pAeq} max. Heizbetrieb	50 dB(A)	50-55 dB(A)
Im Stand mit eingeschalteten Einzelkomponenten als L_{pAeq} mit Klimaanlage, Teillast (in 1,2 und 3,5 m Höhe)	50 dB(A)	50-55 dB(A)
Im Stand mit eingeschalteten Einzelkomponenten als L_{pAeq} mit Klimaanlage, Volllast (in 1,2 und 3,5 m Höhe)	55 dB(A)	55-60 dB(A)
Anfahrt, Bremsung (bis/aus 30 km/h) als L_{pAFmax}	65-72 dB(A)	keine Angabe
Bremsung aus 60 km/h als L_{pAFmax}	70-77 dB(A)	keine Angabe
Beschleunigte Vorbeifahrt (aus 20 km/h) als L_{pAFmax}	68-72 dB(A)	keine Angabe
Vorbeifahrt mit 60 km/h als $L_{pAeq,TP}$	73-76 dB(A)	74-76 dB(A)
Bogenfahrt¹³ mit 20 km/h als L_{pAFmax}	68-76 dB(A)	keine Angabe
Bogenfahrt¹³ mit 10 km/h als L_{pAFmax}	65-72 dB(A)	keine Angabe

Quelle: Land Berlin 2019, S. 208

¹¹ Die nachfolgend angegebenen Pegelhöchstwerte gelten auf Gleisen mit Schotter-Oberbau in betriebsmäßigem gut gepflegtem Zustand außer für Bogenfahrten, diese werden auf Straßengleis durchgeführt.

Für Messungen mit relevantem Rollgeräuschanteil (dies sind zumindest Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit und Fahrten mit Geschwindigkeiten von mehr als 30 km/h) sollte das obere Grenzspektrum des Pegels der akustischen Schienenrauheit nach DIN EN ISO 3095 eingehalten werden.

Der Vergleich der Daten mit den Ergebnissen anderer Prüfsituationen kann möglich sein, wenn die Prüfsituation bei Anwendung des Verfahrens nach Anhang E der DIN EN ISO 3095 als vergleichbar angesehen werden.

Die „Hinweise für die Messungen an Straßen- und U-Bahnen“ nach Anhang D der DIN EN ISO 3095 sind zu beachten.

Bei angegebenen Pegelbereichen sind die jeweiligen niedrigeren Schalldruckpegel aktuell auch geeignet für ein Bonussystem bei der Ausschreibung von Neufahrzeugen, die jeweiligen höheren Schalldruckpegel können aktuell als Pegelhöchstwerte genutzt werden, später sollten infolge der technischen Entwicklung nicht mehr die maximal genannten Schalldruckpegel als Pegelhöchstwerte verwendet werden.

Neben dem Nachweis der Einhaltung der Pegelhöchstwerte ist auch die Anerkennung von Fahrzeugen als abweichende Bahntechnik nach Abschnitt 9 Anlage 2 zur 16. BImSchV nachzuweisen.

¹² Falls schallemittierende Komponenten auf dem Dach, bei 3,5 m Höhe über Schienenoberkante (SOK) so wählen wie bei 1,2 m Höhe über SOK.

¹³ Falls Fahrzeuge mit Laufflächenkonditionierung ausgestattet: 30 m Bogen, Straßengleis.

Nach dieser Tabelle sind **Anreize in Form von Boni** möglich, wenn die jeweils unteren Geräuschemissionswerte erfüllt werden.

Der Nahverkehrsplan macht auch Vorgaben für die Laufflächenkonditionierung von Straßenbahnen zur Vermeidung von Kurvenquietschen.

4.7 Lärminderungsplanung

4.7.1 Definition

Für den Neubau und die wesentliche Änderung von Schienenwegen existieren in Deutschland Geräuschemissionsgrenzwerte. Für Bestandsstrecken (solche, die in den alten Bundesländern vor dem 01.04. 1974 und in den neuen Bundesländern vor dem 03.10.1990 bestanden oder planfestgestellt waren) fehlen derartige Grenzwerte. Die Lösung der Lärmprobleme an Bestandsstrecken ist Gegenstand der Lärminderungsplanung. Für die Eisenbahnstrecken des Bundes gibt es seit 1999 ein freiwilliges Lärmsanierungsprogramm, im Rahmen des Bundeshaushaltsgesetzes werden Auslösewerte und Finanzvolumen der Lärmsanierung festgelegt (BMVI 2016). Ein vergleichbares Programm gibt es für die Straßenbahnen nicht. Im Jahr 2005 wurde die europäische Richtlinie zum Umgebungslärm (RL 2002/49/EG) von 2002 in deutsches Recht umgesetzt (§ 47a-f BImSchG). Seitdem ist die Lärminderung in Form von Lärmaktionsplänen auch für Straßenbahnen in Ballungsräumen (mit mehr als 100.000 Einwohnende und einer Bevölkerungsdichte¹⁴ von mehr als 1.000 Einwohnende/km²) verbindlich.

4.7.2 Wirkung des Instruments

Die Wirkung des Instruments der Lärminderungsplanung hängt vor allem davon ab:

- welches Schutzniveau angestrebt wird und
- wie und wann die zur Erreichung der Schutzziele konzipierten Maßnahmen umgesetzt werden.

Verbindliche Immissionsgrenzwerte sind in der Lärmsanierung des Bundes und in der Lärmaktionsplanung bislang nicht eingeführt worden. Zu beachten ist ferner, dass die Lärmsanierung keine Fristen kennt. Festgelegte Fristen bestehen im Rahmen der Lärmaktionsplanung: Seit 2008 sind alle fünf Jahre Lärmaktionspläne zu verabschieden, die jeweils eine Bestandsaufnahme der bislang umgesetzten Minderungsmaßnahmen enthalten. Eine Frist für die Umsetzung der Minderungsmaßnahmen im Aktionsplan besteht allerdings nicht.

Eine Besonderheit der Lärmaktionsplanung ist die verbindliche Beteiligung der Öffentlichkeit: Dies kann durchaus zur Identifizierung von Lärmschwerpunkten führen bzw. die Dringlichkeit von Maßnahmen erhöhen. In Berlin z. B. erfolgten viele Hinweise auf das Kurvenquietschen¹⁵.

¹⁴ Die Anwendung des Dichtekriteriums führt dazu, dass Erfurt trotz seiner etwa 211.000 Einwohnenden (Stand Ende 2016) nicht als Ballungsraum gilt, die Straßenbahnen in Erfurt somit nicht Gegenstand des dortigen Lärmaktionsplans sind. Dieser erfasst nur Haupteisenbahnstrecken und Hauptverkehrsstraßen.

¹⁵ Auszug aus einem Interview mit der BVG

„Bei der letzten LAP Berlin wurde insbesondere das Kurvenquietschen bei der Straßenbahn als Lärmproblem genannt. Fahren die Straßenbahnen heute leiser durch die Kurven?

Ja, es ist leiser geworden. Wir haben die letzte LAP Berlin als Chance begriffen, den wichtigsten Kritikpunkten schnell und wirksam zu begegnen. Daher wurde gründlich analysiert, wo genau das Quietschen in den Kurven seine Ursache hat und haben gezielt dort Lösungen angesetzt. Wir konnten seither die Laufflächen der Räder so bearbeiten, dass sich die Reibungsenergie nicht mehr in Schall umwandelt. Die Nachrüstung an allen Fahrzeugen ist wegen der komplexen Technologie sehr aufwendig, sodass noch etwas Zeit

4.7.3 Zuständigkeiten

4.7.3.1 Europäische Union

Grundsätzlich kann die EU auch verbindliche Vorgaben für den Lärmschutz an Bestandsstrecken machen (vgl. Abschnitt 4.4.3). Sie hat sich beim Lärm im Gegensatz zur Luftreinhaltung aber auf eine Harmonisierung der Lärminderungsplanung beschränkt, indem sie einheitliche Indikatoren für die Geräuschbelastung, Verfahren zu ihrer Ermittlung und zu ihrer Reduktion festgelegt hat (RL 2002/49/EG).

4.7.3.2 Deutschland

Das Eisenbahn-Bundesamt ist zuständig für die Lärmaktionsplanung an Haupteisenbahnstrecken und für die Lärmsanierung an den Eisenbahnen des Bundes. Für den Bereich der Straßenbahnen sind im Rahmen der Lärmaktionsplanung die Kommunen zuständig.

Die verbindliche Einführung von Geräuschimmissionsgrenzwerten für den Bestand wäre Aufgabe des Bundes.

4.7.4 Aktueller Stand

Für die Lärmsanierung an Eisenbahnstrecken des Bundes sind durch Bundeshaushaltsrecht als Auslösewerte der Lärmsanierung Beurteilungspegel (modifizierte Mittelungspegel) vorgegeben. Sie betragen für Wohngebiete (WA, WR) 67/57 dB(A) tags/nachts. Das Programm ist mit inzwischen 150 Mio. Euro/Haushaltsjahr eines der am besten finanziell ausgestatteten Lärminderungsprogramme in Deutschland¹⁶. Es beruht auf zwei wesentlichen Säulen:

- Maßnahmen an der Infrastruktur durch Einsatz (aktiver) quellenbezogener Maßnahmen wie den Einbau von Schienenstegabsorbern, sekundären aktiven Schallschutzmaßnahmen wie den Bau von Lärmschutzwänden und dem (passiven) baulichen Schallschutz, z. B. durch Schallschutzfenster.
- Umrüstung der Güterwagen, hier Ersatz der Graugussbremsklötze durch LL-Klötze

4.7.5 Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen

Die Lärmaktionsplanung nach der Richtlinie zum Umgebungslärm war jeweils durch nationale Gesetze zu implementieren. Deutschland hat dabei auf die Setzung von nationalen Zielpegeln für die Lärmaktionsplanung verzichtet und es den zuständigen Behörden anheimgestellt, Schutzziele festzulegen. Diese wurden dann mitunter eher an der vermeintlichen Machbarkeit orientiert als aus Sicht der Lärmwirkungsforschung eingeführt. Auch manche Details sind erst durch deutsches Recht festgesetzt worden (z. B. die Quantifizierung der Einwohnendendichte, mit der oben beschriebenen Folge für Erfurt (vgl. Abschnitt 4.7.1).

4.7.6 Bewertung der Steuerungspotenziale der Lärminderungsplanung

Die Lärmaktionsplanung ist vor allem für die Orte mit Straßenbahnen ein wichtiges Instrument zur systematischen, dauerhaften und verbindlichen Lärminderungsplanung mit fünfjähriger Dokumentations- und Überarbeitungspflicht. Die vorgeschriebene Beteiligung der Öffentlichkeit trägt sowohl zur Ermittlung der Lärmkonflikte, zur Priorisierung von Problemen und zur

vergehen wird, bis alle Fahrzeuge leiser sind. Die neuesten Flexity-Fahrzeuge werden aber bereits mit dieser lärmreduzierenden Technik an uns geliefert.“ (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (Berlin) o. J.)

¹⁶ Im Jahr 2019 wurden diese Mittel einmalig auf 176 Millionen Euro angehoben (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020), dagegen im Haushaltsjahr 2020 auf 139 Mio. € gesenkt.

Akzeptanz von Maßnahmen bei. Sie kann hohen Rechtfertigungsdruck für die Einführung leiserer Technik schaffen. Ein Instrument zum verpflichtenden Einsatz leiserer Fahrzeug- oder Fahrwegtechnik ist sie allerdings nicht.

4.8 Betriebsbeschränkungen

4.8.1 Definition

Betriebsbeschränkungen zum Schutz gegen Schienenverkehrslärm haben potenziell zwei wesentliche Gestaltungsformen:

- ▶ Fahrverbote zu bestimmten schutzwürdigen Zeiten, überwiegend in der Nachtzeit zum Schutz des Schlafs, ggfs. in selektiver Form
- ▶ Geschwindigkeitsbegrenzungen zur Minderung der Geräuschemissionen

Beide Formen können ggfs. selektiv eingesetzt werden mit Ausnahmen für leise Schienenfahrzeuge. Allgemeine Fahrverbote für Straßenbahnen sind in Deutschland nicht gebräuchlich und im Sinne der Förderung des Umweltverbunds auch nicht erwünscht und werden hier nicht als Maßnahme betrachtet. Ausnahmegenehmigungen von Fahrverboten („Benutzendenvorteile“) für leise Straßenbahnen wären ein Anreiz zur Geräuschkürzung. Beispiel hierfür sind die lange Zeit üblichen Benutzendenvorteile für lärmarme Lkw (Jaeger und Rogall 1993).

Geschwindigkeitsbeschränkungen selbst führen einerseits zu einer Minderung der Immissionen, andererseits könnten sie als Anreiz eingesetzt werden, indem leise Straßenbahnen davon ausgenommen sind.

4.8.2 Wirkung des Instruments

Eine Reduktion der Geschwindigkeit führt bekanntlich zu einer Verringerung der Emissionen des Fahrgeräusches, wenn das Rollgeräusch dominiert oder in Gleisbögen (siehe Kapitel 5).

4.8.3 Zuständigkeiten

Die Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen ist in § 50 BStab geregelt. Danach setzt die Technische Aufsichtsbehörde diese für das Streckennetz, die Betriebsleitenden für einzelne Streckenabschnitte fest. Wird aus Gründen des Lärmschutzes für die Straßen eine Geschwindigkeitsreduktion vorgesehen (z. B. Tempo 30-Zonen oder Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen zur Nachtzeit, wie in Berlin aktuell häufig anzutreffen), gilt diese auch für die Straßenbahnen mit straßenbündigem Bahnkörper.

4.8.4 Aktueller Stand

In Deutschland wurden selektive Fahrverbote für die Eisenbahnen durch das Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen vom 20. Juli 2017 (SchlärmschG) eingeführt: Güterzüge, deren Güterwagen die Geräuschemissionsgrenzwerte der TSI Fahrzeuge - Lärm nicht einhalten, dürfen ab dem Fahrplanwechsel Dez. 2020 das deutsche Schienennetz nur noch im Gelegenheitsverkehr, auf bestimmtem Strecken und mit reduzierter Geschwindigkeit befahren. Die Geschwindigkeit ist so weit zu reduzieren, dass die Geräuschemissionen denen eines TSI-konformen Zugs entsprechen.

Benutzendenvorteile für leise Straßenbahnen sind in Deutschland nicht bekannt. Geschwindigkeitsbeschränkungen aus Gründen des Lärmschutzes sind in Deutschland nach den

Daten der Befragung im Rahmen der Erstellung dieses Gutachtens bei den Verkehrsunternehmen relativ gebräuchlich (46 Prozent der befragten Personen geben das an). Die Hälfte der Geschwindigkeitsbeschränkungen werden in Gleisbögen erlassen. Aus dem Ausland ist beispielsweise bekannt, dass in Prag lärmbedingte Fahrverbote für die dortigen Straßenbahnen drohten (Johnston 2016). Teilweise wird in Berlin in Ausnahmefällen wie z. B. der Langhansstraße oder der Berliner Allee (Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (Berlin) 2008, S. 18) eine Geschwindigkeits-Reduzierung zur Lärminderung angeordnet.

4.8.5 Gestaltungserfordernisse und Gestaltungsoptionen

Die rechtlichen Grundlagen zur Einführung von Betriebsbeschränkungen und Benutzendenvorteilen für den Straßenbahnverkehr (BOStrab) werden als ausreichend erachtet.

4.8.6 Bewertung des Instrumentes der Betriebsbeschränkungen

Betriebsbeschränkungen sind grundsätzlich ein effektives Instrument zur Vermeidung von schädliche Umwelteinwirkungen, z. B. zum Schutz des gesunden Schlafs durch nächtliche Fahrverbote. Letztere stehen aber dem Ziel entgegen, den ansonsten umweltfreundlichen Schienenverkehr auszuweiten. Benutzendenvorteile durch Ausnahmen von Betriebsbeschränkungen für leise Fahrzeuge können einen Anreiz zu deren Beschaffung liefern, bei lokalen Netzen mit einem einzigen Verkehrsunternehmen hat dies aber wohl keine praktische Bedeutung.

4.9 Verfügbare rechtliche bzw. organisatorische Werkzeuge

Für die Minderung der Geräuschemissionen von Fahrzeugen und Fahrwegen des Straßenbahnverkehrs stehen mehrere potenzielle ordnungsrechtliche Instrumente zur Verfügung:

- ▶ Das effektivste Instrument ist aus der Sicht des Immissionsschutzes die Festsetzung von Grenzwerten für die Geräuschemissionen nach dem Stand der Technik. Für Straßenbahnen ist es bislang noch nicht eingeführt worden. Geräuschvorschriften für die Straßenbahnfahrzeuge könnten angelehnt werden an die existierenden Vorgaben für die interoperablen Schienenfahrzeuge (TSI Fahrzeuge Lärm). Eine Einführung ist grundsätzlich durch die EU wie auch durch den Bund möglich. Da aktuell Geräuschemissionsvorschriften nur für die Neufahrzeuge eingeführt werden, sind zusätzlichen Instrumente für die Bestandsfahrzeuge erforderlich. Vorgaben für die dauerhafte Einhaltung der Grenzwerte (Instandhaltung) sind auch in den TSI akustisch nicht definiert. Für Fahrbahnen fehlen entsprechende Vorgaben, sie müssten erst entwickelt werden. Zuständig wäre grundsätzlich die EU, es erscheint aber sinnvoller nationale Regeln einzuführen.
- ▶ Geräuschgrenzwerte für die Immissionen bedingen nicht verpflichtend den Einsatz leiser Fahrzeuge und der Wahl leiserer Komponenten für den Fahrweg, da die Immissionen auch von der Anzahl der Fahrzeuge, ihren Geschwindigkeiten, der Entfernung von Quelle und Immissionsort und den Minderungsmaßnahmen auf dem Ausbreitungsweg abhängen. Leise Geräuschquellen des Straßenbahnsystems eröffnen aber die Möglichkeit, auch bei naher Wohnbebauung freier in der Gestaltung der betrieblichen Parameter zu sein. In Verbindung

mit dem Berechnungsverfahren für die Immissionen, dass ein quellenbezogenes Maßnahmenbündel nach dem Stand der Technik definiert, kann das Minderungspotenzial gezielt umgesetzt werden. Daher ist die Fortentwicklung der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV oder von CNOSSOS-DE durch die Generierung eines Werkzeugkastens nach dem Stand der Technik eine wichtige Aufgabe mit hohem Realisierungspotenzial (Anwendung des Kapitels 9 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV zur Abbildung von schalltechnischen Innovationen). Die Option des passiven (baulichen) Schallschutz sollten dann strikt an die vorrangige Umsetzung des technischen Minderungspotenzials an den Quellen gebunden sein. Immissionsgrenzwerte sind traditionell Aufgabe der Mitgliedsstaaten.

- Die Lärminderung an Bestandsstrecken (Lärmsanierung) ist in der Form der Lärmaktionsplanung für die europäischen Ballungsräume und die dort vorhandenen Straßenbahnnetze ein verbindlicher und kontinuierlicher Ansatz zur Minderung der Geräuschemissionen von Fahrzeugen und Fahrwegen. Es wurden in Deutschland zwar keine verbindlichen Immissionsgrenzwerte festgelegt, durch die explizit vorgegebene Öffentlichkeitsbeteiligung kann ein hoher Rechtfertigungsdruck entwickelt werden.
- Nahverkehrspläne können verbindliche Vorgaben für die Geräuschemissionen neu zu beschaffender Fahrzeuge und für den Erhalt guter akustischer Qualität durch Wartungs- und Überwachungsvorschriften machen. NVP erlauben es, den Stand der Technik durch Bonussysteme für besonders leise Fahrzeuge zu fördern. Die Stellung der NVP sollte durch eine höhere Verbindlichkeit für ihre Einführung gestärkt werden. Eine bundesweite Harmonisierung der Geräuschvorgaben auf hohem Niveau sollte durch einen Muster-NVP – Teil Geräusche angestrebt werden (z. B. durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI)), in die auch die Geräuschempfehlungen des VDV eingehen sollten (VDV 2011b). Als Regelungsbereich mit hoher Wirksamkeit sollten die Vorgaben für die Gleispflege verbessert werden (Überwachung und Schleifregimes). Die höhere Verbindlichkeit von Nahverkehrsplänen und das Instrument der Boni sollte durch eine entsprechende Verbesserung der finanziellen Förderung begleitet werden.
- Die Weiterentwicklung der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV oder von CNOSSOS-DE in Richtung einer differenzierteren Beschreibung der Emissionsannahmen für Straßenbahnkomponenten scheint ein relativ flexibles und pragmatisches Instrument mit einem hohen Grad an Umsetzungspotenzial zu sein. Es sollte dabei zum einen das Ziel sein, einen Katalog von Komponenten – auch für die Nachrüstung des Fahrzeug- und Fahrwegbestands einzuführen, denen eine bestimmte Emissionsminderung zugeordnet werden kann. Die Verkehrsunternehmen des Straßenbahnverkehrs haben dann die Möglichkeit, für ihre spezifischen Zwecke (Lärmvorsorge, Lärmaktionsplanung usw.) die optimale „akustische Dimensionierung der Quelle“ für die Einhaltung von Geräuschemissionsvorgaben für die Außenpegel zu wählen. Zum anderen sind in der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV Regelungen zu integrieren, die die Einhaltung der Emissionsannahmen auf Dauer sicherstellen. Das „Besonders überwachte Gleis“ bei den Eisenbahnen ist ein gutes Beispiel für eine Vorgabe für den Fahrflächenzustand der Schienen. Das Kapitel 9 Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV bietet grundsätzlich ein Verfahren an, mit dem der Katalog der emissionsmindernden Maßnahmen und die

Instandhaltungsvorgaben entwickelt werden können. Dazu sollte ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder aufgelegt werden, mit dem die Zulassungsfähigkeit lärmindernder Komponenten erreicht wird.

- Betriebsbeschränkungen spielen bis auf Geschwindigkeitsbeschränkungen vor allen in Kurven bei den Straßenbahnverkehren eine untergeordnete Rolle. Entsprechend schwierig ist eine Gestaltung von Modellen, die durch Benutzendenvorteile einen Anreiz für den Einsatz leiserer Fahrzeuge schaffen.

Kernbotschaften:

Grundsätzlich sollten aus Sicht des Immissionsschutzes die Regelungslücken im Ordnungsrecht beseitigt werden, das sind fehlende Geräuschemissionsgrenzwerte und fehlende Immissionsgrenzwerte für den Bestand. Aus den bisherigen Erfahrungen ist dies offensichtlich nur als langfristige Aufgabe umzusetzen.

Kurzfristig sind Geräuschemissionsvorgaben in Nahverkehrsplänen ein zielführendes Instrument. Ihre bundesweite Verbindlichkeit und Harmonisierung – auch als Signal an die Hersteller – müssen verbessert werden. Ein Bonusprogramm für besonders leise Straßenbahnen sollte mit einem Förderprogramm verknüpft werden. Als Regelungsbereich mit hoher Wirksamkeit sollten die Vorgaben für die Gleispflege verbessert werden.

Parallel dazu sind die Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV oder die nationale Umsetzung des CNOSSOS-Verfahrens in Richtung einer differenzierteren Beschreibung der Emissionsannahmen für Straßenbahnkomponenten weiterzuentwickeln, damit ein Katalog von amtlich zugelassenen leiseren Komponenten für die Straßenbahnen existiert.

5 Maßnahmen

5.1 Lärminderungsmaßnahmen an der Infrastruktur

5.1.1 Festlegungen gemäß 16. BImSchV für Fahrzeuge und Infrastruktur

In Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV sind Festlegungen zur Ermittlung der Emissionspegel in Abhängigkeit von der Fahrzeugart und Fahrbahnart enthalten. Als Basis für die Emissionsermittlung werden darin bestimmte Fahrzeugarten und Fahrbahnarten festgelegt. Hiervon abweichende Zustände werden durch Zu- und Abschläge berücksichtigt.

Die Schallausbreitung kann aktiv durch eine Abschirmung (Schallschutzwände aus unterschiedlichen Materialien, Höhen und Abständen zum Gleis) beeinflusst werden.

Tabelle 8: Basisdaten und Einflussgrößen zur Schallemissionsermittlung nach Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV

Basisdaten, Abweichungen und Anmerkungen	Fahrzeugart	Fahrbahnart
Basisdaten	Fahrzeuggeschwindigkeit $v = 100 \text{ km/h}$ Fahrzeuge mit acht Achsen für Straßenbahn – Niederflurfahrzeuge Straßenbahn – Hochflurfahrzeuge U-Bahn-Fahrzeuge	Ebenerdig verlegtes Schwellengleis im Schotterbett durchschnittlich gepflegtes Rad-Schiene-System
Abweichungen für	Geschwindigkeit - Korrekturen für Fahrgeräusche von Niederflur- und Hochflurfahrzeugen Fahrgeräusche von U-Bahnfahrzeugen Aggregatgeräusche	Straßenbündiger Bahnkörper und Feste Fahrbahn Begrünter Bahnkörper – Gleiseindeckung mit tiefliegender Vegetationsebene Begrünter Bahnkörper – Gleiseindeckung mit hoch liegender Vegetationsebene Weichen, Kreuzungen, Isolier- und Schweißstöße sowie Haltestellenbereiche Gleisbögen mit kleinen Radien Gleise auf Brücken und Viadukten
Anmerkungen	Rad- und Schienenrauheit werden als gleich angenommen und zeigen keine besonderen Auffälligkeiten wie Flachstellen, Riffel, Auskehlungen durch schleudernde Räder oder an Isolierstößen. Des Weiteren wird von runden Rädern ausgegangen (keine Polygone oder sonstige Unrundheiten). Als wirksame Schallminderungsmaßnahmen werden Radabsorber genannt.	Rad - und Schienenrauheit werden als gleich angenommen und zeigen keine besonderen Auffälligkeiten wie Flachstellen, Riffel, Auskehlungen durch schleudernde Räder oder an Isolierstößen. Des Weiteren wird von runden Rädern ausgegangen (keine Polygone oder sonstige Unrundheiten). Die erhöhten Schallemissionen der mit einem „*“ gekennzeichneten Gleisabschnitte werden z. T. durch Festlegung einer Mindestgeschwindigkeit in der

Basisdaten, Abweichungen und Anmerkungen	Fahrzeugart	Fahrbahnart
		Schallemissionsberechnung berücksichtigt. Als wirksame Schallminderungsmaßnahmen werden Behandlungsmaßnahmen am Schienenkopf genannt. Für die Eisenbahn werden folgende Schallminderungsmaßnahmen am Gleis genannt (diese Maßnahmen sind für den Einsatz bei Straßenbahnen bisher noch nicht ausreichend erprobt): besonders überwacht Gleis (büG) Schienenstegdämpfer Schienenstegabschirmung.

Quelle: Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV

Die in der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV gemachten Angaben stellen eine Art Referenz für den aktuellen Stand der Schallminderungstechnik auch für den Straßenbahnbereich dar. Die darin genannten Wirkungen von Schallminderungsmaßnahmen sind Mittelwerte, die aus zahlreichen Schallmessungen an Straßenbahnstrecken ermittelt worden sind.

Es bestehen vorrangig folgende Zielsetzungen für die Beschreibung von Lärminderungsmaßnahmen:

- Beschreibung der Maßnahmen, die dauerhaft den Zustand erhalten, der für die Schallemissionsberechnung zugrunde gelegt worden ist und
- Aufzeigen von zusätzlichen Lärminderungsmaßnahmen, mit denen eine weitere Lärminderung zu erreichen ist. Das Nachweisverfahren für die akustische Wirkung dieser Maßnahmen ist in Kapitel 9 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV festgelegt (Berücksichtigung von abweichender Bahntechnik und von schalltechnischen Innovationen).

In diesem Kapitel werden die bekannten Lärminderungsmaßnahmen an der Infrastruktur und den Fahrzeugen beschrieben und ihre möglichen schallmindernden Wirkungen dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Angaben von Pegelminderungen immer auf einen Bezugszustand beziehen. Die Pegelmindernde Wirkung ist des Weiteren von den lokalen Randbedingungen abhängig. Dies bedeutet, dass dieselbe Maßnahme an unterschiedlichen Orten zu verschiedenen Pegelminderungen führen kann. Die im Folgenden genannten Minderungspegel stellen somit Mittelwerte dar, mehr oder weniger große Abweichungen in beide Richtungen sind möglich.

5.1.2 Übersicht über die Maßnahmen

Schallminderungsmaßnahmen an der Infrastruktur kommen grundsätzlich infrage in den drei Bereichen:

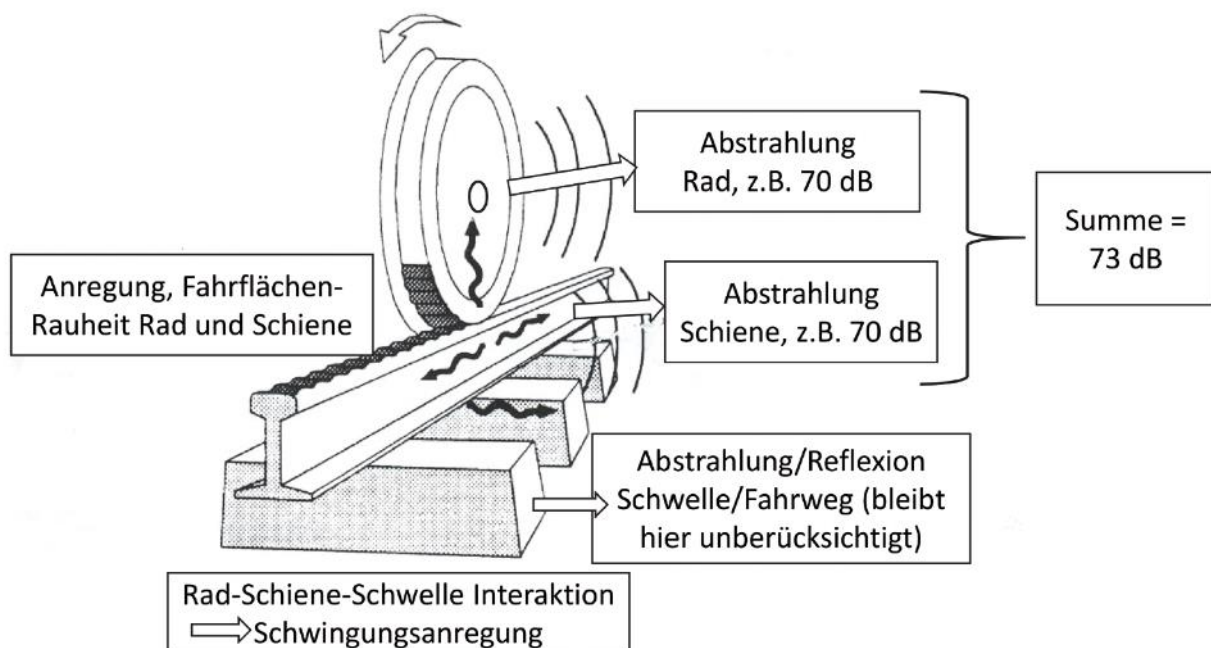
- Streckenführung,
- Maßnahmen an der Quelle (Schienen, Oberbau) sowie

► Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg (z. B. Schallschutzwände).

Für die Bewertung von Schallemissionen, -immissionen und -minderungsmaßnahmen wird die dB-Skala verwendet. Hierbei ist zu beachten, dass die Summe von zwei gleich großen Pegeln von unabhängigen Quellen eine Erhöhung um 3 dB ergibt. In Abbildung 42 ist dies beispielhaft für das Rad/Schiene-System dargestellt. Umgekehrt gilt dann auch, dass maximal eine Minderung des Summenpegels von 3 dB möglich ist, wenn eine der beiden Teilquellen Rad oder Schiene in Abbildung 42 völlig abgeschirmt ist. In dem dargestellten Beispiel bedeutet das, dass bei einer völligen Kapselung der Schiene der Summenpegel maximal um 3 dB gemindert werden kann. Dies gilt für den Fall, dass Rad und Schiene gleich laut sind. Bei den im Folgenden dargestellten Lärmminderungsmaßnahmen ist dies zu beachten. Die Aussage für die Schiene gilt ebenfalls für alle anderen schallabstrahlenden Bauteile eines Fahrzeuges.

Bei der Angabe von Pegelminderungen ist immer darauf zu achten welche Zustände miteinander verglichen werden. Beispielsweise kann durch Schleifen einer stark verriffelten Schienenfahrfläche eine Minderung von bis zu 15 dB erreicht werden. Wird durch regelmäßige Schleifarbeiten immer wieder ein guter Schienenfahrflächenzustand hergestellt, dann kann eine Minderung von etwa 3 dB bis 6 dB erreicht werden (aufgeraute Schienenfahrfläche zur glatter Schienenfahrfläche). Entsprechende Aussagen gelten auch für die Radfahrfläche. Beispielsweise führt die Umrüstung der Güterwagen z. B. bei der DB AG von Grauguss-Bremssohlen auf Komposit-Bremssohlen zu einer Schallminderung von bis zu 10 dB, da die Radfahrflächen durch die anderen Bremssohlen weniger aufgeraut werden.

Abbildung 42: Auswirkung beim Zusammenwirken zweier gleich lauter, unabhängiger Schallquellen



Quelle: Dittrich und Hemsworth 1997 (bearbeitet: STUVA)

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Maßnahmen in einem Katalog zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Einsatzmöglichkeiten beschrieben und bewertet. Dabei kann bei bereits seit vielen Jahren bekannten Maßnahmen auf die Erfahrungen im Praxiseinsatz bei den Verkehrsunternehmen zurückgegriffen werden. Bei innovativen Maßnahmen, die teils

erst in wenigen (Forschungs-)Projekten bei der Eisenbahn erprobt wurden, werden Abschätzungen für den Einsatz bei Straßenbahnen gegeben.

Um die aus dem Betrieb von Straßenbahnen entstehenden Schallemissionen nachhaltig zu mindern, ist allerdings grundsätzlich das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg zu betrachten. Maßnahmen zur Emissionsminderung am Fahrzeug finden sich in Abschnitt 5.2.

In Tabelle 9 sind mögliche Maßnahmen, die zu einer Lärmreduzierung führen können, hinsichtlich ihrer Nachrüstbarkeit und des erforderlichen Wartungsaufwandes zusammengestellt. Der Begriff „Maßnahmen“ beinhaltet hier auch Gestaltungsmöglichkeiten für die Streckenführung.

Tabelle 9: Maßnahmen im Bereich der Infrastruktur und im Rad/Schiene-Kontaktbereich und deren akustische Wirkung

Maßnahme	Wirkung auf Rollgeräusche ¹⁷	Wirkung auf Stoßgeräusche ¹⁷	Wirkung auf Kurvengeräusche ¹⁷	Nachrüstbarkeit	Kontroll- und Instandhaltungsaufwand	Anwendung straßenbündiger Bahnkörper	Anwendung besonderer Bahnkörper	Anwendung unabhängiger Bahnkörper
Vermeidung kleiner Gleisbogenradien mit weniger als 50 m	gering	gering	sehr hoch	nein	hoch	ja	ja	ja
Verwendung von Gleisbogenradien zwischen 50 m und 200 m	gering	gering	hoch	nein	mittel	ja	ja	ja
Wartungsschleifen der Schienenfahrfläche	sehr hoch	gering	keine	nicht relevant	regelmäßig	ja	ja	ja
Akustisches Schleifen, z. B. Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	sehr hoch	gering	keine	nicht relevant	regelmäßig	ja	ja	ja
Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	sehr hoch	gering	keine	nicht relevant	bei Bedarf	ja	ja	ja
Schienenstegdämpfer (SSD)	gering	gering	mittel	ja	bei Bedarf	nein	ja	ja
Schienenstegabschirmung (SSA)	gering	gering	mittel	ja	bei Bedarf	nein	ja	ja
Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	gering	gering	gering	ja	ja	nein	ja	nein
Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	mittel	gering	gering	ja	ja	nein	ja	nein

¹⁷ Akustische Wirkung der Maßnahmen (näherungsweise): gering: unter 3 dB(A); mittel: 3 dB(A) bis unter 6 dB(A); mittel bis hoch 6 dB(A) bis unter 9 dB(A); hoch 9 dB(A) bis unter 12 dB(A); hoch bis sehr hoch 12 dB(A) bis unter 15 dB(A); sehr hoch mehr als 15 dB(A).

Maßnahme	Wirkung auf Rollgeräusche ¹⁷	Wirkung auf Stoßgeräusche ¹⁷	Wirkung auf Kurvengeräusche ¹⁷	Nachrüstbarkeit	Kontroll- und Instandhaltungsaufwand	Anwendung straßenbündiger Bahnkörper	Anwendung besonderer Bahnkörper	Anwendung unabhängiger Bahnkörper
Schräger Isolierstoß	gering	mittel	keiner	ja	ja	ja	ja	ja
Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich	keine	mittel bis hoch	keine	ja	ja	nein	ja	ja
Auftragsschweißen in Gleisbögen	gering	keine	mittel	ja	ja	ja	ja	nein
Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	keine	keine	hoch bis sehr hoch	ja	ja	ja	ja	ja
Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	keine	keine	hoch bis sehr hoch	ja	ja	ja	ja	ja
Schienenkopfflankenschmierung	keine	keine	gering	ja	ja	ja	ja	ja
Absorptionskörper im Gleis	gering	keine	keine	ja	in der Regel nein	nein	ja	ja
Schallschutzwände - hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch	ja	gering	nein	ja	ja
Schallschutzwände - niedrig	mittel	mittel	mittel	ja	gering	nein	ja	ja

Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.1.3 Vermeidung kleiner Gleisbogenradien

5.1.3.1 Technik

Durch die Vermeidung kleiner Gleisbogenradien wird der Anlaufwinkel der Räder und damit das Quergleiten bei der Bogenfahrt vermindert. Um Quietschen weitgehend zu vermeiden, sollten Gleisbögen mit einem Radius $r < 100$ m vermieden werden. Um auch Zischgeräusche weitgehend zu vermeiden, sollten Gleisbögen keinen Radius $r < 500$ m aufweisen. Ab einem Radius $r = 500$ m sind in der Regel keine Kurvengeräusche (Quietschen, Zischen) mehr zu erwarten.

5.1.3.2 Akustische Wirkung

Je größer die Bogenradien gewählt werden, desto unwahrscheinlicher ist das Auftreten von Kurvengeräuschen.

5.1.3.3 Anwendungserfahrung

Die Streckenführung von Straßenbahngleisen im Straßenbereich, dies gilt sowohl für straßenbündige als auch für besondere Bahnkörper, ist an die vorhandenen Gegebenheiten anzupassen. Insbesondere gilt dies bei Straßenkreuzungen, gekrümmten Straßenverläufen, vorhandenen Geh- und Radwegen sowie an privaten Eckgrundstücken, die nicht für die Streckenführung genutzt werden können. Ein besonderes Problem ergibt sich an Endhaltestellen mit Wendeschleifen. Solche Wendeschleifen sind insbesondere bei Verkehrsunternehmen erforderlich, bei denen vorwiegend oder ausschließlich Einrichtungsfahrzeuge eingesetzt werden.

Die Radien der Gleisbögen sind somit weitestgehend durch den Straßenverlauf und die Lage des Bahnkörpers vorgegeben. Der Vermeidung von Kurvengeräuschen durch die Wahl größerer Radien sind somit Grenzen gesetzt. Dies gilt vor allem für den Bestand, aber auch für Neubaustrecken, bei denen Straßenbahnstrecken nicht losgelöst vom Straßenraum geplant und gebaut werden.

5.1.4 Präventive Schieneninstandhaltung (Wartungs- und akustisches Schleifen)

Der Zustand der Fahrflächen von Schienen (und Rädern) hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schallemissionen beim Betrieb von Straßenbahnen. Riffel, Schlupfwellen, Überwalzungen und im Extremfall auch Ausbrüche führen zu Anregungen von Schiene und Rad und den daraus resultierenden Schallemissionen (vgl. Abschnitt 2.5.2.2). Schlechte Pflege der Gleise und der dadurch raschere Verschleiß können mit all ihren Ursachen dazu führen, dass die Schallemissionen gegenüber Schienen mit einwandfreier Fahrfläche um bis zu 15 dB höher liegen (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a).

Durch regelmäßiges präventives Schleifen kann ein guter Schienenzustand mit geringer Schienenrauheit erzielt werden, um die Rollgeräusche dauerhaft gering zu halten. Kurz nach dem Schleifen kann es durch eingeschliffene Querriefen in die Schienenfahrfläche zu einer Schallpegelerhöhung kommen. In der Regel werden diese Riefen nach kurzer Zeit durch die überfahrenden Fahrzeuge geglättet und der Schallpegel gemindert. Durch Schleifen mit Rutschersteinen kann dieser Einfluss gemindert werden da hierdurch nur Riefen in Schienenlängsrichtung erzeugt werden, die akustisch weniger wirksam sind.

5.1.4.1 Technik

Grundsätzlich zu unterscheiden sind (vgl. Tabelle 10):

- Neuschienenschliff (Entfernung von Bauschmutz und Walzhaut) und
- Pflegeschliff (Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines guten Zustandes des Schienenkopfs).

Tabelle 10: Schienenbearbeitungsmethoden und ihre Anwendungsbereiche im ÖPNV

Art der Schienenbearbeitung	Technik	Anwendungsbereich
Schleifen mit Rutschersteinen (Schleifzug)	Schleifsteine werden in einem Arbeitsgang über die Schiene gezogen	Neuschliff, Pflegeschliff (keine Reprofilierung)
Oszillierendes Schleifen (Schleifzug)	Schleifsteine werden in einem Arbeitsgang über die Schiene gezogen bei gleichzeitigem Oszillieren (Hin- und Herbewegung) in Längsrichtung	Neuschliff, Pflegeschliff (keine Reprofilierung)
Schleifen mit rotierenden Scheiben oder Töpfen (Schleifzug)	mehrere rotierende Schleifscheiben werden im Winkel zur Fahrkante stehend über die Schiene geführt	Neuschliff, Reprofilierung
Schienen- oder handgeführte Schleifgeräte	Rotierende Scheiben oder Bandschleifgeräte	Weichen und enge Kreuzungen, in denen der Einsatz eines Schleifzuges nicht möglich ist
Hochgeschwindigkeitsschleifen (High Speed Grinding)	Rotierende Scheiben (passiver Antrieb)	Neuschliff, Pflegeschliff

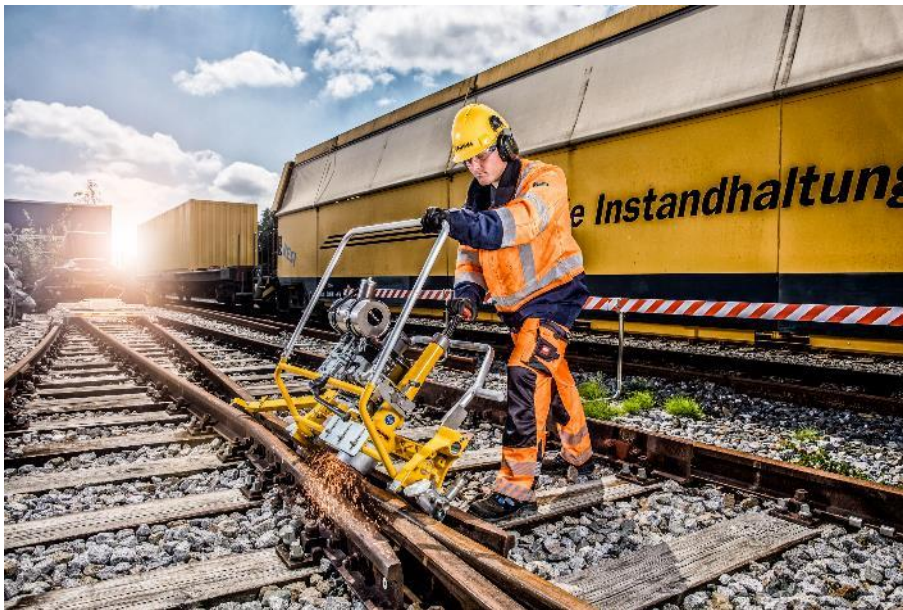
Quelle: Eigene Darstellung

Grundsätzlich gilt, dass die besten Schleifergebnisse durch Fahrzeuge mit einem hohen (Gegen-) Gewicht erzielt werden. Zweiwege-Schleifmaschinen oder mit Schleifeinrichtungen ausgestattete herkömmliche Schienenfahrzeuge haben sich als geeignet erwiesen. Die Geräte sind einsetzbar, ohne dass der normale Schienenverkehrsbetrieb unterbrochen werden muss. Fahrzeuge mit Rutschersteinen oder oszillierender Schleiftechnik sind auch bei in Straßen eingebetteten Gleisen einsetzbar.

Manuelle Schleifmaschinen (Abbildung 43) kommen beim Schleifen von Schweißstößen oder bei kurzen verriffelten Abschnitten zum Einsatz, auf denen keine Schleifzüge eingesetzt werden können, z. B. in Weichenbereichen (Herzstücke) und in Kreuzungsbereichen.

Die unterschiedlichen Verfahren führen dabei bei ihrer Anwendung selbst zu Schallemissionen, die unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Abbildung 43: Schleifen eines Herzstückes mit einer Handschleifmaschine



Quelle: Robel Bahnbaumaschinen GmbH 2020

Eine weitere Form des akustischen Schleifens ist das Hochgeschwindigkeitsschleifen (High Speed Grinding, kurz: HSG). Dabei handelt es sich um im Nahverkehr noch recht junges Verfahren des präventiven Schienenschleifens. Die Technologie wurde aus dem Bereich der Eisenbahn für den Nahverkehr adaptiert. Da bei diesem Verfahren Arbeitsgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h (im Nahverkehr) möglich sind, ist die Behandlung der Schienen in der Regel ohne betriebsbehindernde Gleissperrungen möglich. Dies stellt einen großen Vorteil gegenüber den konventionellen Schleifverfahren dar. Allerdings ist der erforderliche Abtrag u. U. nur durch mehrfaches Überfahren mit der HSG-Maschine zu erreichen.

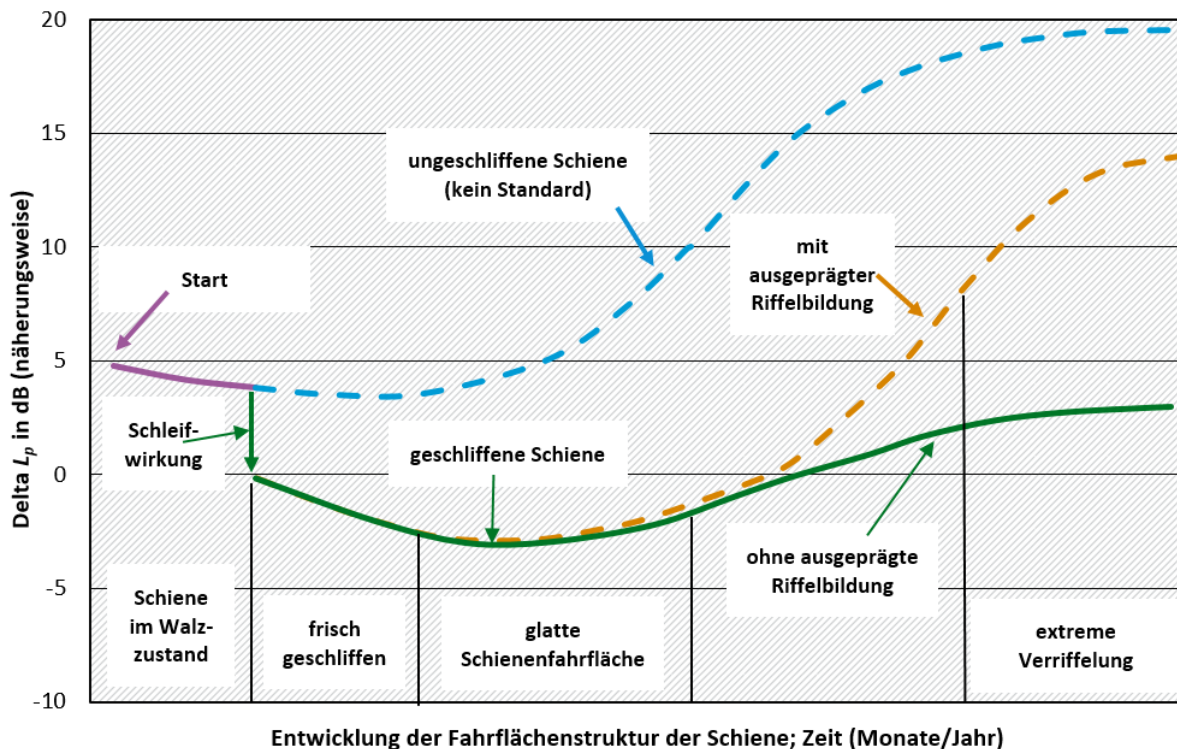
Das HSG-Verfahren basiert auf dem Prinzip des Umfangschleifens, wobei alle Schleifkörper der Maschine passiv angetrieben und hydraulisch am Gleis angesetzt werden. Die schräg zur Schiene stehenden Schleifsteine werden durch die Längsbewegung des Schleifzugs in Rotation versetzt. Durch das Rotieren der Schleifkörper wird die oberste Schadschicht an der Schiene vollständig abgetragen, bevor Risse entstehen. Somit werden Riffel und Schlupfwellen reduziert und so das Längsprofil optimiert. Durch das präventive Schleifen sollen insbesondere Rollkontaktschäden und eine schnelle Verriffelung vermieden werden. Aufgrund der hohen Arbeitsgeschwindigkeit von bis zu 60 km/h wird bei jeder Behandlung ein Abrieb von ca. 0,1 mm erzielt.

5.1.4.2 Akustische Wirkung

5.1.4.2.1 Vorbeugendes Schleifen bei neu verlegten Gleisen

Neu verlegte Schienen sollten möglichst frühzeitig geschliffen werden, da durch den Schliff die sogenannte Walzhaut (Walzsinter) auf der Fahrfläche entfernt wird. Dadurch bilden sich im Vergleich mit den unbearbeiteten Schienen Riffel erst zu einem späteren Zeitpunkt aus (vgl. STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 101). Zwischen neu verlegten geschliffenen und neu verlegten ungeschliffenen Schienen können sich Differenzpegel von bis zu 5 dB ergeben (Abbildung 44).

Abbildung 44: Tendenzieller Einfluss des vorbeugenden Schleifens der Schienenfahrflächen auf die Verminderung von Schallemissionen



ΔL_p : Schallpegeldifferenz, bezogen auf den Schallpegel bei ungeschliffener sowie frisch geschliffener Schienenfahrfläche.

Quelle: STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 102

5.1.4.2.2 Akustisches Schleifen (Pflegeschleif, Präventivschleifen)

Um einen guten Zustand der Schienenfahrflächen und damit eine weitgehend gleichbleibende akustische Qualität des Gleises zu erhalten, sind Schleiffahrten in regelmäßigen Intervallen durchzuführen (Pflegeschleif). Die Eingriffsschwelle für das präventive Schleifen im Straßenbahnbereich ist nicht verbindlich und einheitlich geregelt, sie kann von jedem Netzbetreiber selbst festgelegt werden. Daher können der Ausgangszustand der Schienen und damit auch die akustische Wirkung des Schleifens sehr unterschiedlich sein. Durch das Schienenschleifen sind, je nach Ausgangszustand des Gleises, durchaus Pegelminderungen bis zu 10 dB und mehr möglich (Abbildung 44).

Um eine gleichbleibend geringe akustische Wirkung zu erzielen, sind stark riffelanfällige Abschnitte (mit hoher Belastung oder im Brems-/Anfahrbereich von Haltestellen) entsprechend häufiger zu schleifen als weniger anfällige Abschnitte.

5.1.4.2.3 Hochgeschwindigkeitsschleifen

Die Minderung der Emissionen beim Hochgeschwindigkeitsschleifen entspricht in der Wirkung der konventionellen Schleifverfahren mit Rutschersteinen. Bei der Eisenbahn wurde auf Basis der Ergebnisse von mehreren Messreihen nachgewiesen, dass das HSG dem Verfahren „besonders überwacht Gleis“ (büG) akustisch gleichzusetzen ist und damit hohen Ansprüchen an „leise Gleise“ genügt. Im zeitlichen Mittel wurde derselbe Grundwert (Zielvorgabe), der in der alten Schall 03 von 1990 festgelegt war, erreicht. Die Schwankungsbreite zwischen dem oberen und dem unteren Zielwert war jedoch geringer (DB Netz AG 2012, S. 72).

5.1.4.3 Anwendungserfahrungen

Einer Umfrage zufolge werden Pflegearbeiten allein aus akustischen Gründen von den meisten Verkehrsunternehmen nicht bevorzugt angewendet, aber – wenn sie durchgeführt werden – dann werden diese von den Unternehmen als besonders wirksam eingestuft.

Als Maßnahme, die von den Verkehrsunternehmen am häufigsten zur Schienenpflege eingesetzt wird, wurde das Schleifen mit Rutschersteinen genannt (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a). Nahezu alle Verkehrsunternehmen schleifen damit „häufig“, und zwar vorzugsweise mit eigenen, herkömmlichen Schienenfahrzeugen, die im Eigenbau umgestaltet wurden. Aber auch „professionelle“ Schleifverfahren, z. B. mit rotierenden Schleifscheiben, werden zunehmend häufiger von den Verkehrsunternehmen eingesetzt (Abbildung 45).

Abbildung 45: Schienenschleifzug mit Rutschersteinen



Quelle: Bremer Straßenbahn AG 2020

HSG wird in Deutschland bislang überwiegend auf hoch belasteten Strecken mit starken Verkehrslasten und hohen Geschwindigkeiten im Schienennetz der Eisenbahn eingesetzt. In Nahverkehrsnetzen wurden erste Versuche u. a. in Hamburg, Stuttgart, Kopenhagen und Stockholm durchgeführt bzw. eigene Maschinen erworben (Düsseldorf, Abbildung 46).

Der Einsatz dieser Technologie ist auch für kleinere Verkehrsunternehmen möglich. Diese haben neben dem Kauf der Maschine die Möglichkeit, sich die Maschinen entweder für die jeweilige Schienenbehandlung zu leihen oder die Behandlung durch Fremdfirmen durchführen zu lassen.

Die positiven akustischen Effekte wurden durch zahlreiche Untersuchungen als „Zusatznutzen“ nachgewiesen. Hinsichtlich der Schienenqualität, Streckenverfügbarkeit und Life Cycle Costs erzielt das HSG-Verfahren die besten Resultate. Gemäß Untersuchungen der Deutschen Bahn und der Technischen Universität Berlin verdoppelt dieses Verfahren die Schienenlebensdauer.

Abbildung 46: Schleifzug „HSG-city“ der Rheinbahn in Düsseldorf



Quelle: Rheinbahn AG 2020

5.1.5 Korrektive Schieneninstandhaltung (Fräsen, Hobeln)

5.1.5.1 Technik

Trotz präventiver Schieneninstandhaltung können sich Schadstellen auf den Schienenköpfen ergeben, die durch präventives Schleifen nicht mehr zu beseitigen sind. Zur Beseitigung dieser akut auftretenden Mängel muss eine korrektive Bearbeitung des Schienenkopfs erfolgen, z. B. eine Reprofilierung, um das vorgegebene Schienenkopfprofil wiederherzustellen. Die Reprofilierung der Schienenfahrflächen erfolgt insofern nicht präventiv, sondern reaktiv in Abhängigkeit des Schienenzustands.

5.1.5.2 Akustische Wirkung

Aufgrund von schwerwiegenden Schadstellen in der Schiene (z. B. tiefe Risse und Ausbrüche) können sich Schallemissionen ergeben, die um bis zu 15 dB(A) über Emissionen einwandfreier Schienen liegen können. Die tatsächliche Wirkung ist aber nur für den Einzelfall quantifizierbar. Bei einer Überprüfung der akustischen Wirkung bei verriffelten Schienen (keine sicherheitsrelevante Eingriffsschwelle) wurde nach weitgehender Beseitigung der Riffel durch das Fräsen eine Minderung der Schallemissionen aus dem Rollgeräusch um 5 dB(A) bis 7 dB(A) gemessen (Krüger 2008, S. 10).

Nach Maßnahmen zur Reprofilierung der Schienenköpfe sollte aus akustischen Gründen anschließend immer auch ein akustisches Schleifen durchgeführt werden. Erst durch diesen Feinschliff lassen sich die gewünscht niedrigen Emissionspegel durch glatte Fahrflächen erreichen (vgl. Hartleben 2003).

5.1.5.3 Anwendungserfahrung

Bereits seit einigen Jahren gibt es mobile Fräsmaschinen für den Einsatz in Nahverkehrs-Schienennetzen (vgl. Moser und Stock 2018, S. 38f.). Sie können daher im Bedarfsfall von Verkehrsunternehmen bzw. den Netzbetreibern geliehen bzw. gemietet werden (erfolgt z. B. im Straßenbahnnetz Bonn). Die Maschinen erledigen dabei die Reprofilierung und das akustische Schleifen in einem Arbeitsgang.

Wie auch beim Schleifen mit dem HSG gibt es seit kurzem entsprechende Hochleistungs-Fräsmaschinen für den Einsatz in den Nahverkehrsnetzen (vgl. Hartenstein 2018, S. 32). Der Einsatz ist auf allen Schienenarten (Rillen- und Vignolschienen) möglich. In Weichenbereichen ist die Bearbeitung aller Bereiche bis auf einen Teil des Herzstücks möglich. Dort muss mit einer manuell zu bedienender Maschine gearbeitet werden.

5.1.6 Schienenstegdämpfer

5.1.6.1 Technik

Beim Schienenstegdämpfer (SSD, Abbildung 47) handelt es sich um ein Dämpfungssystem auf Masse-Feder-Basis, welches eine Reduktion der Schwingungen der Schiene bewirkt. SSD werden in kurzen Abständen an beide Seiten des Schienenstegs bzw. je nach Produkt auch am Schienenfuß kraftschlüssig montiert. Durch SSD wird die Luftschallabstrahlung direkt an der Quelle vermindert (vgl. BMVI 2016, S. 55). Die Ausführung des Masse-Feder-Systems kann in Abhängigkeit der/des Herstellenden sehr unterschiedlich sein, z. B. Ausbildung als Stahlblech-Sandwichelement mit zwischenliegendem Dämpfungsmaterial, als Stahlprofil mit frequenzabgestimmter Masse, eingebettet in eine Elastomer-Matrix oder als Kunststoffblock.

Abbildung 47: Beispiel für einen Schienenstegdämpfer



Quelle: Schrey & Veit

Bei einer anderen Variante dieser Technik bedeckt die Schienenstegdämpfung (SSD) den gesamten Schienensteg (Abbildung 48). Für die Befestigung des Dämpfers an der Schiene

bestehen unterschiedliche Verfahren. Es gibt Lösungen, bei denen die Elemente mithilfe von Klammern am Schienenfuß befestigt werden. Teils werden Kleber zur Fixierung verwendet. Um die raue Schienenstegoberfläche auszugleichen wurden weiche Elastomerfolien und Kleber eingesetzt. Hiermit kann eine verbesserte Wirksamkeit der Elemente erreicht werden (vgl. VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2007, S. 452). Dieser SSD zeichnet sich u. a. durch die geringe Masse der Elemente aus.

Abbildung 48: Beispiel für Schienenstegdämpfung, Befestigung mit Klammern

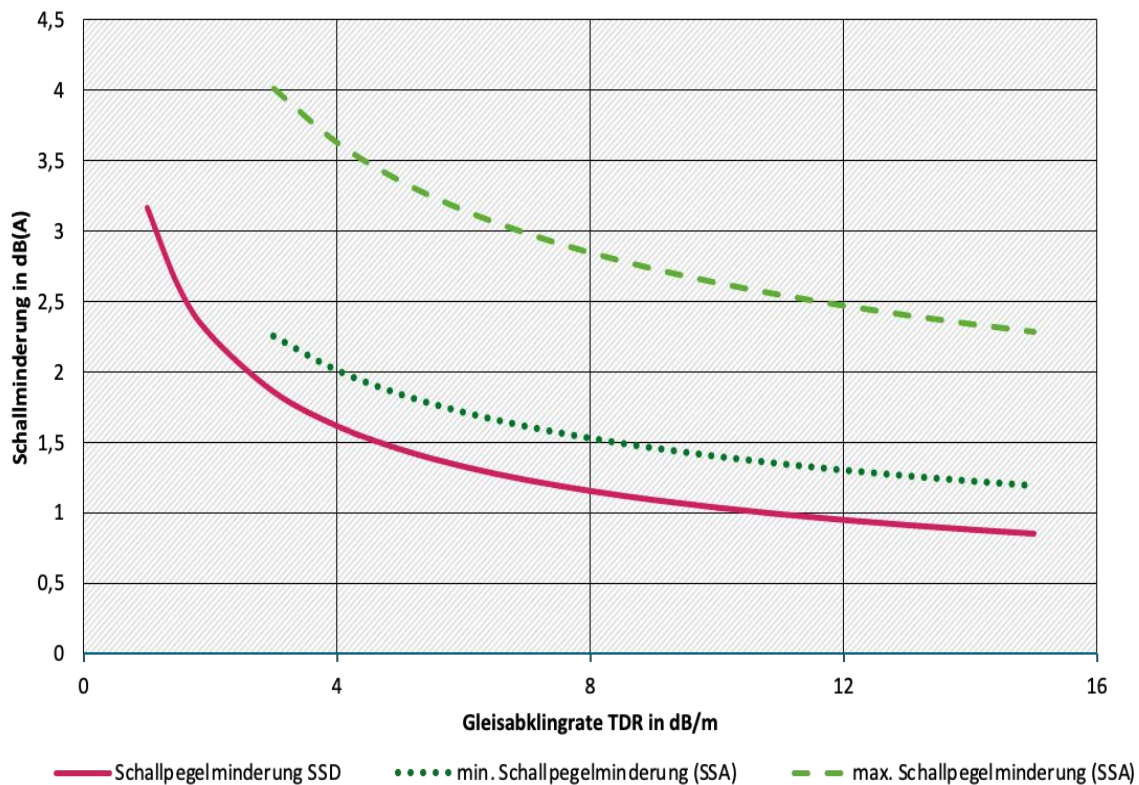


Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.1.6.2 Akustische Wirkung

Die Schienenschwingungen (Körperschall) werden durch den Dämpfer unmittelbar reduziert, weshalb der durch die Schiene abgestrahlte Luftschall bei der Überfahrt eines Zuges gemindert wird. Dies bestätigt auch eine durch die SSD erhöhte Gleisabklingrate (Track Decay Rate, TDR) in dem Frequenzbereich, in welchem die Schiene maßgeblich zur Schallabstrahlung beiträgt (Koller 2018, S. 25). Die TDR beschreibt die Amplitudenabnahme der Schwingungen in Schienenlängsrichtung. Damit wird vor allem der Pegelanteil des Rollgeräusches von Schiene und Schwelle (etwa 1.000 Hz bis 2.000 Hz) verringert. Dies ist der pegelbestimmende Frequenzbereich der Schiene, der durch die A-Bewertung nur geringfügig beeinflusst wird. Die Dämpfungswirkung steht dabei in unmittelbarem Zusammenhang zur Gleisabklingrate (Abbildung 49). Bei einer Abklingrate im Bereich von weniger als 2 dB/m ist eine Geräuschreduktion von über 2 dB zu erwarten. Mit steigender TDR wird die Minderung durch die SSD geringer.

Abbildung 49: Zusammenhang zwischen der Wirkungsweise der Schienenstegdämpfung (SSD) bzw. Schienenstegabschirmung (SSA) und der Gleisabklingrate (TDR)



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Koller 2018, S. 26)

Die Wirksamkeit der Dämpfer ist unabhängig von der Schienenfahrflächenrauheit. Eine größere Rauheit regt Rad und Schiene zwar stärker an, hat aber keinen Einfluss auf die Abklingrate. Zudem hat sich gezeigt, dass die Wirksamkeit der Pegelminderung sich in Abhängigkeit des Dämpfertyps unterscheidet (DB Netz AG 2012, S. 24).

Auf den Strecken, an denen Schienenstegdämpfer eingesetzt werden, kann unabhängig vom Fahrzeugtyp für alle Vorbeifahrten eine Verringerung der Schallemissionen erreicht werden. Die Wirkung gegenüber Kurvenquietschen ist deutlich besser als bei der Minderung des Rollgeräusches. Bei der Überfahrt werden hierdurch in Gleisbögen vor allem die Pegelspitzen der Quietschgeräusche abgemindert (vgl. VDV und VDV-Förderkreis e. V. (Hg.) 2007, S. 452). Für sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen liegen keine fundierten Erkenntnisse vor.

Die Messergebnisse beziehen sich hierbei lediglich auf Schwellengleise im Schotterbett. Es liegen derzeit keine Messergebnisse für den Einsatz auf Fester Fahrbahn vor. Es ist jedoch anzunehmen, dass v. a. in Bereichen mit Fester Fahrbahn, wo es zu einer erhöhten Schallabstrahlung der Schiene kommt, mindestens dieselbe bzw. sogar eine bessere Wirksamkeit erzielt werden kann. Bei einem höheren Anteil der Luftschallabstrahlung der Schienen führt deren Reduzierung zu einer größeren Minderung in der Gesamtgeräuschemission.

5.1.6.3 Anwendungserfahrung

Schienenstegdämpfer können an nicht eingebettete Schienen montiert werden und kommen zur Verringerung des Rollgeräusches auf geraden Streckenabschnitten in Betracht, vor allem aber in Gleisbögen zur Verringerung von Kurvengeräuschen.

5.1.7 Schienenstegabschirmung

5.1.7.1 Technik

Die Schienenstegabschirmung (SSA) vermindert nicht die Schwingungsenergie der Schiene, sondern sie mindert die Ausbreitung des von der Schiene abgestrahlten Luftschalls. Sie wirkt prinzipiell wie eine kleine Schallschutzwand (Abbildung 50).

Abbildung 50: Prinzip und Anwendungsbeispiel für eine Schienenstegabschirmung

Prinzipielle Funktionsweise (links) und Anwendungsbeispiel an einer Eisenbahnstrecke (rechts).



Quelle: Sekisui Chemical GmbH und Koocoo Technology & Consulting GmbH 2020

5.1.7.2 Akustische Wirkung

Im Gegensatz zu den Schienenstegdämpfern (Abschnitt 5.1.6), welche als Masse-Feder-System die Schwingungsenergie der Schiene und damit den sich in der Schiene ausbreitenden Körperschall reduzieren, behindern SSA den vom Schienensteg und -fuß abgestrahlten Luftschall in seiner Ausbreitung. Die Schallausbreitung wird durch diese Abschirmungstechnik folglich direkt im Bereich der Quelle gemindert. Die Gleisabklingrate (Track Decay Rate) wird im Gegensatz zur Anwendung von SSD nicht wesentlich beeinflusst. Lediglich für die horizontale Abklingrate sind geringe Einflüsse möglich, was auf die Befestigung der Dämpfungselemente am Schienenfuß zurückgeführt wird (DB Netz AG 2012, S. 26).

Auch SSA wirken sich lediglich auf den Rollgeräuschanteil der Schiene pegelmindernd aus. Die Emissionen durch Rad und Schwelle werden praktisch nicht beeinflusst. Bei Erprobungen, die bei der DB AG für unterschiedliche Zuggattungen im Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h bis 160 km/h erfolgten, wurde im Mittel ein Minderungspotenzial für den Gesamtpegel von ca. 3 dB ermittelt (DB Netz AG 2012, S. 27).

5.1.7.3 Anwendungserfahrung

Wie auch die SSD lassen sich die SSA zur Verringerung des Luftschalls nur an nicht eingebetteten Schienen verwenden. Sie kommen somit in der Anwendung auf geraden Strecken mit offenliegenden Schienen in Betracht, um das Rollgeräusch zu mindern.

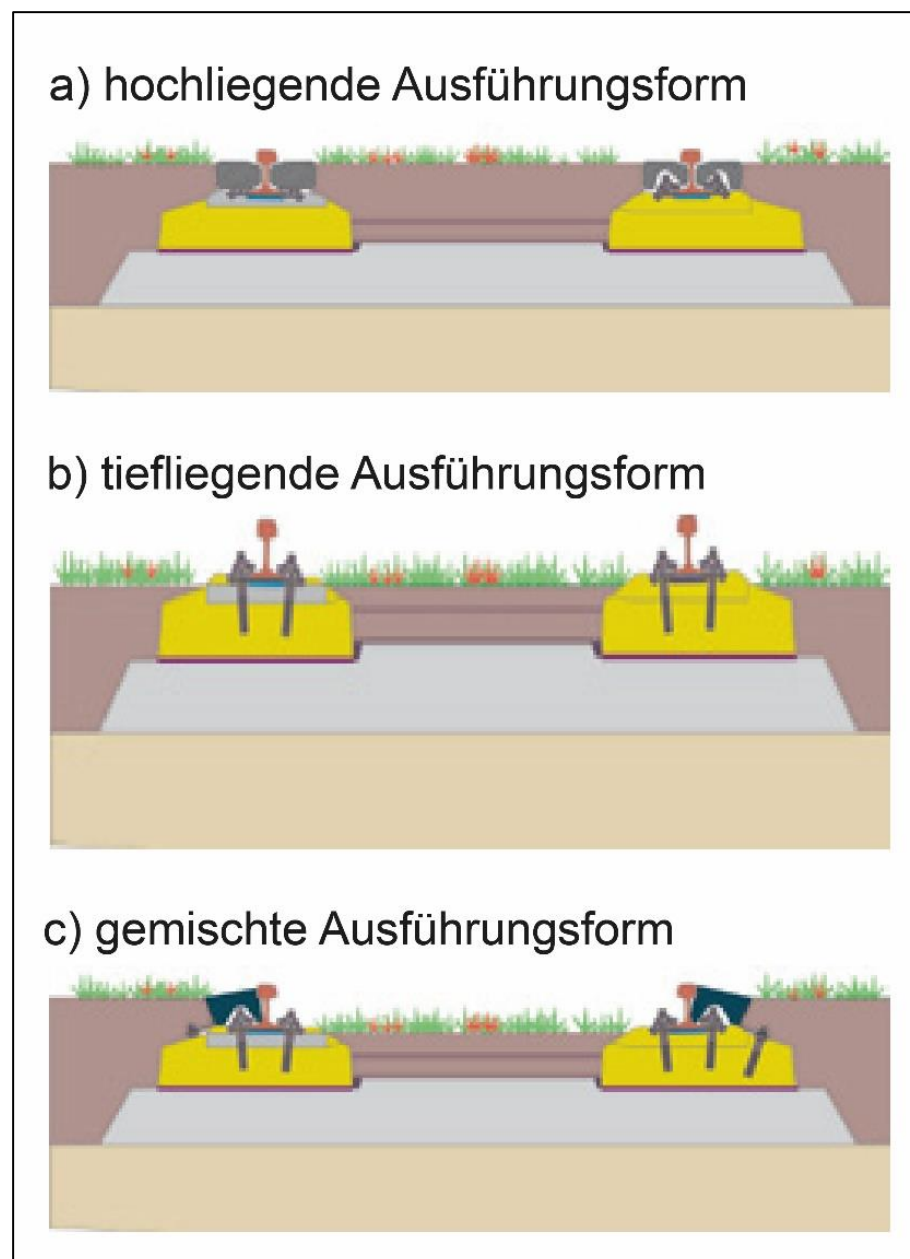
5.1.8 Begrünte Bahnkörper

5.1.8.1 Technik

Kann der Bahnkörper als besonderer Bahnkörper ausgeführt werden, stellt das Grüne Gleis eine aus akustischer Sicht gute Alternative bei der Oberbauausführung dar. Begrünte Bahnkörper können sowohl als Rasengleis als auch als Sedumgleis (Begrünung mit dickblättrigen Pflanzenarten) ausgeführt werden. Die Ausführungsformen unterscheiden sich weiterhin in der Höhe der Vegetationsebene. Insgesamt wird diesbezüglich in drei unterschiedliche Ausführungsformen unterschieden (Abbildung 51): hochliegend (Schiene wird beidseitig vollständig abgeschirmt), tiefliegend (Schiene liegt frei) und als Sonderlösung gemischt (Schiene wird nur auf einer Seite abgeschirmt).

Abbildung 51: Ausführungsformen von begrünten Bahnkörpern

Ausführung jeweils als Rasengleis



Quelle: Grüngleis Netzwerk 2014

Zur fachgerechten und dauerhaften Umsetzung begrünter Bahnkörper bedarf es der Beachtung einiger technischer Hinweise bei Aufbau und Instandhaltung, beispielsweise bezüglich der (elektrischen) Schienenisolierung, der Bewässerung sowie der Arbeitsgänge bei der Instandhaltung der Schiene (Grüngleis Netzwerk 2014, 57ff.).

Begrünte Bahnkörper erfüllen in Abhängigkeit der Höhe der Eindeckung Kriterien des offenen oder geschlossenen Oberbaus. Sie werden in der VDV Schrift 604 (VDV 2019) als Oberbau mit planmäßiger Vegetation aufgeführt.

5.1.8.2 Akustische Wirkung

Begrünte Bahnkörper haben im Vergleich zu Fahrbahnen mit harter Oberfläche, wie z. B. Feste Fahrbahn oder in Straßen eingebettete Gleise eine deutliche schallmindernde Wirkung.

Begrünte Bahnkörper können gegenüber einem Schottergleis mit Holzschwellen eine schallmindernde Wirkung von 2 dB bis 3 dB erreichen. Die Minderung ist abhängig von der Ausführung als Gleis mit tiefliegender oder als Gleis mit hochliegender Vegetationsebene. U. a. aufgrund abgedeckter Schienen bei hochliegender Vegetationsebene ergeben sich hierfür geringere Emissions-Pegel (vgl. Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

Ein weiterer Vorteil begrünter Bahnkörper liegt darin, dass diese im Allgemeinen auch von Anwohnenden positiver bewertet werden als Gleise mit Schotter oder Asphalteindeckung. Begrünte Bahnkörper werden somit meist als weniger störend im Straßenraum wahrgenommen. Weiterhin haben begrünte Bahnkörper eine positive Auswirkung auf die Ökologie (z. B. Verbesserung der Regenwasserrückhaltung, Verbesserung des Stadtklimas, Schadstoffbindung).

5.1.8.3 Anwendungserfahrungen

Bereits seit 1980 kommen begrünte Bahnkörper im Straßenbahnbereich zum Einsatz. In den letzten Jahren haben sie sich als eine Standardbauweise etabliert und kommen aufgrund ihrer Vorteile (Akustik, Mikroklima, Stadtgestaltung) vor allem im innerstädtischen Bereich immer häufiger zur Anwendung. Dabei wird heutzutage in der Regel die Ausführung mit hoch liegender Vegetationsebene umgesetzt. In Deutschland werden aufgrund der zuvor genannten positiven Effekte der begrünten Bahnkörper vorhandene Schotter- oder Asphaltgleise zunehmend umgebaut.

Schwellengleise auf Schottereindeckung eignen sich auch für eine Nachrüstung eines begrünten Bahnkörpers. Entsprechende Hinweise für eine fachgerechte Umsetzung finden sich in der VDV-Schrift 604 (VDV 2019) sowie im Handbuch Gleisbegründung (Grüngleis Netzwerk 2014).

Die unterschiedliche akustische Wirkung der verschiedenen Ausführungsformen des begrünten Bahnkörpers bestimmt nicht allein die Entscheidung für eine der Formen. Die Wahl der Ausführungsform wird durch Abwägung unterschiedlicher Anforderungen bestimmt, u. a. baulicher Aufwand, Gleispflege, Unterhaltungsaufwand, Standortbedingungen für die Vegetation, Integration in den Stadtraum.

5.1.9 Schräge Schienenverbindungen

5.1.9.1 Technik

Die bei Zugsicherungsbetrieb für die Überwachung von Gleisabschnitten erforderlichen Isolierstöße werden im Bereich des Schienenstegs nicht orthogonal zur Rollrichtung des Rades, sondern unter einem Winkel von 30 Grad geschnitten (Abbildung 52).

Abbildung 52: Beispiel für die Anwendung schräger Schienenstöße – Beispiel Straßenbahn Stuttgart



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.1.9.2 Akustische Wirkung

Durch den schrägen Schienenstoß wird der Verschleiß (Auskehlung) in diesem Bereich vermindert. Dadurch wird eine Stoßanregung infolge der Radüberfahrt gegenüber einer Ausführung mit einem orthogonalen Stoß abgemindert. Es erfolgt eine Art „gleitende“ Überfahrt. Durch die Verwendung schräger Schienenstöße sind im Extremfall lokal Minderungen der Maximalpegel von bis zu 8 dB möglich, für den Mittelungspegel ergeben sich deutlich geringere Minderungswirkungen.

5.1.9.3 Anwendung

Die Herstellung von Isolierstößen erfolgt im Werk (Lichtberger 2003, S. 118). Die Schienenstücke werden anschließend vor Ort montiert. Isolierstöße sind nur auf Abschnitten mit Zugsicherung zur Gleisfreimeldung erforderlich. Sie sind daher für straßenbündige Bahnkörper und besondere Bahnkörper in der Regel nicht erforderlich, sie können aber auch hier im Bereich von Weichen eingesetzt werden.

5.1.10 Herzstücke bei Weichen und Kreuzungspunkte

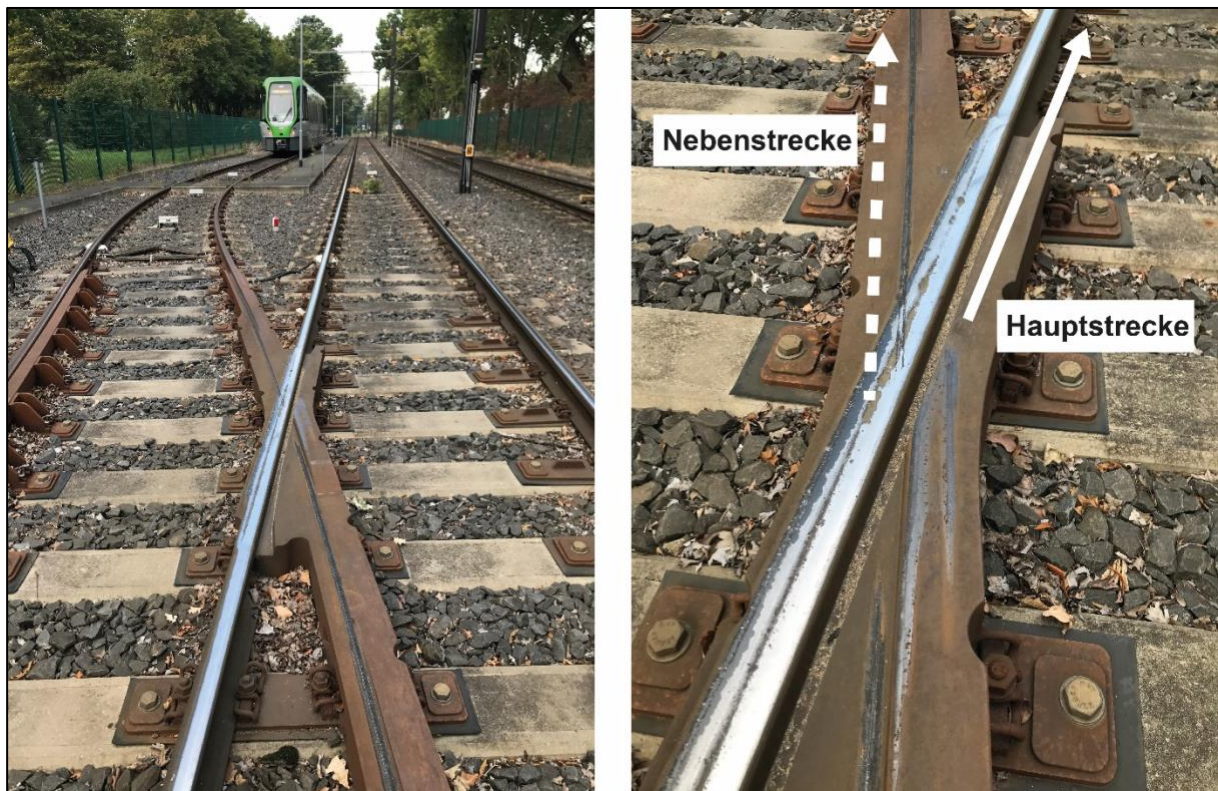
5.1.10.1 Technik

Die Herzstücke bei Weichen können mit beweglicher Spitze oder Flüsterherzstück ausgeführt werden. Bei Herzstücken mit beweglicher Spitze wird die Herzstückspitze entsprechend des Fahrwegs gestellt, sodass sich eine durchgängige Fahrfläche für die Räder ergibt. Es verbleibt ein kleinerer Spalt zwischen Herzstückspitze und Flügelschiene.

Weichen mit Überlauferherzstück („Flüsterherzstück“) (Abbildung 53) kommen ohne eine bewegliche Herzstückspitze aus. Für einen Fahrweg (in der Regel Hauptrichtung, durchgehender Pfeil) ergibt sich eine durchgängige Fahrfläche. Die Fahrschiene im Nebenstrang

(gestrichelter Pfeil) wird um 30 mm angehoben, sodass das Rad auf dem Spurkranz über den Weichenbereich (über das Gleis des Hauptfahrwegs) rollen kann.

Abbildung 53: Überlauferherzstück in einer Weiche – Beispiel Straßenbahn Hannover



Quelle: Üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG 2020

Die Ausführung als Flachrille einer Fahrtrichtung lässt sich auch bei Kreuzungen umsetzen (vgl. Abschnitt 2.5.2.4 und Abbildung 31)

5.1.10.2 Akustische Wirkung

Die akustische Wirkung von Überlauferherzstücken oder Herzstücken mit beweglicher Spitze wurde bisher nicht qualitativ ermittelt. Bei beiden Konstruktionen ist das Schlaggeräusch, das im Extremfall eine lokale Erhöhung des Maximalpegels von bis zu 10 dB zur Folge haben kann, aufgrund der konstruktiven Ausführung bei der Überfahrt aber deutlich verringert oder entfällt sogar ganz.

5.1.10.3 Anwendung

Bewegliche Herzstücke werden bislang überwiegend bei der Eisenbahn im Hochgeschwindigkeitsverkehr eingesetzt. Im Straßenbahnbereich wurden sie u. a. in Einzelfällen in Hamburg und Nellingen (bei Stuttgart) eingesetzt. In Tunneln kommen sie auch zur Minderung der Erschütterungsemissionen zum Einsatz.

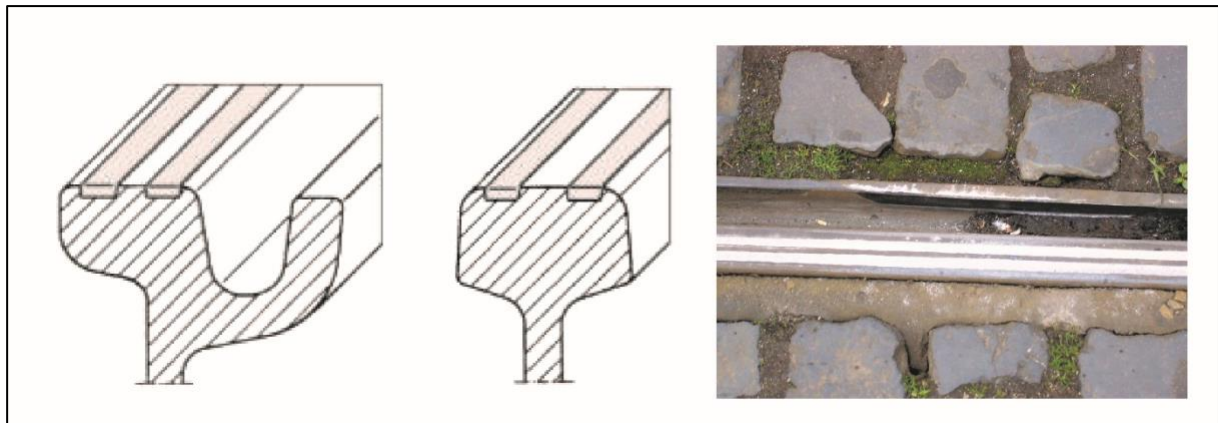
Flüsterherzstücke wurden im Straßenbahnbereich in Einzelfällen u. a. in Hannover und Stuttgart auf weniger frequentierten Streckenabschnitten verwendet. Der Nebenstrang wird hierbei nur gelegentlich mit geringer Geschwindigkeit befahren.

5.1.11 Auftragsschweißungen

5.1.11.1 Technik

Durch das Aufschweißen von hartem Material (z. B. Härtegrad 450 HBW¹⁸ und 1.600 N/mm²) in Nuten auf den Fahrflächen der Schienen (Abbildung 54) kann in engen Gleisbögen mit extremer Geräuschabstrahlung das Kurvenquietschen (und außerdem der Schienenverschleiß) gemindert werden. Das linke Bild zeigt das Auftragsschweißen für unterschiedliche Schienenprofile (Rillenschienen und rillenlose Schienen/ Vignolschienen), das rechte Bild eine praktische Anwendung in einem Rillenschienengleis.

Abbildung 54: Prinzipdarstellung und praktische Anwendung für Auftragsschweißungen (Antiquietschweißung) auf der Schienenfahrfläche



Die Aufschweißungen im rechten Bild sind durch die beiden hellen Streifen zu erkennen.

Quelle: VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2007, S. 455f.

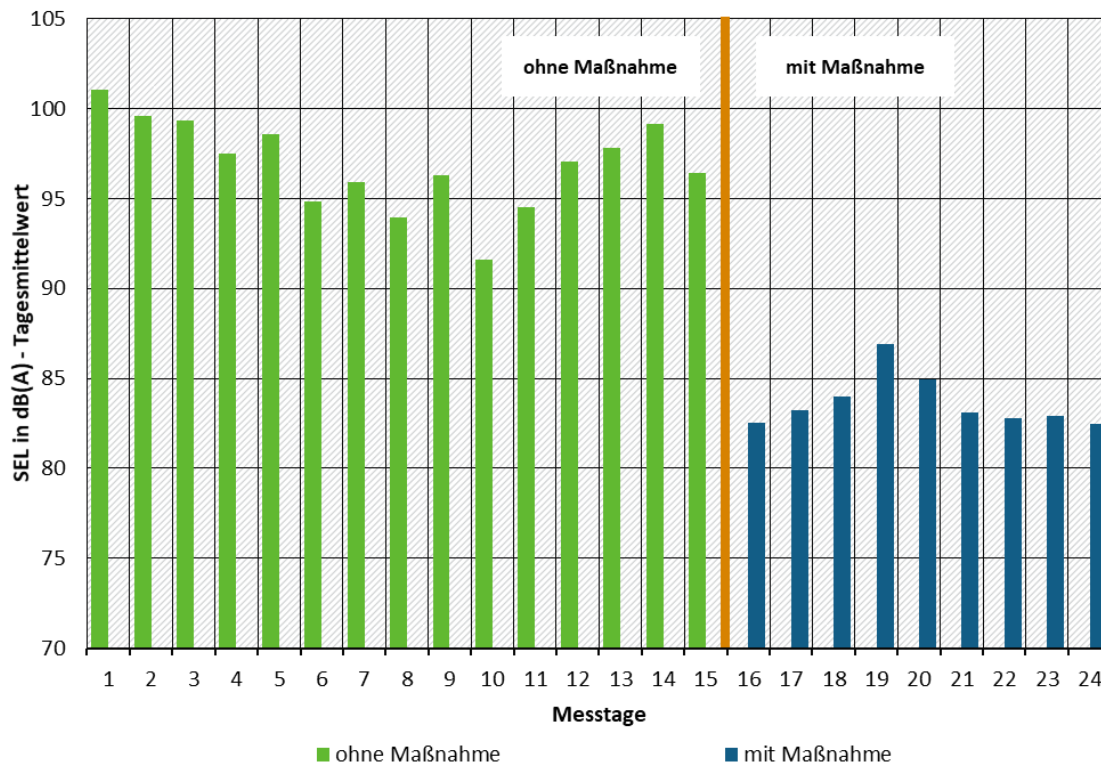
5.1.11.2 Akustische Wirkung

Durch Aufschweißungen wird der Reibbeiwert zwischen Rad und Schiene beeinflusst (verringert) und damit der Stick-Slip-Effekt (vgl. Abschnitt 2.5.2.3) reduziert. Dadurch mindern sich die Pegel und die Häufigkeit der Kurvengeräusche.

Die akustische Wirkung ist nicht generell zu quantifizieren. In einzelnen Fällen wurden Pegelminderungen von bis zu 15 dB nachgewiesen (Abbildung 55). In dem dargestellten Fall wurden zwei parallele Schweißraupen auf die Fahrfläche aufgebracht, wie sie in den in Beispielen in Abbildung 54 dargestellt sind.

¹⁸ HBW = Härtegrad nach Brinell. Wird mit einem speziellen Prüfverfahren ermittelt.

Abbildung 55: Schallexpositionspiegel (SEL) ohne/mit Auftragsschweißung (Tagesmittelwerte) bei Messungen an einem Gleisbogen



Quelle: Eigene Darstellung nach VDV 2011a, S. 23

5.1.11.3 Anwendungserfahrungen

Anti-Quietsch-Schweißungen werden von einigen Verkehrsunternehmen bereits seit vielen Jahren durchgeführt. Die Erfahrungen damit sind recht unterschiedlich. Um eine gute Wirkung zu erreichen, ist eine sehr sorgfältige Ausführung der Schweißarbeiten hinsichtlich Schweißzusatzwerkstoff, Schweißparameter und Schweißfolge erforderlich (VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 190).

5.1.12 Beeinflussung der Reibung zwischen den Fahrflächen von Rad und Schiene

5.1.12.1 Technik

Aus Erfahrung ist bekannt, dass in der Regel bei Regenwetter Quietschgeräusche nicht oder nur geringfügig auftreten. Durch die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen wird dieser „Lösungsansatz“ künstlich hervorgerufen.

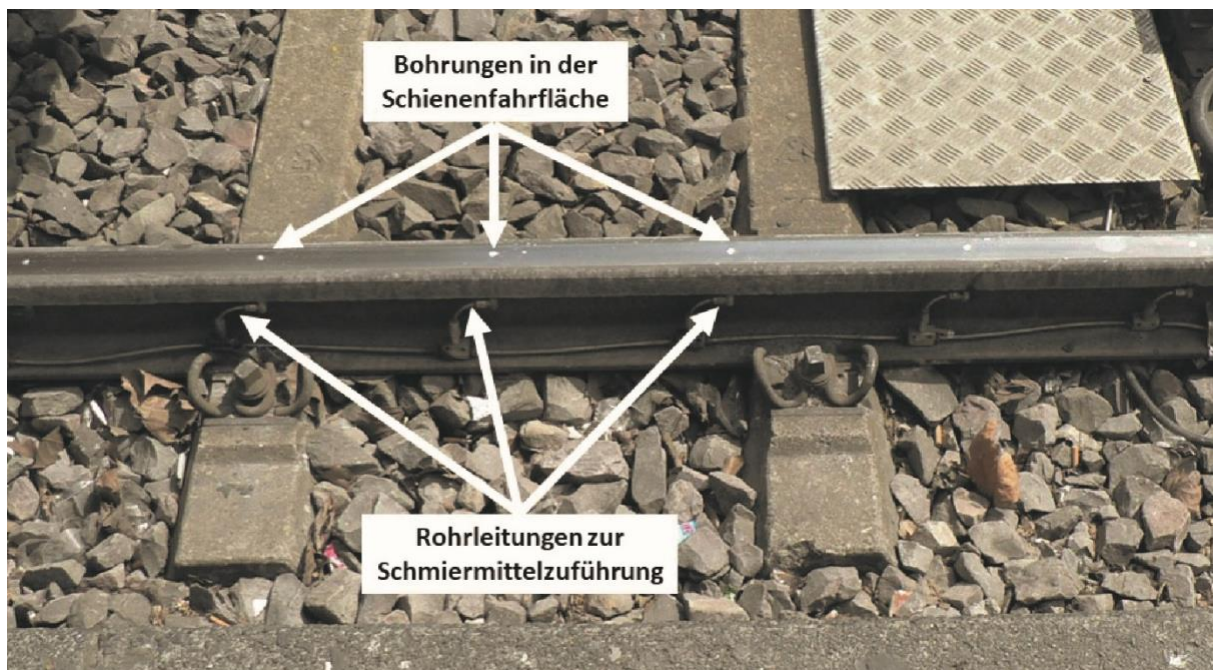
Um v. a. die durch Bogenfahrten entstehende Quietschgeräusche zu reduzieren, werden Maßnahmen zur Beeinflussung der Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene ergriffen. Hierbei wird ein Mittel auf die Schienenfahrfläche aufgebracht. Das Rad nimmt das Mittel auf, wälzt es auf der Schienenfahrfläche wieder ab und sorgt so für die Verteilung im Gleisbogen. Diese Verfahren sind auch unter den Bezeichnungen „Schienenkopfkonditionierung“, „Schienenkopfbenezung“ oder „Friction-Modifier“ bekannt.

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, um die die Reibung beeinflussende Mittel aufzubringen:

- Über stationäre Anlagen oder
- über mobile Sprühanlagen an den Fahrzeugen (Abschnitt 5.2.3).

Bei stationären Anlagen besteht prinzipiell die Möglichkeit das Mittel über Rohrleitungen mit Austrittsöffnungen an der Schienenkopfflanke, der Rillenkopfflanke oder der Schienenfahrfläche zu pressen. Ein praktisches Beispiel für das Auftragen auf die Schienenfahrfläche zeigt Abbildung 56. Ein an dieser Stelle vorbeifahrendes Fahrzeug löst die Pumpe beispielsweise durch einen Kontakt aus. Das Mittel gelangt so auf die Schienenfahrfläche, die Fahrflanke und die Rillenkopfflanke (Leitflanke) und wird von den Rädern aufgenommen und verteilt. Grundsätzlich ist bei der Anwendung solcher Lösungen zu beachten, dass sowohl die erforderliche Bremswirkung der Schienenfahrzeuge als auch der Straßenverkehr hierdurch nicht negativ beeinflusst werden darf. Für die Schienenfahrzeuge ist dies anhand einer entsprechenden Bremsprüfung im Bereich der Austrittsstelle nachzuweisen.

Abbildung 56: Einbausituation einer stationären Schienenfahrflächenkonditionierungsanlage



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

Die Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene können alternativ mit einer künstlichen Beregnung beeinflusst werden (Abbildung 57). Bei der Beregnung kann der Wasserverbrauch reduziert werden, wenn das System nur bei Annäherung und Vorbeifahrt einer Straßenbahn auslöst. In Karlsruhe werden bei Anwendungsfällen auf einem Betriebshof sowie an einer Wendeschleife an einer Endhaltestelle die Rillen der Schienen mit Wasser gefüllt (Abbildung 58). Der Effekt auf die Vermeidung von Kurvengeräuschen ist analog der Beregnung. Bei der Befüllung wird der Wasserzufluss über eine Zeitschaltuhr und ein Magnetventil gesteuert und die Rille nur teilweise gefüllt. Die Spurkränze der Räder einer durchfahrenden Straßenbahn nehmen das Wasser auf und verteilen es über weite Bereiche der nachfolgenden Schienenfahrflächen (vgl. Rupp 2013, S. 117). Die Anlagen müssen gut eingestellt werden. Der Wasserfilm darf nicht zu ausgeprägt sein, da der Bereich rund um die Schiene ansonsten dauerhaft nass bleibt und Streustromkorrosion befördert wird. Zudem werden die Anlagen in der Regel in der Winterperiode zwischen November und Februar wegen Frostgefahr abgeschaltet.

Abbildung 57: Schienenberegung zur Vermeidung von Kurvengeräuschen – Beispiel Straßenbahn Stuttgart



Quelle: VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 192

Abbildung 58: Bewässerung der Rillenschienen – Beispiel Karlsruhe



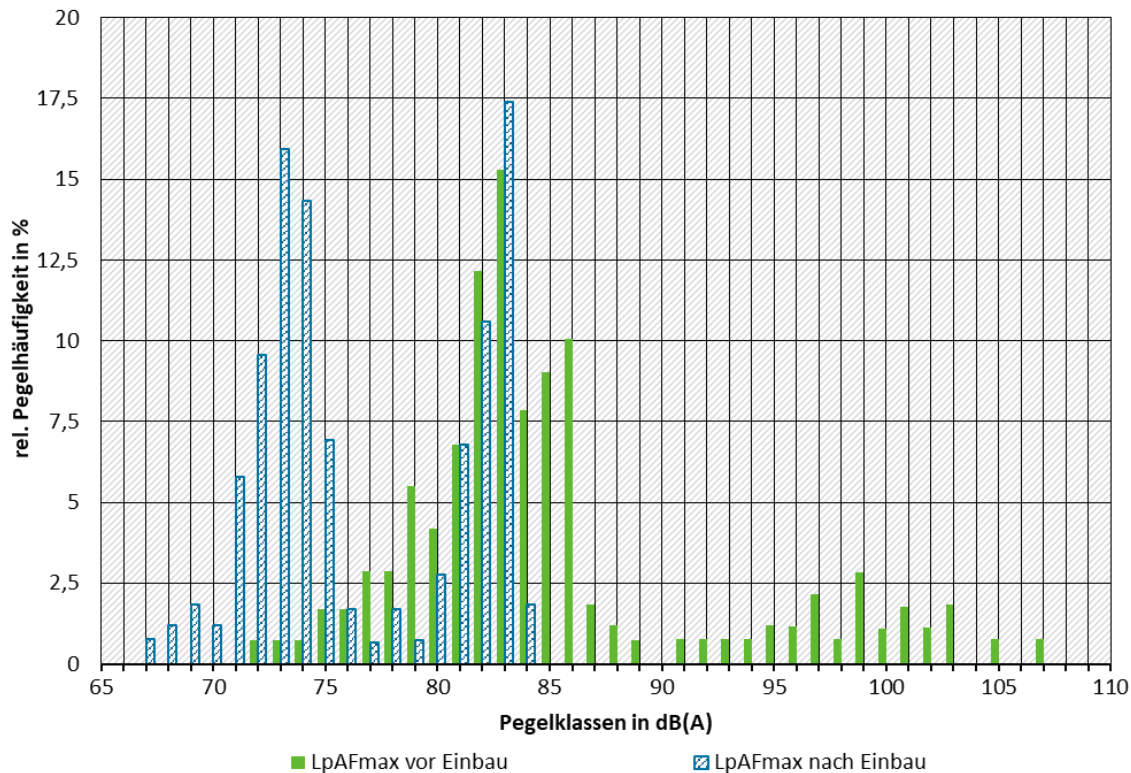
Quelle: Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH 2019

5.1.12.2 Akustische Wirkung

Durch die Schmierung bzw. Bewässerung werden die Pegelspitzen der Kurvengeräusche stark reduziert oder sogar ganz vermieden. So traten bei Untersuchungen der DB Netz AG an der Berliner Ringbahn Maximalpegel von nur noch 84 dB(A) auf. Vor Durchführung der Maßnahme lagen 20 Prozent der Maximalpegel bei den Vorbeifahrten oberhalb dieses Wertes und erreichten teilweise bis 108 dB(A) (vgl. DB Netz AG 2012, S. 32). In Abbildung 59 ist die relative Häufigkeit der gemessenen Maximalpegel L_{pAFmax} je Vorbeifahrt dargestellt. Für diese Auswertung der vor Ort gemessenen Schallereignisse wurden diese gefiltert (Bandpassfilter zwischen 2 kHz und 10 kHz). In die Auswertung wurden Zugfahrten mit einer Geschwindigkeit $v > 80$ km/h einbezogen.

Abbildung 59: Akustische Wirkung einer Schienenschmiereinrichtung

Pegel-Häufigkeitsverteilung vor und nach der Maßnahme im Vergleich.



Quelle: Müller BBM (vgl. DB Netz AG 2012, S. 32)

5.1.12.3 Anwendungserfahrungen

Generell ist festzuhalten, dass das Auftragen eines „Schmiermittels“ auf die Schienenfahrflächen die Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene und damit auch die Bremswirkung beeinflusst. Dies war bis vor einigen Jahren ein Grund, warum die Betriebsleitenden dem Einsatz solcher Systeme eher ablehnend gegenüberstanden. (vgl. Lenz 2016, S. 96) In den letzten Jahren wurden die Systeme optimiert und werden inzwischen von zahlreichen Verkehrsunternehmen erfolgreich zur Reduzierung von Kurvengeräuschen eingesetzt.

Stationäre Anlagen neigen bei falscher Einstellung u. U. leichter zur Überschmierung. Legt sich das „Schmiermittel“ auf der Fahrfläche bzw. der Lauffläche der Räder ab, kann dies bei Triebrädern zum Schleudern („Durchdrehen“) beim Anfahren bzw. zum Gleiten („Blockieren“) beim Bremsen führen. In der Folge kann es zu Flachstellen am Rad sowie Schleuderstellen (Ausfräsungen) in der Schiene kommen. Dadurch ergeben sich unerwünschte erhöhte Emissionen. Die Düsen auf den Fahrflächen können zudem durch Schmutzeintrag infolge der Überrollung verstopfen. In jedem Fall sind daher eine fachgerechte Installation und Abstimmung auf den speziellen Einzelfall erforderlich. Moderne und fachgerecht eingestellte Anlagen bringen nur äußerst geringe Schmiermittelmengen auf (Mindermengenschmierung). Zudem sind Bremsversuche durchzuführen, um zu überprüfen, dass die Schmiermittelmenge korrekt gewählt wurde und keinen Einfluss auf die Sicherheit des Fahrbetriebs hat. (vgl. Lenz 2016, S. 97).

Bei der Verwendung von Wasser besteht das Problem, dass der Wasserverbrauch u. U. hoch ist, zusätzliches Wasser in den Oberbau eingetragen wird und die Korrosion an Oberbau und Unterkonstruktion (bei Brücken) fördert. Zudem werden die stationären Anlagen im Winter aufgrund der Gefahr des Einfrierens abgeschaltet. Bei entsprechender Ausführung und

Steuerung haben sich aber auch diese Anlagen im Betrieb bewährt (z. B. in Bielefeld, vgl. Lenz 2016, S. 96).

5.1.13 Schallabsorbierende Elemente im Gleisbereich

5.1.13.1 Technik

Durch den Einsatz von porösen Materialien, die auf der Fahrbahn zwischen und seitlich der Schienen verlegt werden (z. B. schallabsorbierende Bodenplatten), kann die fehlende Absorption bei einer Festen Fahrbahn zum Teil ausgeglichen werden (vgl. VDV und VDV-Förderkreis e. V. (Hg.) 2007, S. 432).

Bei einem Schotteroberbau wirkt der Schotter schallabsorbierend. Hierbei dringen die Schallwellen in den Schotter ein und werden dort infolge Reibung in Wärme umgewandelt. Die Feste Fahrbahn verfügt über eine schallharte Oberfläche und reflektiert die einwirkenden Schallwellen. Damit erhöhen sich die durch den Rad-Schiene-Kontakt erzeugten Schalle. Spezielle Absorberplatten (Abbildung 60) die zwischen und neben den Schienen verlegt werden, übernehmen die absorbierende Wirkung des Schotters, verringern die Reflexionen und senken somit die Schallemissionen.

In Haltestellenbereichen (bei Hochbahnsteigen) kann eine zusätzliche Schallminderung erreicht werden, indem Absorberplatten auch im Bereich unter der Bahnsteigkante (Sicherheitsraum) montiert werden.

Abbildung 60: Absorberplatten im Gleis zur Minderung der Luftschallemissionen – Beispiel S-Bahn Berlin



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.1.13.2 Akustische Wirkung

Auf der freien Strecke sind hierdurch Pegelminderungen von 2 dB(A) bis 3 dB(A) zu erreichen. Die akustische Wirkung ist auf Oktavband-Mittenfrequenzen von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz beschränkt (Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV).

5.1.13.3 Anwendungserfahrung

Absorberplatten werden häufiger bei der Eisenbahn eingesetzt, um die Schallemissionen bei Fester Fahrbahn zu reduzieren. In den Schienennetzen der Straßenbahn stellen sie eher eine Ausnahme dar. Anwendungsfälle sind beispielsweise auf Viadukt-Strecken oder in Haltestellen bekannt, wenn dort eine Feste Fahrbahn installiert wurde.

5.1.14 Schallschutzwände

5.1.14.1 Technik

Schallschutzwände können aus Gabionen, Aluminium, Betonelementen, Glas oder aus Holz bestehen.

5.1.14.2 Akustische Wirkung

Schallschutzwände führen zu Pegelminderungen im abgeschirmten Bereich. Die Wirkung ist insofern vor allem von der Höhe der Schallschutzwand und dem Abstand zur Emissionsquelle abhängig. Beispielsweise lassen sich mit einer Schallschutzwand mit einer Höhe von ca. 1,5 m über Schienenoberkante (SO) sowie einem Abstand von 0,5 m zum Fahrzeug Pegelminderungen von bis zu 12 dB erreichen¹⁹ (Hecht und Krüger 2006, S. 271). Wesentlich höhere Minderungen lassen sich in der Regel nicht erreichen.

In einer Studie zur Kostenverhältnismäßigkeit von Schallschutzmaßnahmen (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) 2005) sind die theoretisch möglichen Pegelminderungen für eine Schallschutzwand für eine zweigleisige Eisenbahnstrecke angegeben. Abbildung 61 zeigt dieses Ergebnis für ein Gebäude in 25 Meter Abstand vom Gleis für das Erdgeschoss (EG) und das 1. Obergeschoss (1. OG).

Wesentlich für die akustische Wirkung einer Schallschutzwand ist das Maß für den längeren Weg, den ein Schallstrahl infolge der Wand zurücklegen muss. Dieser Weg wird Schirmwert z genannt, er wird wie folgt berechnet (Gl. 8) , vgl. Abbildung 62, vgl. Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau 2018; Müller und Möser 1994):

$$z = a_Q + a_A - s \quad (\text{Gl. 8})$$

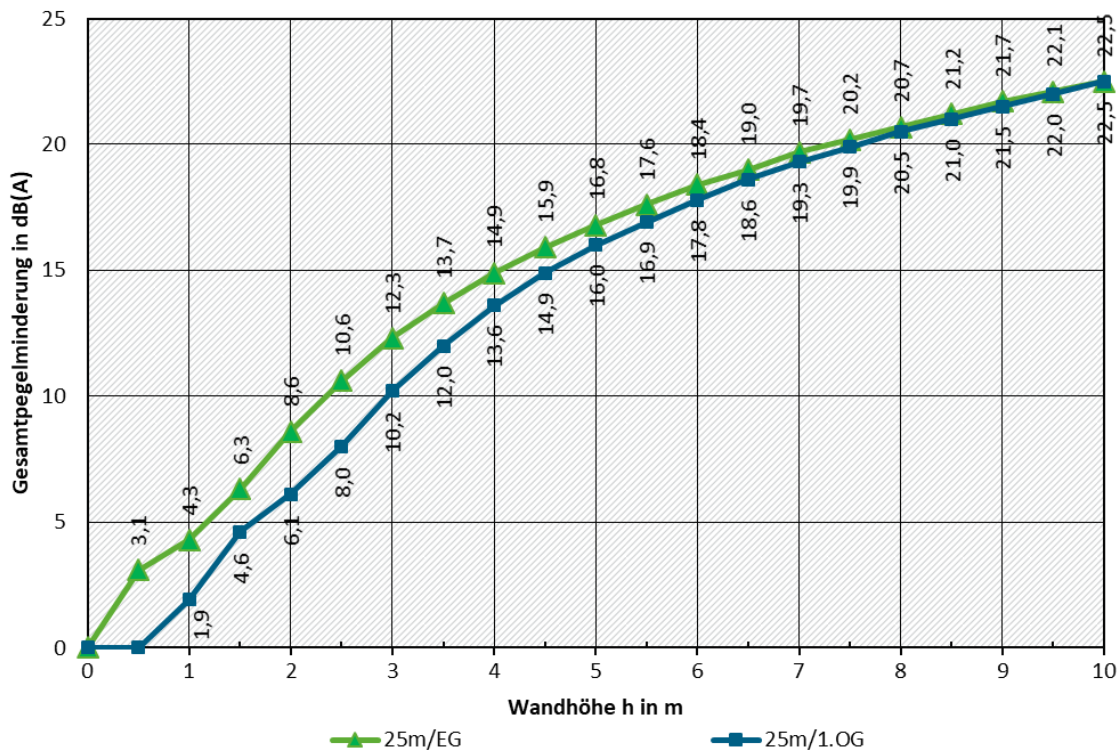
Mit (Gl. 8)

$$\Delta L = 10 * \lg(3 + 60 * z) \quad (\text{Gl. 9})$$

kann dann die abschirmende Wirkung als Pegelwert ermittelt werden.

¹⁹ Gemessen in 25 m Abstand vom Gleis und einer Höhe von 1,2 m über Schienenoberkante.

Abbildung 61: Pegelminderungen für ein Gebäude in 25 Meter Abstand durch eine Schallschutzwand



Quelle: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) 2005, S. 21

Beispiel (Abbildung 62):

- ▶ Abstand Schallschutzwand zur Gleismitte $a_{Q0} = 1,8 \text{ m}$
- ▶ Abstand Hauswand zur Schallschutzwand $a_{A0} = 6 \text{ m}$
- ▶ Höhe der Schallschutzwand über Schienenoberkante (SO) $h_{SSW} = 1,5 \text{ m}$
- ▶ Höhe des Immissionsortes über Schienenoberkante (Quelle) $h_{I0} = 2,8 \text{ m}$.

Mit diesen Werten und einer Wanddicke von 0,2 m ergeben sich zur Berechnung des Schirmwertes z folgende geometrische Längen:

$$s = 8,48 \text{ m}$$

$$a_Q = 2,34 \text{ m}$$

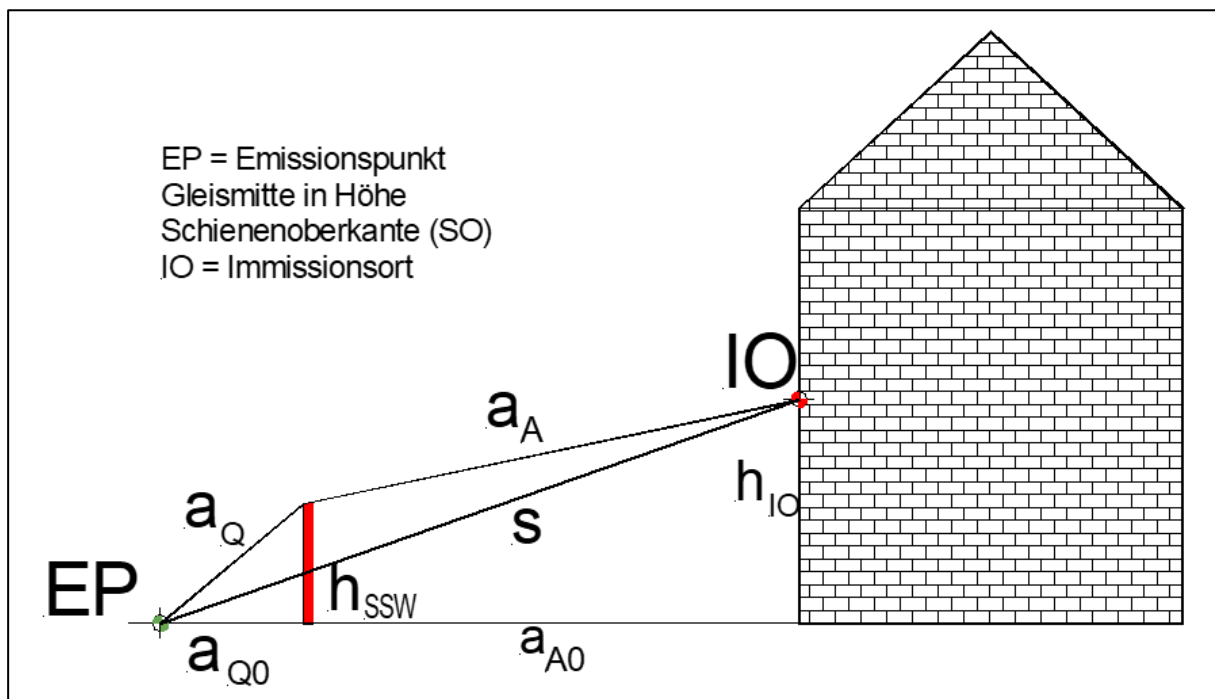
$$a_A = 6,33 \text{ m}$$

und hiermit ein Schirmwert von $z = 0,19 \text{ m}$.

Mit (Gl. 9) folgt dann eine mindernde Wirkung von $\Delta L = 11,6 \text{ dB}$.

Nach (Gl. 9) ergibt sich bereits bei $z = 0$ ein $\Delta L = 4,8 \text{ dB}$. Zurückzuführen ist dies auf die absorbierende Schallminderung durch die Schallschutzwand. Bei schallharten Wänden, z. B. bei Glaswänden, ist eine geringere Wirkung vorhanden, jedoch ist auch hierbei eine Mehrfachreflexion zwischen Wand und Fahrzeug vorhanden. Hierdurch wird die Schallenergie teilweise in Wärme umgewandelt.

Abbildung 62: Wirkung einer Schallschutzwand – Ermittlung des Schirmwertes z



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau 2018)

Die Dimensionierung von Schallschutzwänden erfolgt im Allgemeinen auf Grundlage einer Schallimmissions-Berechnung. Die Wirkung von Schallschutzwänden ist insofern auch begrenzt, weil sich die rechnerisch erforderliche Höhe und Länge aufgrund der lokalen Randbedingungen (z. B. städtebauliche Integration) nicht immer umsetzen lässt.

5.1.14.3 Anwendungserfahrungen

Aufgrund fehlender Räume für die Aufstellung und der – je nach Ausführung – schwierigen städtebaulichen Integration, kommen Schallschutzwände an Straßenbahngleisen in urbanen Räumen bisher selten zur Anwendung.

Im Folgenden werden einige Beispiele für die unterschiedlichen Ausführungsformen von Schallschutzwänden vorgestellt.

► Aluminium-Schallschutzwände

Ein Beispiel für eine Aluminium-Schallschutzwand mit einer hoch absorbierenden Innenseite zeigt Abbildung 63 an einer S-Bahnstrecke in Köln.

Abbildung 63: Beispiel für eine Schallschutzwand aus Aluminium



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

► **Beton-Glas-Schallschutzwände**

Eine Kombination aus Beton und Glas zeigt Abbildung 64. Diese Wand wurde in einem Haltestellenbereich installiert. Ein besonderes Merkmal ist hier die nach hinten versetzte, erhöhte Reihe mit Wandelementen im Bereich des Durchgangs (Ausgang vom Bahnsteig). Insbesondere Schallschutzwände aus Glas sind gegen Vandalismus zu schützen.

Abbildung 64: Beispiel für eine Schallschutzwand aus Glas auf Betonsockel



Der weiße Pfeil zeigt den Durchgang zwischen versetzt angeordneten Schallschutzwänden (die hinteren Schallschutzwände am Ausgang sind erhöht ausgeführt).

Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

► Holz-Glas-Schallschutzwände

Ein Beispiel für eine Kombination aus Holz und Glas zeigt Abbildung 65. Bei der Strecke handelt es sich um einen begrünten Bahnkörper mit hochliegender Vegetationsebene in einem Gleisbogen. Um mögliche Quietschgeräusche in diesem Gleisbogen zu unterbinden werden hier die Rillen der Schienen bewässert.

Abbildung 65: Einsatz einer hohen Holz-Glas-Schallschutzwand – Beispiel Karlsruhe



Quelle: VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 195

Bei Straßenbahnen mit einem straßenbündigen Bahnkörper sind Schallschutzwände grundsätzlich nicht einsetzbar.

► Gabionen-Schallschutzwände

Seit einiger Zeit werden Gabionen für Schallschutzwände verwendet (Abbildung 66). Bei Gabionen handelt es sich um Drahtkörbe, welche mit einem Betonkern und auf den Sichtseiten mit bruchrauen, frostsicheren und ausreichend druckfesten Steinen befüllt werden. Eine Gabionenwand besteht aus einem mittig angeordneten Betonkern und einer Absorbermatte ggf. auch in Kombination mit einer speziellen Lavaschüttung und der beidseitigen Steinfüllung. Neben gestalterischen Vorteilen (Integration in das Stadtbild), stellen sie einen von den Naturschutzbehörden anerkannten Lebensraum für geschützte Arten dar, sodass sie naturschutzfachlich als Kompensationsmaßnahme angerechnet werden können. Dies trägt zu einer Verbesserung der Akzeptanz der Bürger bei. Zudem sind Gabionen weniger anfällig für Graffiti und Vandalismus. Untersuchungen der DB Netz AG

haben gezeigt, dass Gabionen von der lärmreduzierenden Wirkung her vergleichbar mit herkömmlichen Schallschutzwänden sind (DB Netz AG 2012, S. 85). Der Betonkern der Gabionen dient aus statischer Sicht nicht der Standsicherheit der Wand, sondern lediglich zur Minderung des Schalldurchgangs.

Abbildung 66: Gabionenwand an einer Straßenbahnstrecke im Bereich einer Haltestelle



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.1.15 Niedrige Schallschutzwände

5.1.15.1 Technik

Bei niedrigen Schallschutzwänden (nSSW) handelt es sich um eine aktive Schallschutzmaßnahme, sie haben in Nahverkehrsnetzen eine Höhe von max. ca. 80 cm über Schienenoberkante. Der mögliche Abstand der nSSW von der Gleisachse hängt von den örtlichen Randbedingungen ab. Er sollte möglichst nah zum Emissionsort gewählt werden, um die akustische Wirkung zu verbessern.

Auch nSSW können aus unterschiedlichen Materialien bestehen, z. B. Gabionen, Stahlkassetten oder Betonfertigteilen.

5.1.15.2 Akustische Wirkung

Grundsätzlich gelten für die akustische Wirkung einer niedrigen Schallschutzwand dieselben Kriterien wie für hohe Schallschutzwände.

Entscheidende Faktoren für die Wirksamkeit einer nSSW sind auch hier der Abstand zum Gleis, die Höhe der Schallschutzwand sowie deren Absorptionsfähigkeiten. Um vor allem eine Pegelminderung für die oberen Geschosse einer schienennahen Bebauung zu erreichen, müssen die Schallschutzelemente sehr nah am jeweiligen Gleis stehen (Abbildung 67). Zudem sind sie auch zwischen den Richtungsgleisen anzuordnen (Abbildung 57).

Die schallmindernde Wirkung dieser Maßnahme liegt bei weniger als 5 dB (VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 194). Bei Nachweismessungen im Rahmen von Erprobungsversuchen

im Netz der Deutschen Bahn AG wurden bei nSSW mit einer Höhe von 55 cm beim wandnahen Gleis eine Schallminderung von 3 dB(A) und beim wandfernen Gleis eine Minderung von 2 dB erzielt. Bei 74 cm hohen Wänden wurde eine Reduzierung von 6 dB bzw. beim wandfernen Gleis von 5 dB erzielt (DB Netz AG 2012, 16ff.). Allerdings sind die Ergebnisse aufgrund anderer Randbedingungen (z. B. Freihaltung von Lichtraumprofilen) nicht einfach übertragbar.

Abbildung 67: Einsatz einer niedrigen Schallschutzwand neben einem Straßenbahngleis – Beispiel Straßenbahn Stuttgart



Quelle: VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 194

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer zweigleisigen Strecke in der Summe der Geräuscheinwirkungen aus beiden Gleisen eine geringere Wirksamkeit erzielbar ist als an einer eingleisigen Strecke. Bei Neubaumaßnahmen kann durch die Anordnung der nSSW zwischen den einzelnen Gleisen die Minderungswirkung beim wandnahen Gleis genutzt werden. Hierfür muss ggf. in der Planung auf ausreichenden Gleisabstand respektive das freizuhaltende Lichtraumprofil geachtet werden.

Theoretisch kann aber bei einer zweigleisigen Strecke durch eine beidseitige Anordnung der nSSW beidseitig die gleiche Wirksamkeit erzielt werden. Bei einer zusätzlichen nSSW-Mittelwand erhöht sich die Wirkung um 2 dB(A).

5.1.15.3 Anwendungserfahrungen

Ein großer Vorteil von nSSW liegt darin, dass sie dort zum Einsatz kommen können, wo aus städtebaulichen und Denkmalschutzgründen oder wegen des Landschaftsbildes keine hohen Schallschutzwände errichtet werden dürfen.

Im Nahverkehr werden sie bislang allerdings eher selten und nur in Einzelfällen eingesetzt. Dies liegt zum einen an der Trennwirkung, die durch solche Elemente trotz der niedrigen Bauhöhe ausgeht. Zum anderen kann aufgrund der Randbedingungen nicht immer das Potenzial der

Minderungswirkung ausgeschöpft werden, z. B. einer Immissionspegelminderung für die oberen Geschosse eines nah am Gleis stehenden Hauses.

Bei Straßenbahnen mit einem straßenbündigen Bahnkörper sind auch niedrige Schallschutzwände grundsätzlich nicht einsetzbar.

5.1.16 Niedrige Schallschutzwände in Kombination mit Maßnahmen am Drehgestell

Werden Maßnahmen am Rad, z. B. Radschallabsorber, und Maßnahmen vor dem Rad, z. B. tief heruntergezogene Radabschirmung, mit niedrigen Schallschutzwänden kombiniert, dann erhöht sich die gesamte schallmindernde Wirkung. Die Räder des in Abbildung 67 dargestellten Fahrzeuges sind z. B. mit Radschallabsorbern ausgerüstet. Messergebnisse zur Gesamtwirkung liegen derzeit nicht vor. In einer Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde eine Schallpegelreduktion von 3 dB(A) bis 6 dB(A) für niedrige Schallschutzwände (Mitusch et al. 2017, S. 112) und für Radschallabsorber zur Minderung der Rollgeräusche von ca. 2,5 dB(A) abgeschätzt (Mitusch et al. 2017, S. 74).

5.1.17 Sonstige Maßnahmen

In verschiedenen Projekten wurden u. a. die akustischen Wirkungen von folgenden Maßnahmen untersucht (DB Netz AG 2012; Krüger und Witte 2005):

- ▶ Verschäumter Schotter in Kombination mit einer Unterschottermatte,
- ▶ Schallabsorbierender Schwellenwerkstoff,
- ▶ besohlte Schwellen und
- ▶ beschichtete Schienen.

Die akustische Wirkung dieser Minderungsmaßnahmen ist sehr gering (maximal 1 dB).

5.2 Maßnahmen an den Fahrzeugen

5.2.1 Übersicht über die Maßnahmen

Schallminderungsmaßnahmen an Straßenbahnfahrzeugen und deren Wirkung auf die Schallemissionen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die unter Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Grundsätze hinsichtlich der dB-Bewertung gelten sinngemäß auch für die hier dargestellten Maßnahmen.

Tabelle 11: Zusammenstellung möglicher Schallminderungsmaßnahmen am Fahrzeug sowie deren akustischer Wirkung auf den A-bewerteten Emissionspegel

Maßnahme	Effekt auf Rollgeräusche ²⁰	Effekt auf Stoßgeräusche ²⁰	Effekt auf Kurvengeräusche ²⁰	Effekt auf Fahr- und Aggregatgeräusche ²⁰	Nachrüstbarkeit	Kontroll- und Instandhaltungsaufwand	Anwendung beim Niederflurfahrzeug	Anwendung beim Hochflurfahrzeug
Spurkranzschmierung	keiner	keiner	gering bis mittel	keiner	ja	ja	ja	ja
Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	keiner	keiner	hoch bis sehr hoch	keiner	ja	ja	ja	ja
Radial einstellbare Radsätze	keiner	keiner	hoch	keiner	ja	ja	ja	ja
Radschallabsorber	gering	keiner	hoch bis sehr hoch	keiner	ja	ja	ja	ja
Gummigefederte Räder	gering	keine	gering	keiner	ja	entfällt	ja	ja
Radscheibenbedämpfung	gering	keiner	mittel	keiner	ja	entfällt	ja	ja
Radschürzen	gering	gering	gering	keiner	nein	nein	ja	ja
Bedämpfung des Wagenbodens, Unterflur	gering	gering	gering	keiner	nein	nein	ja	ja
Schleifen und Abdrehen der Radfahrflächen	gering bis mittel	gering bis mittel	gering	keiner	entfällt	ja, entweder regelmäßig	ja	ja

²⁰ Akustische Wirkung der Maßnahmen (näherungsweise): gering: unter 3 dB(A); mittel: 3 dB(A) bis unter 6 dB(A); mittel bis hoch 6 dB(A) bis unter 9 dB(A); hoch 9 dB(A) bis unter 12 dB(A); hoch bis sehr hoch 12 dB(A) bis unter 15 dB(A); sehr hoch mehr als 15 dB(A).

Maßnahme	Effekt auf Rollgeräusche ²⁰	Effekt auf Stoßgeräusche ²⁰	Effekt auf Kurvengeräusche ²⁰	Effekt auf Fahr- und Aggregatgeräusche ²⁰	Nachrüstbarkeit	Kontroll- und Instandhaltungsaufwand	Anwendung beim Niederflurfahrzeug	Anwendung beim Hochflurfahrzeug
						oder bei Bedarf		
Moderne Antriebsstromrichter	gering	keiner	gering	keiner (angenehmerer Höreindruck)	entfällt	entfällt	ja	ja
Getriebeoptimierung	gering bis mittel	keiner	keiner	hoch	entfällt	entfällt	ja	ja
Schalloptimierte Heizungs-, Klima- und Lüftungsgeräte	gering	keiner	keiner	nicht zu quantifizieren	teilweise	ja	ja	ja

Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.2.2 Spurkranzschmierung

5.2.2.1 Technik

Das Anlaufen des Spurkranzes an die Schienenkopfflanke in einem Gleisbogen führt zur Reibung in diesem Kontaktpunkt und damit zu Verschleiß und zur Anregung von breitbandigen Zischgeräuschen (vgl. Abschnitt 2.5.2.3). Über Düsen wird der Spurkranz mit feinen Tröpfchen eines Öl-Luft-Gemisches benetzt. Durch den Kontakt zwischen Rad und Schiene im Gleisbogen überträgt sich der Schmierstoff auf die nachfolgenden Räder. Verschleiß und Quietschgeräusche können so insbesondere bei Kurvenfahrten reduziert werden.

5.2.2.2 Akustische Wirkung

Zischgeräusche können Pegelanhebungen von etwa 5 dB(A) bewirken. Eine wirksame Spurkranzschmierung kann diese Pegelanhebung in Gleisbögen vermeiden bzw. deutlich mindern.

5.2.2.3 Anwendungserfahrungen

In der Regel sind Straßenbahnfahrzeuge heutzutage mit einer Spurkranzschmiereinrichtung ausgerüstet. Wichtig für die Wirkung ist eine regelmäßige Wartung dieser Einrichtung.

5.2.3 Benetzung der Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus

5.2.3.1 Technik

Neben der Möglichkeit, den „Schmierstoff“ direkt an der zu behandelnden Stelle auf oder an der Schiene auszubringen (Abschnitt 5.1.13), ist das Ausbringen des Mittels durch das Fahrzeug möglich. Das „Schmiermittel“ wird während der Fahrt mittels Luftdrucks aus Düsen vor dem Rad ausgebracht (Abbildung 68).

Abbildung 68: Schmierung der Schienenfahrflächen vom Fahrzeug aus



Quelle: VDV und VDV-Förderkreis e. V. (Hg.) 2007, S. 457

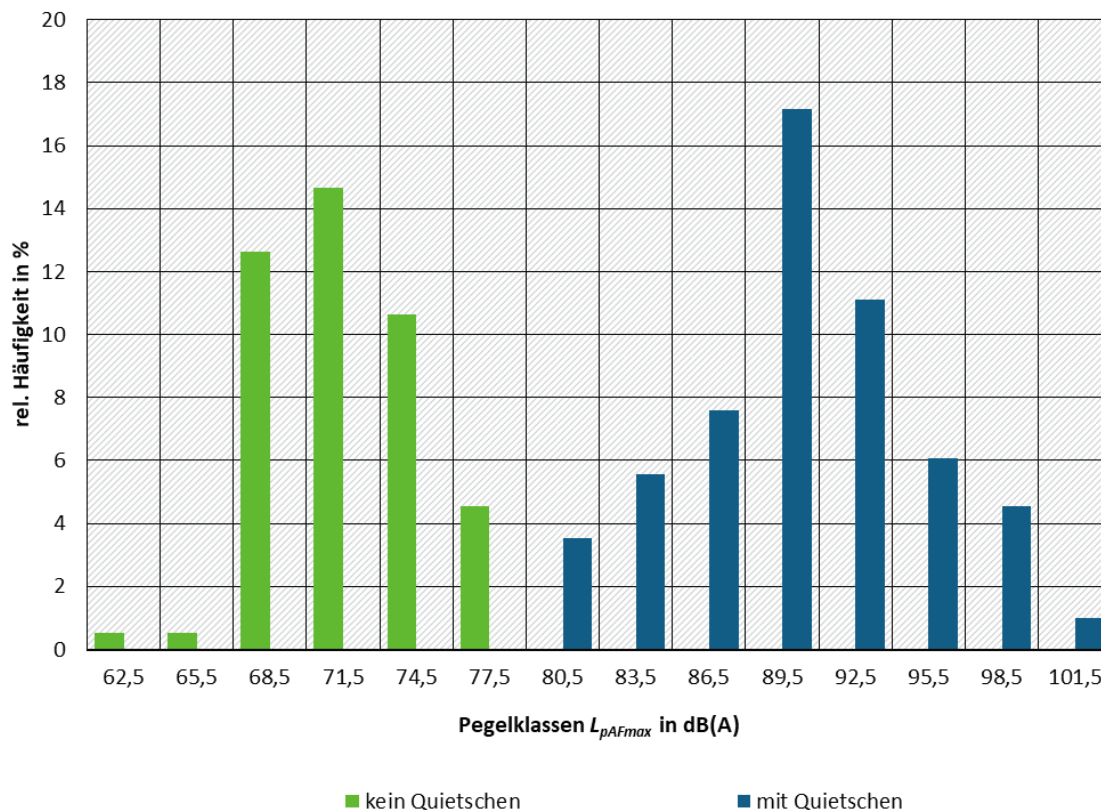
Dies erfolgt zeit- und/oder weggesteuert sowie bestenfalls zusätzlich über Sensoren. Aus unterschiedlichen Signalen, z. B. Geschwindigkeit und GPS sowie weiteren Streckendaten wird der Sprühort erkannt. Sprühmenge, Sprühdauer und Ausrichtung der Düse können dabei für die jeweilige Kurve vorher festgelegt werden. (Kofmehl 2011). Durch eine automatisch gesteuerte Auswahl von Fahrzeugen, die sich in der gleichen Gegend befinden, wird ein Überschmieren verhindert. Bei nasser Witterung kann auf das Ausbringen des Schmierstoffs verzichtet werden. Es ist in der Regel ausreichend, ein Drittel der Fahrzeugflotte mit mobilen Schmieranlagen auszustatten, um das gesamte Schienennetz abzudecken (Kofmehl 2013, S. 185).

Neben der Verwendung von Fließfetten können die Schienenfahrflächen mit Wasser benetzt werden. Der Einsatz mit Wasser kann gezielt über das Fahrzeug analog der Ausbringung eines Schmiermittels erfolgen, z. B. durch Speisung der Düsen mit Wasser aus der Scheibenwaschanlage (Kofmehl 2011).

5.2.3.2 Akustische Wirkung

Das Benetzen der Schienen durch das Fahrzeug kann das Auftreten von Quietschgeräuschen völlig vermeiden. Abbildung 69 zeigt das Ergebnis einer Schallmessung an einem Gleisbogen. Die blauen Säulen markieren Vorbeifahrten mit mehr oder weniger starken Quietschgeräuschen. Nach Überfahrt mit einem Schienenreinigungsfahrzeug (Schienen wurden befeuchtet) wurden die durch die grünen Säulen dargestellten Pegel gemessen. Quietschgeräusche wurden danach nicht mehr wahrgenommen.

Abbildung 69: Wirkung einer fahrzeugseitigen Benetzung der Schienenfahrflächen



Quelle: Eigene Darstellung (vgl. Krüger et al. 1994, S. 8–39)

5.2.3.3 Anwendungserfahrungen

Zur Anwendungserfahrung siehe auch Abschnitt 5.1.13. Die Ansteuerung der Düsen am Fahrzeug lässt sich heutzutage durch computergestützte Kontrolle zahlreicher Betriebssignale

leicht und sehr gezielt durchführen. Für eine optimale Einstellung des Systems sind Aufzeichnungen von Streckenkenndaten durch Streckenbefahrungen hilfreich, die dann für die computergestützte Anwendung hinterlegt werden (Kofmehl 2011).

Seit einigen Jahren gibt es für die Benetzung mit Wasser fahrzeugseitige Verfahren, die sich im Betrieb bewährt haben und auch bei Frostperioden zum Einsatz kommen können (z. B. Bochum) (Prima Ideenwettbewerb 2013).

Van Leuven beschreibt unter anderem eine weitere Lösung für eine vom Fahrzeug aus betriebene Benetzung der Schienenfahrflächen. Hierbei wird die vorhandene Spurkranzschmiereinrichtung verwendet. Hervorzuheben ist, dass nur jede achte Überfahrt dieses Mittel auftragen muss, um eine deutliche Minderung der Kurvengeräusche sicher zu stellen (van Leuven 2009). Folgende Vorteile werden genannt:

- ▶ Minimale Kurvengeräusche,
- ▶ Verschleißminderung von Schiene und Rad,
- ▶ keine Beeinflussung der Bremswirkung,
- ▶ keine Umweltverschmutzung,
- ▶ geringe Lebenszykluskosten (life cycle cost).

5.2.4 Radial einstellbare Radsätze

5.2.4.1 Technik

Bei der Bogenfahrt eines Straßenbahnfahrzeugs entstehen durch den Bogenlauf Gleitbewegungen zwischen Rad und Schiene, die im Ergebnis zu Schwingungen des Rades und der Schiene führen können (vgl. Abschnitt 2.5.2.3). Um die sich daraus ergebenden Geräusche zu reduzieren bzw. zu vermeiden, können beispielsweise radial einstellbare Radsätze eingebaut werden. Damit können die Räder dem Gleisbogen besser folgen und ein Anlaufen der Räder an die Bogenaußenseite kann verringert werden. Dabei wird unterschieden nach (Janicki et al. 2013, S. 93; Bugarcic et al. 1986)

- ▶ selbststeuernden Radsätzen durch eine in Fahrzeuginnenrichtung weich ausgeführte Radsatzlenkung,
- ▶ Radsatzkopplung, bei der verschiedene Verbindungen zwischen den beiden Radsätzen eines Drehgestelles hergestellt werden sowie
- ▶ einer Wagenkastenkopplung durch Verbindung des Wagenkastens mit der Radsatzkopplung.

Bei gutem und weitgehend verschleißfreiem Rad-Schiene-Kontakt wirken die erforderlichen Stellkräfte bei der selbstgesteuerten Radsatzlenkung gut. Bei den passiven Radsatzsteuerungen werden allerdings häufig kostenintensive Steuer- und Stellglieder erforderlich (Janicki et al. 2013, S. 93).

Eine Lösung für ein zwangsgesteuertes Fahrwerkskonzept stellen kastenseitig gesteuerte Achsen dar, welche die radiale Einstellung der Radsätze durch eine Relativbewegung zwischen Drehgestell und Fahrzeugkasten mit Hilfe einer Mechanik erzwingen (vgl. Wei 2014, S. 11f.).

Neben Lösungen am Drehgestell können Einzelfahrwerke verwendet werden. Diese werden im Niederflursegment der Straßenbahnen bereits seit Mitte der 1990er Jahre eingesetzt. Allerdings

nur an den nicht angetriebenen Rädern (z. B. in Kassel, Rostock, Erfurt, Heidelberg, Bochum), da sich diese Technologie bei angetriebenen Rädern bei Prototypen nicht ausreichend bewährt hatte (Wei 2014, S. 22). Darüber hinaus gibt es weitere Entwicklungen und Erprobungsversuche mit ähnlich gelagerten technologischen Umsetzungen.

5.2.4.2 Akustische Wirkung

Durch den Einsatz radial einstellbarer Radsätze kann das Kurvenquietschen deutlich reduziert werden. Positiver Nebeneffekt ist die Verringerung des Verschleißes an Rad und Schiene.

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse, die an einem Fahrzeug mit und ohne radiale Radsatzeinstellung in einem Gleisbogen bei der Rheinbahn in Düsseldorf ermittelt worden sind.

Tabelle 12: Kurvengeräusche bei starr geführttem und gelenktem Radsatz im Vergleich

Schallpegelwert und Abweichung	L_{pAFmax} , Radsatz starr geführt ($v = 15$ km/h)	L_{pAFmax} , Radsatz gelenkt ($v = 15$ km/h)	L_{pAFmax} , Radsatz starr geführt ($v = 25$ km/h)	L_{pAFmax} , Radsatz gelenkt ($v = 25$ km/h)
Höchster Messwert	100 dB(A)	90 dB(A)	95 dB(A)	91 dB(A)
Niedrigster Messwert	76 dB(A)	72 dB(A)	88 dB(A)	77 dB(A)
Arithmetischer Mittelwert	92 dB(A)	86 dB(A)	93 dB(A)	80 dB(A)
Standardabweichung σ_{n-1}	7,4 dB(A)	5,2 dB(A)	2,2 dB(A)	4,6 dB(A)

Gemessen in 7,5 m Abstand zur Gleismitte an einem stationären Messplatz. Gleisbogenradius $r = 25$ m. Statistischer Überblick über die maximalen AF-bewerteten Schalldruckpegel L_{pAFmax} in dB(A) der einzelnen Vorbeifahrten.

Quelle: Gerndt 1983, S. 59

5.2.4.3 Anwendungserfahrungen

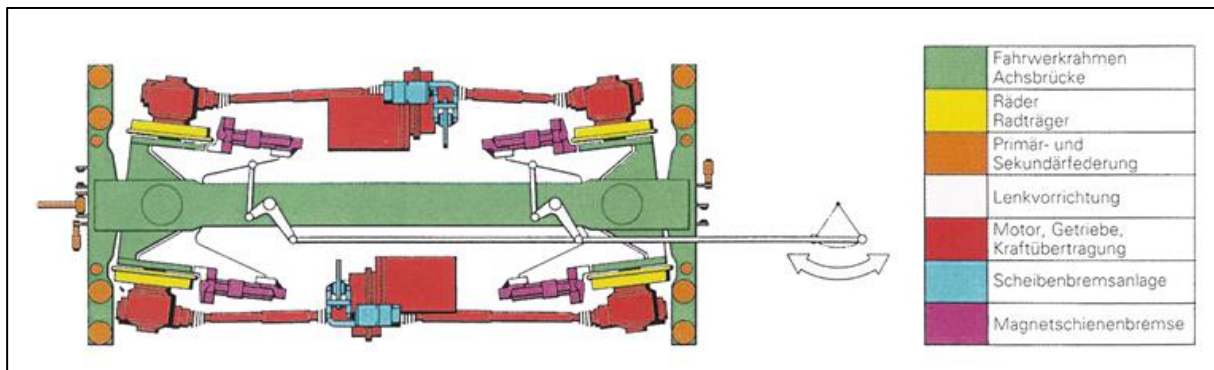
Radial einstellbare Radsätze finden bei Niederflur-Straßenbahnen bereits seit vielen Jahren Verwendung. Aufgrund des im Gegensatz zu konventionellen Radsätzen höheren Aufwands bei der Konstruktion und Wartung der radial einstellbaren Radsätze, haben sich diese Laufwerke bisher allerdings nur wenig verbreitet (Janicki et al. 2013, S. 93).

In Zürich wurden die Straßenbahnen vom Typ „Cobra“ statt eines Drehgestells mit drehbar ausgestalteten Achsbrücken und Längsradsätzen ausgerüstet. Dadurch können sich die Räder in den Kurven radial einstellen. Beide Achsen können sich unabhängig voneinander um einen Drehkranz drehen. Die Ansteuerung der Achsbrücken erfolgt über eine Lenkvorrichtung, die bei dem die Lenkbewegungen zwischen den Gelenkportalen über ein längs angeordnetes Gestänge übertragen werden (vgl. Arx 2001, S. 32 und Abbildung 70). Bei den neuen Bahnen mit radialer Radeinstellung wurden die Kurvengeräusche deutlich reduziert, wobei die Züricher Straßenbahnen zusätzlich mit einer Schienenkopf- und Spurradsatzkonditionierung ausgerüstet wurden (vgl. Abschnitte 5.2.2 und 5.2.3). Die reduzierten Schallemissionen lassen sich somit nicht ausschließlich auf die radiale Einstellung des Radsatzes zurückführen.

Der in Zürich verfolgte Ansatz für radial einstellbare Radsätze wurde auch bei den Avenio-Straßenbahnen in München umgesetzt. Auch bei diesen Fahrzeugen gibt es an den Triebdrehgestellen keinen klassischen Radsatz mit einer mechanischen Zwangskopplung (Querkopplung) über eine Achswelle, sondern es besteht nur eine elektrische Kopplung. Je Seite werden stattdessen zwei hintereinanderliegende Losräder eingebaut. Jede Seite verfügt über einen Längsmotor mit zwei Getrieben (Längsradsatz). So können die jeweiligen Losräder einer Seite mit unterschiedlicher Drehzahl, abgestimmt auf die unterschiedlichen Längen des Innen-

und des Außenbogens, rollen. Damit wird das Anlaufen des Spurkranzes an die Schiene reduziert und die Emissionen im Gleisbogen verringert (vgl. Schnaas und Karl 2015).

Abbildung 70: Aufsicht auf das Fahrwerk der Straßenbahn Typ Cobra



Quelle: Arx 2001

In Chemnitz kam es beim Einsatz von radial einstellbaren Radsätzen im Bogen zu guten Ergebnissen. Bei der Bogenausfahrt kam es dann jedoch zu einem unregelmäßigen Lauf. Aus diesem Grund wurde die Radialeinstellung durch entsprechende Maßnahmen gesperrt.

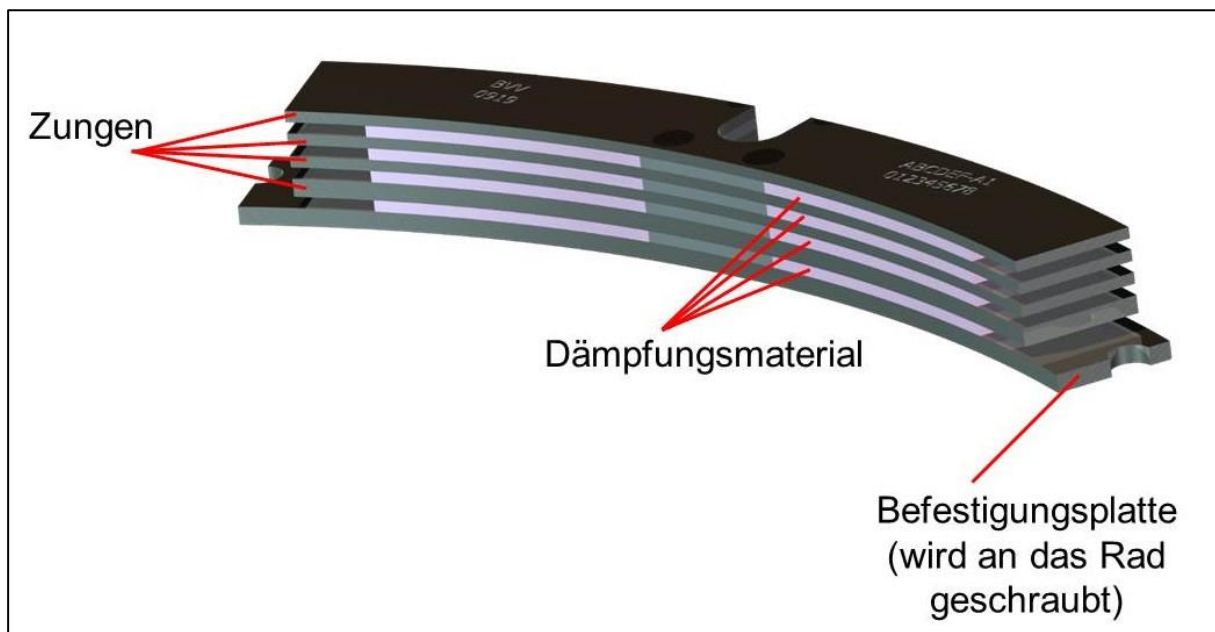
Erste Ansätze mit Losrädern in Kassel, bei denen die beiden Räder eines Radsatzes nicht fest über die Radachse miteinander verbunden sind, führten allerdings zu einem unerwünschten häufigen Anlaufen eines Rades an die Schiene, und damit zu erhöhtem Verschleiß und erhöhten Geräuschemissionen.

5.2.5 Radschallabsorber

5.2.5.1 Technik

Durch den Stick-Slip-Effekt (Anregung durch Reibung im Rad-Schiene-Kontakt) bei Gleisbogendurchfahrt werden die Räder der Straßenbahnfahrzeuge zu Eigenschwingungen angeregt (Abschnitt 2.5.2.3). Mit der Anwendung von Radschallabsorbern können Pegelspitzen der Radschwingungen abgemildert oder ganz vermieden werden. Radschallabsorber arbeiten nach dem Prinzip der Schwingungstilgung (Abbildung 71 und Abbildung 72).

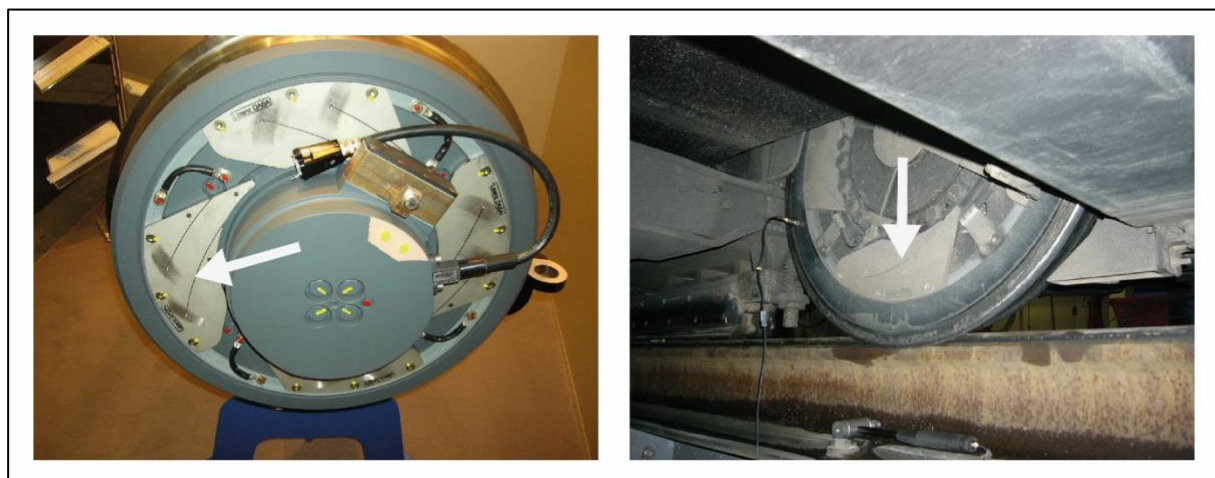
Abbildung 71: Prinzipieller Aufbau eines Schwingungsdämpfers (Radschallabsorber)



Quelle: Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH 2019

Abbildung 72: Beispiel für Radschallabsorber an Straßenbahnradern

An einem Modellrad (linkes Bild) und im praktischen Einsatz (rechtes Bild).



Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

5.2.5.2 Akustische Wirkung

Damit Radabsorber wirksame Dämpfungseigenschaften entwickeln können, müssen sie an die Eigenschaften (radiale Eigenfrequenzen) der jeweils verwendeten Räder angepasst werden. Bei entsprechender Anpassung lässt sich eine hohe Minderung der Kurvenquietschgeräusche erzielen (Lenz 2016, S. 95; Gerndt 1983, 69ff.). Die genaue Höhe der Pegelminderung ist nicht allgemeingültig festzulegen, sondern hängt von den Randbedingungen im Einzelfall ab. Ihre grundsätzliche Wirksamkeit konnte nachgewiesen werden (ebenda). Eine Minderung der Maximalpegel ist zwischen ca. 20 dB(A) und 30 dB(A) möglich.

5.2.5.3 Anwendungserfahrungen

Bei einigen Verkehrsunternehmen wird diese Technik bei allen Fahrzeugen erfolgreich umgesetzt (z. B. Hamburg, Stuttgart und Freiburg). In der VDV-Schrift 611 (VDV 2011a) wird empfohlen, dass der nachträgliche Einbau von Radabsorbern möglich sein sollte, ein entsprechender Platzbedarf ist somit vorzusehen.

Problematisch kann bei Straßenbahnen die dauerhafte Befestigung an den Rädern sein. Schraubverbindungen können u. U. die Laufleistung der Räder negativ beeinflussen. Zudem können sich die Schrauben lösen und die Radabsorber werden weggeschleudert (Lenz 2016, S. 95). Die Dauerhaltbarkeit stoffschlüssiger Verbindung (Kleben) ist noch zu prüfen.

Fehndrich beschreibt, dass eine Verschmutzung der Ankopplungsstelle der Absorber an den Radkranz zu einer verminderten Wirkung führen kann. Bei der Montage ist somit auf saubere Oberflächen zu achten (Fehndrich 2009).

5.2.6 Bearbeitung der Radfahrflächen

5.2.6.1 Technik

Um die Fahrflächen der Räder möglichst glatt zu erhalten, müssen diese regelmäßig nachbearbeitet werden, z. B. durch Abdrehen des Radreifens. Die Bearbeitung der Räder erfolgt meist „nach Bedarf“, d. h., nachdem Meldungen von Fahrenden und Werkstattpersonal oder auch Beschwerden von Nutzenden und Anwohnenden über Schallemissionen eingehen (VDV und VDV IndustrieForum e. V. 2014, S. 406).

5.2.6.2 Akustische Wirkung

Je nach Ausgangszustand der Fahrfläche sind durch die Nachbearbeitung der Radfahrfläche deutliche Pegelminderungen zu erreichen, die in der Größenordnung bis 10 dB(A) liegen.

5.2.6.3 Anwendungserfahrung

Die Radbearbeitung wird in allen Verkehrsunternehmen in regelmäßigen Abständen bzw. bei Bedarf durchgeführt.

5.2.7 Bedämpfung der Radscheiben

5.2.7.1 Technik

Der Hohlraum zwischen Radachse und Radkranz eines Rades wird im Bereich um die Achse herum mit einem Verguss aus Polyurethan verschäumt (Abbildung 73). Der Materialverbund mit dem Rad muss vollflächig und dauerhaft ausgeführt sein, um eine gute Wirksamkeit zu erreichen. Das eingebrachte Material muss eine hohe Dämpfung aufweisen (Lenz 2016).

Erste Versuche mit dieser Technik erfolgten in Hamburg bereits in den 1970er Jahren (vgl. Albert und Raquet 1979, S. 3).

5.2.7.2 Akustische Wirkung

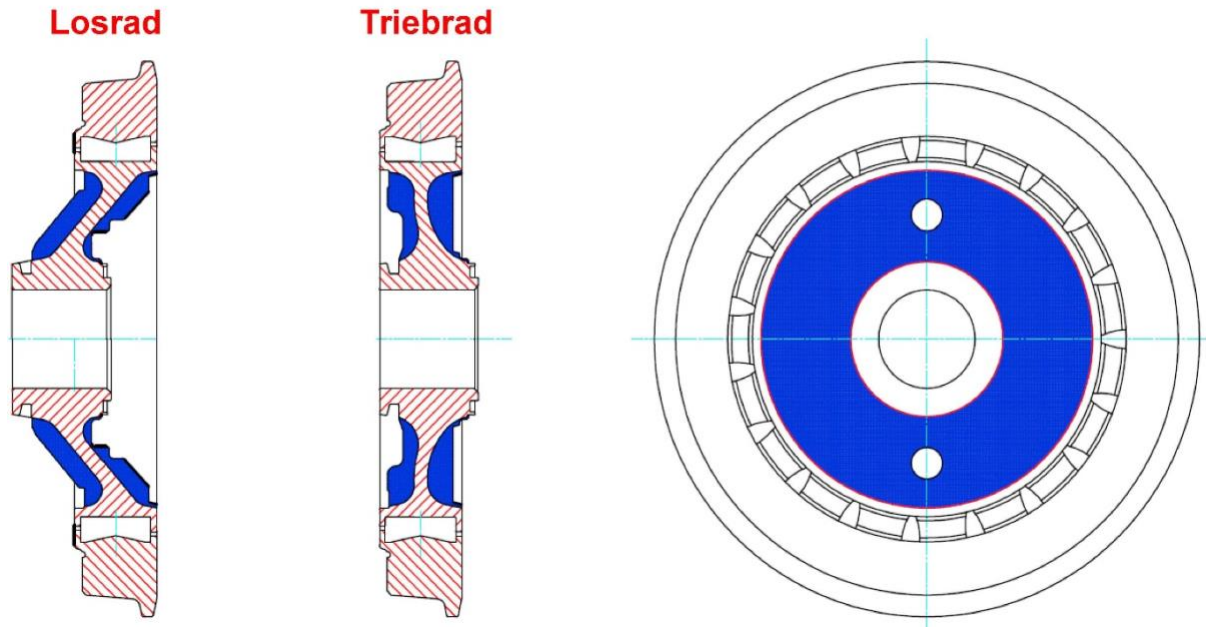
Im Rahmen eines von Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsvorhabens (Stadtwerke München GmbH und Polyplan GmbH 2009) konnten Minderungen der Schallemissionen um 10 dB nachgewiesen werden (vgl. Lenz 2016, S. 95).

5.2.7.3 Anwendungserfahrung

Das Verfahren zur Radscheibenbedämpfung wurde bislang nur in Forschungsvorhaben getestet und hat noch keine breite Anwendung in der Betriebspraxis gefunden (vgl. Lenz 2016, S. 97).

Abbildung 73: Beispiel für Radscheibenbedämpfung an Straßenbahnradern

Dargestellt ist die maximal bedämpfbare Fläche (blau).



Quelle: Polyplan GmbH 2006, S. 17

5.2.8 Reduzierung der Antriebsgeräusche durch moderne Antriebsstromrichter

5.2.8.1 Technik

Durch neuere Antriebe bzw. Stromrichter (IGBT, insulated-gate bipolar transistor) lassen sich infolge geräuschoptimierter Taktverfahren bei den Antriebsstromrichtern die Geräuschemissionen in ihrer Frequenz optimieren. Frühere Gleichrichter (z. B. mit GTO-Technik) arbeiteten mit einer diskreten Taktfrequenz. Dadurch erzeugen sie ein in der Tonart wechselndes, aber tonales und damit als besonders störend empfundenes Geräusch. Moderne IGBT-Antriebe arbeiten mit einem größeren Frequenzbereich bei den Taktfrequenzen. Zudem wird bei den Frequenzen gewobbelt, d. h., dass die erzeugte Frequenz zyklisch zwischen zwei einstellbaren Endwerten variiert wird. Dies bietet mehr Möglichkeiten für geräuschoptimierte Taktverfahren.

5.2.8.2 Akustische Wirkung

Die Schallleistung wird zwar nicht reduziert. Durch die größere Frequenzreserve und die Variation beim Frequenzgang wird allerdings der tonale Anteil verwischt und das Geräusch breitbandig verrauscht. Die Geräusche werden als nicht so störend empfunden (VDV und VDV-Förderkreis e. V. 2010, S. 325f.).

5.2.8.3 Anwendungsempfehlung

Neue Straßenbahnfahrzeuge verfügen über moderne Antriebe bzw. Stromgleichrichter. Geräuschoptimierte Stromrichter werden insofern durch die Erneuerungszyklen bei den Fahrzeugen im Markt eingeführt.

5.2.9 Reduzierung der Antriebsgeräusche durch Getriebeoptimierung

5.2.9.1 Technik

Für die akustische Optimierung von Getrieben bei Straßenbahnen bestehen verschiedene Ansatzmöglichkeiten (vgl. Hensel et al. 2016).

Durch die Mikrogeometrieoptimierung (Anpassung der Verzahnungsgeometrie an den Eingriffspunkten) der Zähne (Profilkorrekturen, Zahnbreiten und topologische Modifikationen) kann die Akustik des Getriebes beeinflusst werden. Eine akustische Optimierung für alle Lastfälle ist jedoch nicht möglich, da die akustischen Auswirkungen durch das Getriebe stark lastabhängig sind. Daher ist im Vorfeld der Optimierung der Nennlastbereich festzulegen, um eine möglichst effektive Optimierung zu erzielen.

Auch die Gehäusestruktur des Getriebes lässt sich akustisch verbessern, indem die schallabstrahlenden Flächen des Gehäuses hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften (Schallabstrahlung) mittels Finiter-Elemente-Analyse optimiert wird. Im Anschluss kann die Gehäusegeometrie unter akustischen Aspekten weiter optimiert werden.

5.2.9.2 Akustische Wirkung

Der Zahneingriff der Zahnräder im Getriebe gilt als Hauptanregungsquelle für Körper- und Luftschallanregung im Getriebe. Das vom Getriebe abgestrahlte Geräusch nimmt mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit zu. Eine Optimierung der Verzahnungsgeometrie oder der Gehäusestruktur eignet sich dazu, das Getriebegeräusch durch Beeinflussung der Zahneingriffsfrequenzen insgesamt zu reduzieren. Diese Optimierung der Mikrogeometrie der Verzahnung bietet dabei gegenüber der Optimierung der Gehäusestruktur das größere akustische Optimierungspotenzial. Durch Simulationsmodelle wurde infolge einer optimierten Struktur eine Verringerung der durch das Getriebe abgestrahlten Schallleistung für den gesamten Drehzahlbereich von 8 dB für bestimmte Frequenzbereiche ermittelt (Hensel et al. 2016).

5.2.9.3 Anwendungsempfehlung

Die akustische Optimierung der Verzahnungsgeometrie wird im Rahmen des Zulassungsverfahrens durchgeführt. Dort werden Prototypen auf einem Getriebeprüfstand analysiert und auf Grundlage einer messdatenbasierten Simulation optimiert.

Die Optimierung der Verzahnungsgeometrie und der Gehäusestruktur lässt sich durch Simulationsmethoden auf Basis der Finite-Elemente-Methode in einer frühen Phase der Komponentenentwicklung durchführen. Dort können die akustischen Eigenschaften gezielt analysiert und beeinflusst werden.

5.2.10 Geräuschoptimierung von Heizungs-, Klima- und Lüftungsgeräten

5.2.10.1 Technik

Für die Geräuschreduzierung oder Geräuschoptimierung von Nebenaggregaten wie Heizungs-, Klima- oder Lüftungsgeräten bestehen unterschiedliche Möglichkeiten.

Bei Lüftern lassen sich die Lüfterräder optimieren, sodass im Betrieb die durch den Luftabriss auftretenden Geräusche minimiert werden können. Bei der Optimierung spielen die Form, Anordnung und Größe der Schaufeln eine Rolle. Die genaue Ausführung ist immer auch im Zusammenhang mit den Anforderungen an den Lüfter zu sehen (sicheres Abführen von Wärme, um das Versagen eines Bauteils zu vermeiden).

Sensoren, die beispielsweise eine Analyse von Temperatur- oder Messdaten der Luftqualität aus dem Nutzendenraum durchführen, können für einen drehzahlgesteuerten Betrieb der Lüfter genutzt werden. Die Drehzahl wird dann dem entsprechenden Bedarf automatisch angepasst.

5.2.10.2 Akustische Wirkung

Die genaue akustische Wirkung drehzahlgesteuerter Lüfter ist nicht allgemein zu quantifizieren. Einen Einfluss auf die Geräuschentwicklung haben neben der Drehzahl auch die Größe der Schaufel sowie deren Form. Insofern sind Lüfter für den spezifischen Fall akustisch zu optimieren.

5.2.10.3 Anwendungserfahrung

Lüfter, die in Abhängigkeit der erforderlichen Laststufe drehzahlgesteuert betrieben werden, stellen in neuen Straßenbahnfahrzeugen heutzutage (2020) den Standard dar. Bei der Steuerung ist immer auch zu beachten, dass der Lüfter die Aufgabe hat, Wärme abzuführen, um ein Bauteilversagen zu verhindern. Einer akustischen Optimierung sind daher Grenzen gesetzt.

5.2.11 Sonstige Lärmmindernde Maßnahmen an Fahrzeugen

Neben den oben näher erläuterten Maßnahmen sind z. B. noch Folgende zu erwähnen. Hierbei handelt es sich jedoch z. T. um Standardlösungen, die derzeit nahezu bei jedem Straßenbahnfahrzeug umgesetzt werden bzw. noch in der Entwicklung sind oder deren Umsetzung zu keinem nennenswerten Erfolg geführt haben (Wirkung deutlich kleiner als 3 dB Reduzierung).

- ▶ Gummigefederte Räder (ca. 2dB(A), VDV 2011b, S. 38),
- ▶ Antiblockier- und Antischlupfregelungen,
- ▶ Geschwindigkeitsassistenzsysteme,
- ▶ Ersatz von Sand zur Reibwerterhöhung durch andere Lösungen.

5.3 Betriebliche Maßnahmen

5.3.1 Übersicht der Maßnahmen

Betriebliche Schallminderungsmaßnahmen beim Einsatz von Straßenbahnfahrzeugen und deren Wirkung auf die Schallemissionen sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die unter Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Grundsätze hinsichtlich der dB-Bewertung gelten sinngemäß auch für die hier dargestellten Maßnahmen.

Tabelle 13: Zusammenstellung möglicher Schallminderungsmaßnahmen im Betrieb sowie deren akustischer Wirkung auf den A-bewerteten Emissionspegel

Maßnahme	Wirkung auf Rollgeräusche ²¹	Wirkung auf Stoßgeräusche ²¹	Wirkung auf Kurvengeräusche ²¹	Anwendung straßenbündiger Bahnkörper	Anwendung besonderer Bahnkörper	Anwendung unabhängiger Bahnkörper
Geschwindigkeitsbeschränkung	je nach Umfang der Beschränkung	je nach Umfang der Beschränkung	je nach Umfang der Beschränkung	ja	ja	ja
Fahrzeug-Einsatzstrategien	gering	gering	gering	ja	ja	ja

Quelle: Eigene Darstellung

5.3.2 Reduzierung der zulässigen Streckengeschwindigkeit

5.3.2.1 Umsetzung

Durch eine Veränderung der Fahrgeschwindigkeit kann die Schallemission beeinflusst werden. Je geringer die Fahrgeschwindigkeit wird, desto weniger dominant ist das Rollgeräusch, das bei Fahrgeschwindigkeiten über 30 km/h einen maßgeblichen Einfluss auf die Geräuschemissionen im Straßenbahnverkehr hat.

5.3.2.2 Akustische Wirkung

Bei einer Verdoppelung der Geschwindigkeit einer Straßenbahn von 40 km/h auf 80 km/h kann von einem Pegelanstieg von ca. 9 dB ausgegangen werden (Hecht und Krüger 2006, S. 267). Diese Aussage gilt für einzelne Vorbeifahrten. Für den auf eine Stunde bezogenen Mittelungspegel ergibt sich dagegen ein Pegelanstieg von ca. 6 dB(A) bei einer Verdopplung der Geschwindigkeit. Dieser Wert ist auch bei einer Berechnung nach Tabelle 14 der Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV näherungsweise anzusetzen. Entsprechend ist das Potenzial zur Verringerung der Schallemissionen.

Die unterschiedliche Pegelzunahme für den Vorbeifahrtpegel und den auf eine Stunde bezogenen Stundenpegel ergibt sich anhand des im Folgenden dargestellten Beispiels. Angenommen wird:

- $v_1 = 40 \text{ km/h}$ mit $T_{p1} = 6 \text{ s}$,
- $v_2 = 80 \text{ km/h}$ mit $T_{p2} = 3 \text{ s}$ und
- $L_{pAeq,v1} = 70 \text{ dB(A)}$

T_p ist die Vorbeifahrtzeit. Sie halbiert sich bei Verdopplung der Geschwindigkeit.

Mit

²¹ Akustische Wirkung der Maßnahmen (näherungsweise): gering: unter 3 dB(A); mittel: 3 dB(A) bis unter 6 dB(A); mittel bis hoch 6 dB(A) bis unter 9 dB(A); hoch 9 dB(A) bis unter 12 dB(A); hoch bis sehr hoch 12 dB(A) bis unter 15 dB(A); sehr hoch mehr als 15 dB(A).

$$L_{pAeq,v2} = L_{pAeq,v1} + 30 \times \lg \frac{v_2}{v_1} \quad (\text{Gl. 10})$$

folgt für

$$L_{pAeq,v2} = 79 \text{ dB(A)}.$$

Es ergibt sich somit hierfür ein Differenzpegel von 9 dB(A). Aus zahlreichen Messungen konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden.

Mit Gleichung (Gl. 11) wird der Stundenpegel berechnet.

$$L_{pAeq,1h} = L_{pAeq,Tp} + 10 \lg \frac{T_p}{3600 \text{ s}} \quad (\text{Gl. 11})$$

Hiermit folgt für die beiden Vorbeifahrtpegel:

$$L_{pAeq,v1,1h} = 43,2 \text{ dB(A)},$$

$$L_{pAeq,v2,1h} = 49,2 \text{ dB(A)}.$$

Es ergibt sich somit hierfür ein Differenzpegel von 6 dB(A). Diese Pegelunterschiede gelten sowohl für eine Straßenbahnvorbeifahrt als auch für mehrere Vorbeifahrten.

5.3.2.3 Anwendungserfahrung

Durch die – auch abschnittsweise – Verringerung der Streckengeschwindigkeit nimmt die Beförderungsgeschwindigkeit und damit die Reisegeschwindigkeit ab. Dadurch verliert der ÖPNV an Attraktivität, vor allem in direkter Konkurrenz zum motorisierten Individualverkehr. Zudem wurden seitens des Bundes, der Länder und der Kommunen hohe Investitionen für eine Beschleunigung des ÖPNV verausgabt. Eine Reduzierung der Streckengeschwindigkeit sollte insofern eines der letzten Mittel sein, die Geräuschemissionen im Straßenbahnverkehr zu reduzieren. Bisherige Anwendungsfälle sind nur in Einzelfällen und auf sehr kurzen Abschnitten bekannt.

5.3.3 Fahrzeug Einsatzstrategien

Aufgrund technischer Weiterentwicklungen und der Langfristigkeit von Ersatzbeschaffungen bei den Fahrzeugen, sind innerhalb einer Straßenbahnflotte in der Regel Fahrzeugserien mit unterschiedlichem technischem Niveau im Einsatz. Dies kann auch Maßnahmen zur Emissionsminderung betreffen. In für das Umweltbundesamt erarbeiteten Handlungsempfehlungen wird als betriebliche Maßnahme ein strategisch angepasster Einsatz von unterschiedlich lauten Fahrzeugen empfohlen (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 112f.):

- „Über Flottenstandards definiert der Nahverkehrsplan lediglich die Vorgaben. Dem Verkehrsunternehmen bleibt somit Gestaltungsspielraum über die Art der Erfüllung. Hier bestehen Optimierungspotentiale im Hinblick auf den Schutz vor Schienenverkehrslärm.
- Durch den Fahrzeugeinsatz im Hinblick auf den Fahrzeugmix (Alt-/Neufahrzeuge) mit Bezug auf das jeweilige Einsatzgebiet (vorwiegend lärmsensible oder lärmunsensible Gebiete) bzw. die Einsatzzeit (Tag/Nacht) lassen sich die Immissionen in geringem Umfang beeinflussen. Eine solche Einsatzplanung setzt voraus, dass eine ausreichende Fahrzeugkapazität zur Verfügung steht (was aus Kostengründen nicht immer gegeben ist). Deshalb wird grundsätzlich von den Verkehrsunternehmen ein flexibler Fahrzeugeinsatz angestrebt. Aber

besonders die Einhaltung niedriger Nachtwerte lässt sich über den Fahrzeugmix steuern, wenn andere Maßnahmen nicht ausreichen.

- ▶ Darüber hinaus lässt sich über den im Zeitablauf verstärkten Einsatz von Neufahrzeugen mit entsprechend niedrigen Einzelfahrzeug-Schallemissionswerten der Flottenstandard in Zukunft weiter anheben, zumindest für Fahrten in sensiblen Gebieten oder in der Nacht.
- ▶ Von derartigen Möglichkeiten sollten die Verkehrsunternehmen mehr als bisher Gebrauch machen, indem sie in ihr Planungsinstrumentarium für den Fahrzeugeinsatz die Lärmschutzgesichtspunkte verstärkt einbeziehen“.

Bei der Einsatzplanung von unterschiedlichen Fahrzeuggenerationen ist auch zu beachten, dass nicht alle Fahrzeugführer über eine Berechtigung zum Fahren aller Fahrzeugtypen verfügen.

6 Sozio-ökonomische Bewertung, regulatorische und wirtschaftliche Anreize von Lärminderungsmaßnahmen

6.1 Kosten lärmreduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen

Der Katalog von Maßnahmen ist umfangreich. Diese sind zu unterschiedlichen Investitionssummen und jährlichen Kosten einzubauen und zu betreiben.

Die Kostensätze der Lärminderungsmaßnahmen setzen sich zusammen aus den Neuinvestitionen und den laufenden Kosten (Instandhaltungskosten, Kosten für Betriebsmittel, usw.). Es sei darauf hingewiesen, dass die Daten zu Kosten und Lärminderungspotentialen hohen Unsicherheiten unterliegen. Einige technische Maßnahmen befinden sich noch in der Entwicklung oder sind noch recht neu und gingen über einige Testläufe bisher noch nicht hinaus. Viele Anbietende stellen die Datensätze für eine genaue Kostenabschätzung nicht zur Verfügung, sodass die vorhandenen Quellen und Kostensätze geprüft und auf Basis der Erfahrungen und Expertinnen- bzw. Expertenwissens des Teams ergänzt werden. Teilweise wurden vorhandene Angaben in diesem Gutachten nach bestem Wissen mit Auf- oder Abschlägen korrigiert.

Grundlage der Kostenermittlung ist eine eingleisige Strecke mit einem Kilometer Länge. Als Fahrzeug wurde ein Niederflurfahrzeug als klassisches Straßenbahnfahrzeug angenommen. Um auch punktuelle Maßnahmen in den Vergleich aufnehmen zu können, werden diese Maßnahmen mit der jeweilig notwendigen Anzahl an Punkten auf die Strecke hochgerechnet.

Trotz aller Unschärfen werden die zeitabhängigen Kosten für den Kapitaldienst aus den Investitionen der Maßnahme und einem Annuitätsfaktor (auch Annuität genannt) ermittelt. Mit diesem Annuitätsfaktor werden die einmaligen Investitionen unter Berücksichtigung der Zinskosten und der Abschreibungen finanzmathematisch gleichmäßig auf die Lebensdauer verteilt. Damit kann der Zielwert je Lebensdauer dargestellt und die Maßnahmen mit unterschiedlichen Investitionen und Lebensdauern miteinander verglichen werden. (INTRAPLAN Consult GmbH 2016) Die Annuität wird berechnet mit:

$$\text{Annuität} = \frac{((1+\text{Zinssatz})^{\text{Lebensdauer}}) * \text{Zinssatz}}{((1+\text{Zinssatz})^{\text{Lebensdauer}}) - 1} \quad (\text{Gl. 12})$$

Der Zinssatz wird nach Standardisierter Bewertung 2016 mit einer gesamtwirtschaftlichen Diskontrate von 1,7 Prozent angenommen (INTRAPLAN Consult GmbH 2016). Die jährlichen Kosten ergeben sich aus:

$$\text{Jährliche Kosten} = (\text{Annuität} * \text{Investitionen}) + \text{Laufende Kosten pro Jahr} \quad (\text{Gl. 13})$$

Die laufenden Kosten bestehen aus den Instandhaltungs- und Betriebsmittelkosten. Folgende Tabelle 14 zeigt eine Aufstellung der jährlichen Kosten je Maßnahme. Auf dieser Evaluierung bzw. Abschätzung beruhen alle im Folgenden genannten Angaben über Kosten und Lärminderungspotentiale der jeweiligen technischen Maßnahme. Das Ergebnis der jährlichen Kosten wird gerundet dargestellt

Tabelle 14: Jährliche Kosten der Schallminderungsmaßnahmen je Kilometer

Nr. der Maßnahme	Maßnahmen	Investition [€/km]	Laufende Kosten (Mehrkosten) [€/a*km]	Lebensdauer in Jahren	Annuitätsfaktor	Jährliche Kosten
1	Gleisbogenradius (bei einem Gleisbogen)	3.000	Keine Mehrkosten	25	0,049	~ 150 €
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	Keine Mehrkosten ²²	3.750	1	1,017	~ 3.800 €
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	1.600 ²³	4.800	0,33	3,064	~ 9.700 €
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	Keine Mehrkosten ²²	5.000	4	0,260	~ 5.000 €
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	180.000	10.700	13	0,086	~ 26.300 €
6	Schienenstegabschirmung	180.000	11.700	13	0,086	~ 27.300 €
7	Grüne Gleise, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	600.000	10.800	50	0,029	~ 28.700 €
8	Grüne Gleise, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	600.000	10.800	50	0,029	~ 28.700 €
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	2.000	Keine Mehrkosten	50	0,029	~ 60 €
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich (bei einer Weiche)	5.000	500	25	0,049	~ 750 €
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	Keine	3.500	15	0,076	~ 3.500 €

²² Annahme, dass ein Fachbetrieb beauftragt wird (d. h. es entstehen keine Investitionskosten für das KVV). Alternativ können auch die Anschaffung einer entsprechenden Maschine mit den jährlichen Abschreibungen berücksichtigt werden.

²³ Annahme, dass das Verkehrsunternehmen eine Maschine anschafft. Alternativ kann auch ein Fachbetrieb beauftragt werden, wodurch sich die laufenden Kosten erhöhen würden.

Nr. der Maßnahme	Maßnahmen	Investition [€/km]	Laufende Kosten (Mehrkosten) [€/a*km]	Lebensdauer in Jahren	Annuitätsfaktor	Jährliche Kosten
12	Schienenkopf-Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	25.000	8.000	5	0,210	~ 13.300 €
13	Schienenkopf-Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	25.000	8.000	5	0,210	~ 13.300 €
14	Schienenstegschmierung	20.000	1.010	30	0,042	~ 1.900 €
15	Absorptionskörper im Gleis	40.000	600	50	0,029	~ 1.800 €
16	Schallschutzwände - hoch	650.000	10.000	70	0,024	~ 26.000 €
17	Schallschutzwände - niedrig	350.000	10.000	45	0,031	~ 21.200 €
18	Spurkranzschmierung	20.000	1.010	30	0,042	~ 1.900 €
19	Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	20.000	1.220	30	0,042	~ 2.100 €
20	Radial einstellbare Radsätze	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar	30	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar
21	Radabsorber am Radreifen	7.200	200	20	0,059	~ 650 €
22	Radbedämpfung an der Scheibe	Nicht quantifizierbar (bisher nur in Forschungsvorhaben umgesetzt)	Nicht quantifizierbar (bisher nur in Forschungsvorhaben umgesetzt)	Keine Erfahrungen	Nicht zu ermitteln	Keine Erfahrungen
23	Schleifen / Drehen der Radfahrflächen	Keine Mehrkosten	2.000	0,5	2,025	2.000 €

Nr. der Maßnahme	Maßnahmen	Investition [€/km]	Laufende Kosten (Mehrkosten) [€/a*km]	Lebensdauer in Jahren	Annuitätsfaktor	Jährliche Kosten
24	Reduzierung der Antriebsgeräusche durch moderne Antriebsstromrichter	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar	30	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar
25	Reduzierung der Antriebsgeräusche durch Getriebeoptimierung	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar	30	0,042	Nicht quantifizierbar
26	Geräuschoptimierung von Heizungs-, Klima- und Lüftungsgeräten	Keine allgemeine Quantifizierung möglich	Keine allgemeine Quantifizierung möglich	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar	Nicht quantifizierbar

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2 Sozio-ökonomische Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen

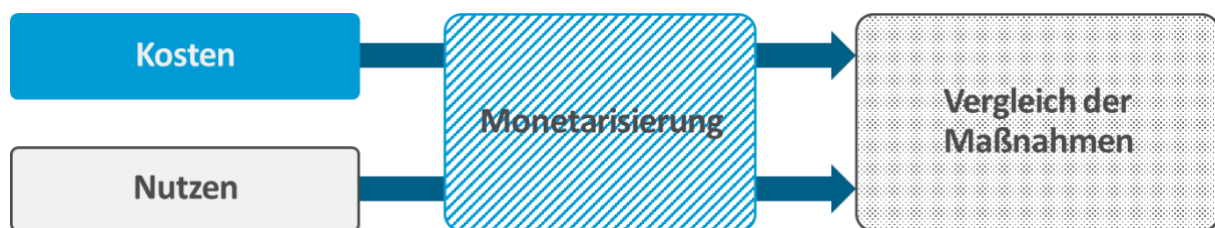
6.2.1 Ziele einer Bewertung

Mit dem Ansatz einer Bewertung sollen die in Kapitel 5 vorgestellten Lärminderungsmaßnahmen normiert über ihre Kosten-Lärmwirksamkeit (Euro-Dezibel) miteinander verglichen werden. Dazu werden die jeweilige Investition und Instandhaltungskosten annuiert. Für die notwendige Investition je Maßnahme werden Einheitskostensätze ermittelt und daraus über Kapitaldienste die jährlichen Bereitstellungskosten für die Investition ermittelt. Die Instandhaltungskosten werden pro Jahr abgeschätzt.

Ein erster einfacher Vergleich zeigt die Kosten pro Dezibel Schallminderung je Maßnahme. Des Weiteren wird mit Hilfe eines Nutzen-Kosten-Indikators der Nutzen über Betroffene vereinfacht abgeschätzt. Darüber hinaus ergibt sich eine Einschätzung ab wie vielen Einwohnenden sich eine Maßnahme sozio-ökonomisch rentiert.

Das Ziel ist die Erstellung einer einfachen Form der Nutzwertanalyse, die einen ersten Vergleich zum Einsatz einer Maßnahme ergeben soll. Das Vorgehen der Nutzwertanalyse zeigt Abbildung 74. Die Kosten und Nutzen der Schallminderung werden über eine Monetarisierung miteinander verglichen, dies gelingt mit der Monetarisierung des Nutzens. Für eine Monetarisierung des Nutzens gibt es bereits verschiedene Ansätze und stellt im Vorgehen die größte Herausforderung dar.

Abbildung 74: Vorgehen einer Kosten-Nutzen-Analyse



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.2 Kosten je Dezibel

Auf Basis der Lärminderung an der Schallquelle in Dezibel und den ermittelten jährlichen Kosten kann für jede Maßnahme ein Kosten-Wirksamkeits-Indikator ermittelt werden. Dabei werden über Formel die Kosten je Dezibel Lärminderung berechnet mit:

$$\text{Kosten pro dB(A) Lärminderung / Jahr} = \text{Jährliche Kosten} / \text{Lärminderung in dB(A)} \quad (\text{Gl. 14})$$

Dieser Indikator ist allerdings nur aussagekräftig für Maßnahmen, die eine vergleichbare Wirkung zeigen. So sind Maßnahmen, die speziell das Kurvenkreischen reduzieren sollen und nur dort ihre Wirkung entfalten, nicht mit anders wirkenden Maßnahmen, wie Roll- oder Stoßgeräuschen, vergleichbar. Im Folgenden werden die Maßnahmen daher mit ihrer jeweiligen schallmindernden Wirkung in ihrer Kategorie verglichen. Diese Kategorien sind wie in Kapitel 5 beschrieben: Kurvengeräusche, Stoßgeräusche und Rollgeräusche.

Als Ergebnis erhält man einen ersten einfachen Vergleich der Maßnahmen. Dieser beruht auf den jährlichen Kosten und der Lärminderung an der Schallquelle.

Tabelle 15 zeigt die jährlichen Kosten je Dezibel für Maßnahmen, die Rollgeräusche reduzieren. Die Schallminderung der einzelnen Maßnahmen wird in Kapitel 5 genauer aufgeschlüsselt.

Tabelle 15: Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Rollgeräusche reduzieren

Nummer	Maßnahme	Jährliche Kosten	Schallminderung Dezibel (mittel)	Jährliche Kosten je Dezibel
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	~ 60 €	1,5	~ 40 €
1a	Gleisbogenradius < 50 m	~ 150 €	1,5	~ 100 €
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	~ 150 €	1,5	~ 100 €
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	~ 3.800 €	16,5	~ 200 €
21	Radabsorber am Radreifen	~ 650 €	1,5	~ 400 €
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	~ 5.000 €	16,5	~ 300 €
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	~ 9.700 €	16,5	~ 600 €
15	Absorptionskörper im Gleis	~ 1.800 €	1,5	~ 1.200 €
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	~ 3.500 €	1,5	~ 2.300 €
16	Schallschutzwände - hoch	~ 26.000 €	7,5	~ 3.500 €
17	Schallschutzwände - niedrig	~ 21.200 €	4,5	~ 4.700 €
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	~ 28.700 €	4,5	~ 6.400 €
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	~ 26.300 €	1,5	~ 17.500 €
6	Schienenstegabschirmung	~ 27.300 €	1,5	~ 18.200 €
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	~ 28.700 €	1,5	~ 19.100 €

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

In Tabelle 16 werden die jährlichen Kosten je Dezibel für Maßnahmen die Stoßgeräusche reduzieren dargestellt.

Tabelle 16: Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Stoßgeräusche reduzieren

Nummer	Maßnahme	Jährliche Kosten	Schallminderung Dezibel (mittel)	Jährliche Kosten je Dezibel
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	~ 60 €	4,5	~ 100 €
1a	Gleisbogenradius < 50 m	~ 150 €	1,5	~ 100 €
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	~ 150 €	1,5	~ 100 €
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich (bei einer Weiche)	~ 750 €	7,5	~ 100 €
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	~ 3.800 €	1,5	~ 2.500 €
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	~ 5.000 €	1,5	~ 3.300 €
16	Schallschutzwände - hoch	~ 26.000 €	7,5	~ 3.500 €
17	Schallschutzwände - niedrig	~ 21.200 €	4,5	~ 4.700 €
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	~ 9.700 €	1,5	~ 6.500 €
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	~ 26.300 €	1,5	~ 17.500 €
6	Schienenstegabschirmung	~ 27.300 €	1,5	~ 18.200 €
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	~ 28.700 €	1,5	~ 19.100 €
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	~ 28.700 €	1,5	~ 19.100 €

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

In Tabelle 17 werden die jährlichen Kosten je Dezibel für Maßnahmen die Kurvengeräusche reduzieren dargestellt.

Tabelle 17: Jährliche Kosten je Dezibel und Kilometer bei Maßnahmen die Kurvengeräusche reduzieren

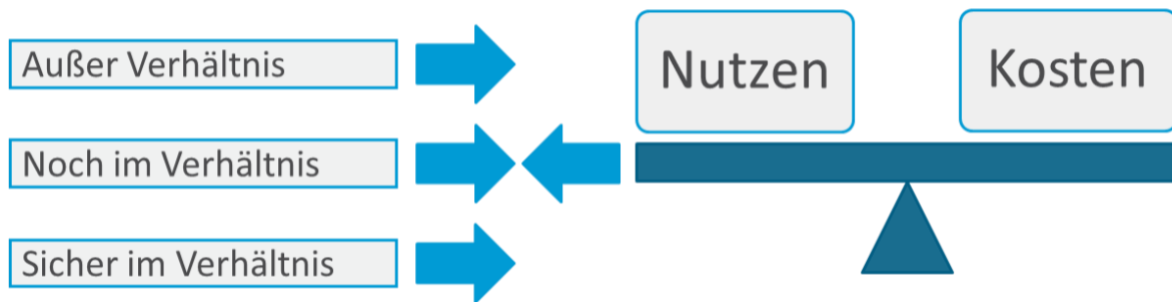
Nummer	Maßnahme	Jährliche Kosten	Schallminderung Dezibel (mittel)	Jährliche Kosten je Dezibel
1a	Gleisbogenradius <50 m	~ 60 €	16,5	~ 10 €
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	~ 150 €	10,5	~ 15 €
21	Radabsorber am Radreifen	~ 650 €	13,5	~ 50 €
19	Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	~ 2.100 €	13,5	~ 150 €
18	Spurkranzschmierung	~ 1.900 €	3,0	~ 600 €
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	~ 3.500 €	4,5	~ 800 €
14	Schienenkopfflankenschmierung	~ 1.900 €	1,5	~ 1.200 €
12	Schienenkopf-Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	~ 13.300 €	13,5	~ 1.000 €
13	Schienenkopf-Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	~ 13.300 €	13,5	~ 1.000 €
16	Schallschutzwände - hoch	~ 26.000 €	7,5	~ 3.500 €
17	Schallschutzwände - niedrig	~ 21.200 €	4,5	~ 4.700 €
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	~ 26.300 €	4,5	~ 5.800 €
6	Schienenstegabschirmung	~ 27.300 €	4,5	~ 6.100 €
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	~ 28.700 €	1,5	~ 19.100 €
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	~ 28.700 €	1,5	~ 19.100 €

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.3 Monetarisierung des Nutzens

Um feststellen zu können, wann die Kosten einer Schallminderungsmaßnahme außer Verhältnis zum angestrebten Nutzen stehen, ist es erforderlich nicht nur die Kosten der Maßnahmen, sondern auch die monetären Auswirkungen des Nutzens einzuschätzen. Dies wird in Abbildung 75 mit der Verhältnismäßigkeitswaage verdeutlicht. Sind die Kosten größer als der Nutzen, steht die Maßnahme außer Verhältnis, es ist noch einmal abzuwägen, ob sich die Maßnahme lohnt. Ist der Nutzen größer als die Kosten, ist die Verhältnismäßigkeit sicher gegeben, die Maßnahme lohnt sich in jedem Fall. Dies ist der Fall, sobald Nutzen und Kosten ausbalanciert sind, das heißt der Nutzen ist gleich den Kosten.

Abbildung 75: Verhältnismäßigkeitswaage



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Für die Ermittlung des Nutzens gibt es bereits einige Bewertungsverfahren. Hier ist auf die „Studie zur Kostenverhältnismäßigkeit von Schallschutzmaßnahmen“ (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) 2005) zu verweisen. In dieser Studie werden Verfahren ausführlich vorgestellt und diskutiert. Viele Verfahren beschränken sich lediglich auf einen Aspekt des Nutzens (steuerlich, gesundheitlich, ...), betrachten lediglich die aktuelle Situation ohne einen Bezug zu einer Variantenuntersuchung für Szenarien in der Zukunft oder berücksichtigen lediglich neue Maßnahmen, jedoch keine Sanierungsmaßnahmen.

Eine gesetzlich einheitliche Lösung für ein Bewertungsverfahren für schallmindernden Maßnahmen für Straßenbahnen im urbanen Bereich gibt es bisher noch nicht.

Eine Erkenntnis aus den verschiedenen Lösungsansätzen zeigt, dass die Wirkung der Schallminderungsmaßnahmen exponentiell zum Gesamtschallpegel bewertet werden. Die Schallminderung von beispielsweise 65 dB(A) auf 62 dB(A) wird beispielsweise stärker bewertet als eine Schallminderung von 20 dB(A) auf 17 dB(A). Hierfür hat sich die Lautheitsformel nach den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS 97) (siehe Gleichung 74 in Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V. (FGSV) 1997 bewährt:

$$g = 2^{(0,1 \cdot LD)} \quad (\text{Gl. 15})$$

mit

LD: Differenz zwischen vorhandenen Schallpegel und Zielpiegel

Das bedeutet, dass bei einer Zunahme der Geräuschbelastung um 10 dB bzw. der Grenzwertüberschreitung $L = 10$ dB die Lärmkosten um den Faktor $2^{(0,1 \cdot 10)} = 2$ zunehmen, sich also verdoppeln. Dieser Ansatz erscheint insofern brauchbar, da eine Zunahme der Geräuschbelastung von 10 dB als eine Verdopplung der Lautstärke empfunden wird (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) 2005).

Um auch einen Basispegelwert zu berücksichtigen, wird empfohlen, den Faktor g für jeweils beide zu vergleichende Schallpegel zu berechnen und im Anschluss die Differenz dieser beiden Werte zu ziehen. So erreicht man beispielsweise für eine Reduktion des Schallpegels von 20dB(A) auf 17 dB(A) einen Wert von 0,75 ($= 2^{(0,1 \cdot 20)} - 2^{(0,1 \cdot 17)}$), für eine Reduktion von 50 dB(A) auf 47 dB(A) einen Wert von 6,01 und von 65 dB(A) auf 62 dB(A) einen Wert von 16,99. Je größer die Ausgangsschallpegel sind, desto höher wird der Bewertungsfaktor. Dieser Faktor wird im Folgenden mitberücksichtigt.

Für die Ermittlung des Nutzens spielt die Anzahl der betroffenen Einwohnenden eine entscheidende Rolle. Diese lässt sich unter anderem wie in Abschnitt 4.5 beschrieben über die

Lärmkartierung ermitteln. Bei der Lärmkartierung wird der Lärmpegel an Hauptverkehrsstraßen, Bahntrassen und auch ein Gesamtlärmpegel ausgegeben. Daraus lässt sich über einen Grenzwert auf die Betroffenheit in diesen Gebieten schließen. Der empfohlene Pegelhöchstwert nach VDV 154 (VDV 2011b, S. 17) liegt bei Personenfahrzeuge mit elektrischem Antrieb bei 75 dB(A). Um auf der sicheren Seite zu sein und auch mit dem Hintergrund, dass Straßenbahnen in Zukunft unter Umständen etwas leiser sind, wird im Folgenden für Straßenbahnen ein Schallpegel von 70 dB(A) angenommen. Der Schallpegel des Umgebungslärms variiert, je nach Straßenbelastung usw. Die Lärmquellen überschneiden sich dabei mit:

$$L_{ges} = 10 \cdot \text{LOG}(10^{(0,1 \cdot L_1)} + 10^{(0,1 \cdot L_2)}) \quad (\text{Gl. 16})$$

mit

L1: Lärmquelle 1; L2: Lärmquelle 2

Mit der Formel (Gl. 16) lässt sich zeigen, dass die Schallminderung einer Schallquelle erst ins Gewicht fällt und bewusst wahrnehmbar ist, wenn sich die zwei Schallquellen deutlich unterscheiden. Die lautere Quelle ist dabei immer die dominierende. Eine Schallminderungsmaßnahme auf Seite der Straßenbahn lohnt sich erst, wenn der Umgebungsschall mindestens um 10 dB(A) niedriger ist als der Schall der Straßenbahn, das heißt höchstens 60 dB(A) beträgt.

Für die Zukunft gehen die Autoren dieses Gutachtens davon aus, dass sich der Umgebungslärm, aufgrund der zunehmenden Elektromobilität und dem zukünftig sinkenden Anteil des Straßenverkehrs in den Innenstädten verringern wird. Geht man von einem langfristigen Zielpiegel des Umweltbundesamts von 50 dB(A) aus, so ist die Straßenbahn mit ihren 70 dB(A) der dominierende Schallpegel. Wenn sich der Verkehr zukünftig in diese Richtung verändert, ändert sich der Einfluss des Straßenbahnschalls erheblich.

Der Straßenbahnverkehr führt zu relevanten Beeinträchtigungen durch Lärm. Dies soll exemplarisch am Beispiel von Berlin gezeigt werden. Im Rahmen der strategischen Lärmkartierung sind die Zahlen für die belasteten Bürgerinnen und Bürger (Belastetenzahlen) durch die Verkehrslärmquellen zuletzt 2017 ermittelt worden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (Berlin) 2013, 2017). Tabelle 18 zeigt den Vergleich der Belasteten in der Nacht für die Straße und die Straßenbahnen.

Tabelle 18: Lärmkartierung in Berlin 2017 – Kumulierte Zahl der Belasteten in der Nacht durch Straßenverkehrslärm und Straßenbahnlärm (einschließlich oberirdischer U-Bahn)

Pegel L_{Night} in dB (A)	über 50	über 55	über 60	über 65	über 70
Straßenverkehrslärm	464.500	296.300	146.200	24.600	300
Straßenbahnlärm	66.500	30.700	10.000	800	0

Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (Berlin) 2013, 2017

Die Zahl der Belasteten über der gemäß UBA gesundheitsrelevanten Schwelle von 55 dB(A) mit 30.700 Einwohnenden bei der Straßenbahn zeigt einen erheblichen Handlungsbedarf. Bezieht man überdies die Belastetenzahlen über 50 dB(A) (eine Belastung, die noch um 5 dB(A) über dem nächtlichen Zielwert des UBA zur Vermeidung erheblicher Belästigungen liegt) auf die jeweiligen Streckenlängen (Hauptverkehrsstraßen 1.360 km, Straßenbahnlinien inklusive oberirdische U-Bahnen 214 km), so ergeben sich für den Straßenverkehrslärm

342 Einwohnende/km und für den Straßenbahnlärm 311 Einwohnende/km, also spezifische Belastungen in gleicher Größenordnung. Durch die vergleichsweise großen Straßenquerschnitte in Berlin liegt dieser Wert auf der sicheren Seite, bei engeren Querschnitten kann es zu einer deutlich höheren Betroffenheit kommen. Eine Verlagerung des Straßenverkehrs auf die Straßenbahnen würde auch ohne weitere Lärmschutzmaßnahmen die Belastung für die Betroffenen nicht mindern.

6.2.4 Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen anhand eines Nutzen-Kosten-Modells

6.2.4.1 Vorgehen

Für die Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen von Straßenbahnen im urbanen Raum wurde im Rahmen dieses Projektes ein allgemeines Vorgehen entwickelt, mit dem sich einzelne Maßnahmen unter Berücksichtigung der Betroffenheit einfach miteinander vergleichen lassen. Abbildung 76 zeigt das Vorgehen vereinfacht dargestellt als Ablaufschemata.

Im Folgenden wird das Vorgehen beschrieben:

- 1) Bestimmung des Gesamtschallpegels L_{ges} mit und ohne schallmindernde Maßnahme

$$L_{ges \text{ mit}} = 10 \cdot \text{LOG}(10^{(0,1 \cdot L_1)} + 10^{(0,1 \cdot L_2)}) \quad (\text{Gl. 17})$$

$$L_{ges \text{ ohne}} = 10 \cdot \text{LOG}(10^{(0,1 \cdot L_1)} + 10^{(0,1 \cdot L_3)}) \quad (\text{Gl. 18})$$

- 2) Bestimmung des Lärmfaktors mit

$$\text{LF mit} = 2^{(0,1 \cdot L_{ges \text{ mit}})} \quad (\text{Gl. 19})$$

$$\text{LF ohne} = 2^{(0,1 \cdot L_{ges \text{ ohne}})} \quad (\text{Gl. 20})$$

- 3) Bildung der Differenz der Lärmfaktoren

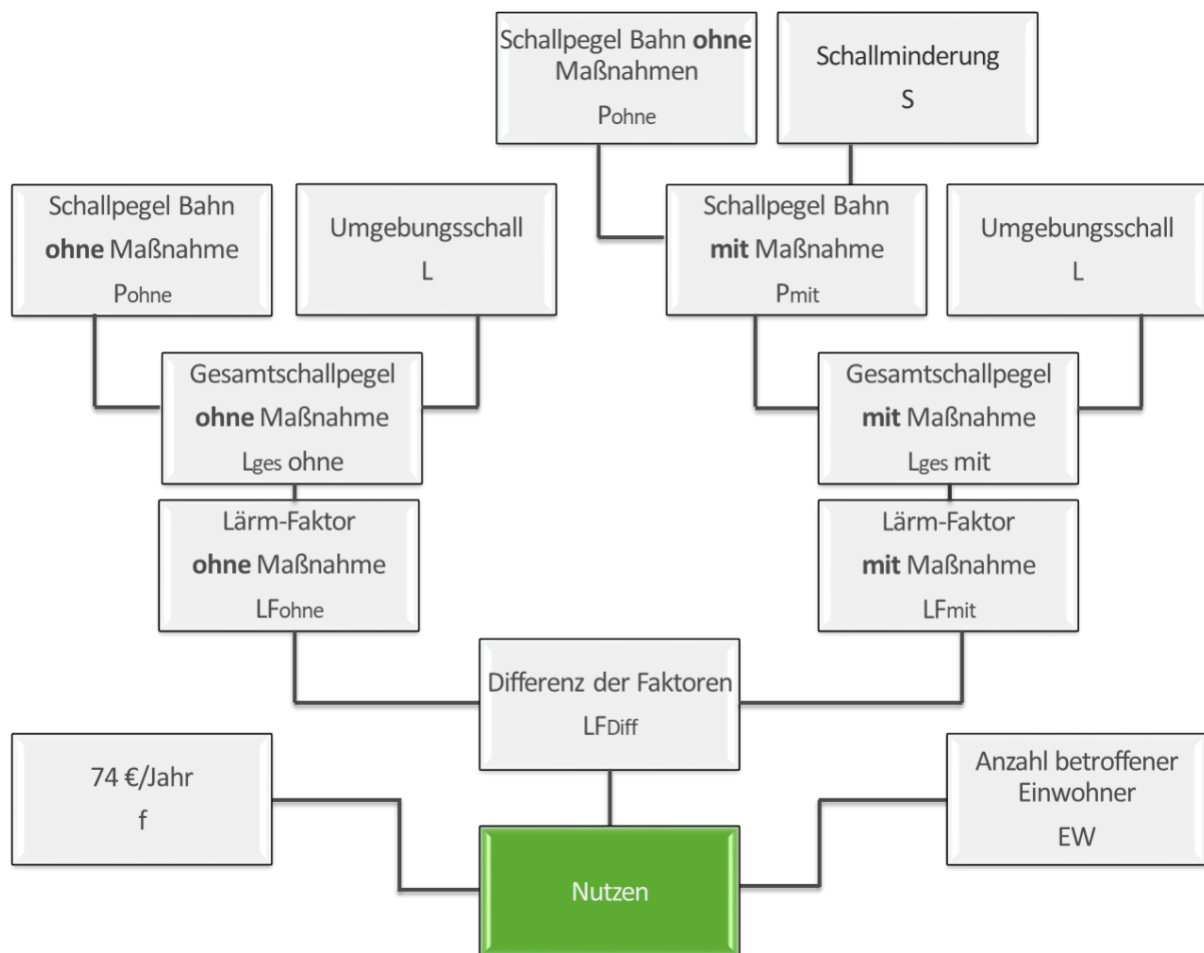
$$\text{LF Diff} = \text{LF ohne} - \text{LF mit} \quad (\text{Gl. 21})$$

- 4) Berechnung des jährlichen Nutzens

$$\text{Nutzen} = 74 \frac{\text{€}}{\text{EW} \cdot \text{a}} \cdot \text{EW} \cdot \text{LF Diff} \quad (\text{Gl. 22})$$

Dabei kommt der Nutzen von 74 € pro Einwohnerin bzw. Einwohner und Jahr aus Anhang 1, Tabelle A1-21 der Standardisierten Bewertung (INTRAPLAN Consult GmbH 2016). Hier wird ein ähnlicher Ansatz zur Bestimmung eines Nutzen-Kosten-Indikators gewählt.

Abbildung 76: Methodischer Ansatz zur Ermittlung des Nutzens



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Als Output werden zwei Ergebnisse ermittelt. Zum einen den Nutzen-Kosten-Indikator (NKI). Er berechnet sich aus dem monetarisierten jährlichen Nutzen geteilt durch die ermittelten jährlichen Kosten.

$$NKI = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} \quad (\text{Gl. 23})$$

Ein Faktor > 1 ergibt eine positive sozio-wirtschaftliche Wirkung, ein Faktor < 1 eine negative, siehe dazu die Verhältnismäßigkeitswaage Abbildung 75.

Zum anderen lässt sich berechnen, ab wie vielen Einwohnenden sich die schallmindernde Maßnahme lohnt. Dafür wird der Nutzen gleich den Kosten gesetzt und die Einwohnenden werden berechnet mit:

$$EW = \frac{\text{Kosten}}{74 \frac{\text{€}}{\text{EW} \cdot \text{a}} \cdot LFDiff \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Gl. 24})$$

Der Vorteil dieses Modells ist, dass die betroffenen Einwohnenden nur einmal ermittelt werden, und zwar ohne schallmindernde Maßnahmen. Die Anzahl der Betroffenen ist somit vor und nach der Maßnahme dieselbe, auch wenn die Betroffenheit nach der Maßnahme deutlich geringer ausfällt. Damit ist das Ergebnis zugunsten der Betroffenen auf der sicheren Seite. Der Gesamtschallpegel wird im Anschluss gewichtet und die Differenz aus dem gewichteten Pegel

vor und nach der Maßnahme geht in den Nutzen ein. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Schallminderung.

6.2.4.2 Berechnungsbeispiel

Im Folgenden soll das Modell anhand eines Beispiels veranschaulicht und darin die vorgestellten Maßnahmen miteinander verglichen werden. Dafür werden drei verschiedene Szenarien gegenübergestellt, mit einem mittleren (50 dB(A)), einem hohen (70 dB(A)) und einem niedrigen Umgebungsschall (10 dB(A)). Zudem soll mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse gezeigt werden, wie empfindlich das Modell reagiert. Dafür wird beispielhaft ein Tunnelbauwerk angenommen, mit dem sich der Straßenbahnlärm auf null Dezibel reduziert.

Die Eingabedaten für das Berechnungsbeispiel stellen sich wie folgt dar (Tabelle 19):

Tabelle 19: Übersicht allgemeine Eingabedaten Ansatz Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen

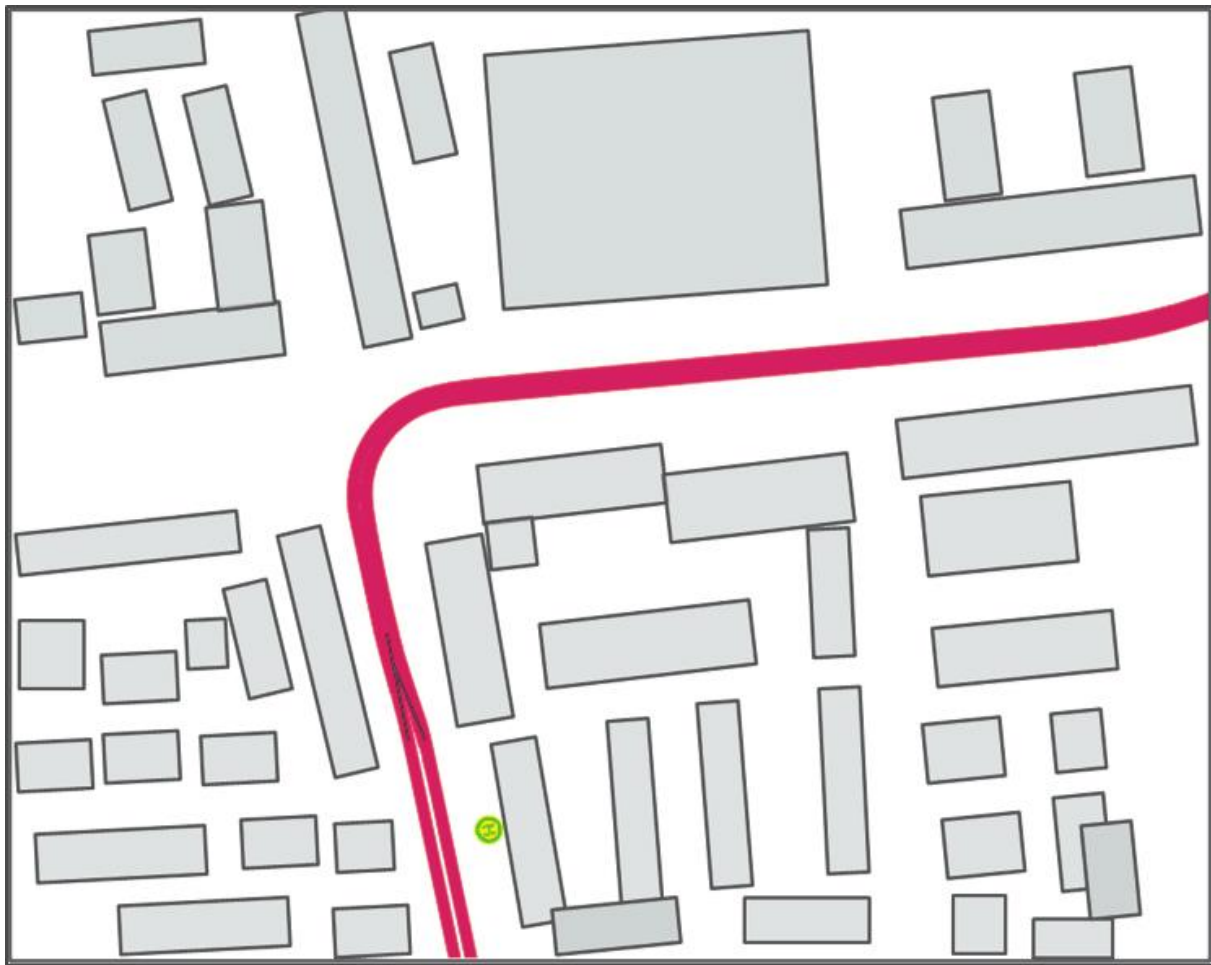
Abkürzung	Beschreibung	Eingabedaten	Quelle
EW	Anzahl betroffene Einwohnenden	311 EW/km	Siehe 6.2.3
L	Umgebungsschallpegel	50 dB(A)	Langfristiges Ziel am Tag siehe Tabelle 5
P _{ohne}	Schallpegel Straßenbahn ohne Maßnahme	70 dB(A)	Allgemein angenommener Schallpegel Straßenbahn
f	Kosten pro Lärmfaktor	74 €/EW Jahr	Nutzenansatz aus der Standardisierte Bewertung 2016

Annahmen für den Nutzen pro Einwohnerin bzw. Einwohner wurden aus der Standardisierten Bewertung, Version 2016, Anhang 1 Datenvorgaben, Kosten- und Wertansätze, S. 15, Tabelle A1-21 Gesamtwirtschaftliche Monetarisierungsansätze entnommen (INTRAPLAN Consult GmbH 2016).

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Als Berechnungsbeispiel dient ein fiktiver Straßenabschnitt im Innenstadtbereich mit einer Straßenbahnstrecke wie Abbildung 77 zeigt. Die Bahnstrecke (dargestellt in rot) ist ein Kilometer lang und enthält als punktuelle Schallquellen eine Kurve sowie eine Weiche. Für die Strecke von einem Kilometer wird mit einer Betroffenheit von 311 Einwohnenden gerechnet. Für die Schallminderung je Maßnahme werden jeweils die Werte wie in Kapitel 5 beschrieben mit ihrer schallmindernden Wirkung angenommen. Die Investition und laufenden Kosten der Maßnahmen werden ebenfalls wie nach Abschnitt 6.1 beschrieben angenommen. Im Folgenden werden lediglich die Ergebnisse der Maßnahmen mit einem positiven Nutzen-Kosten-Verhältnis (dargestellt durch den Nutzen-Kosten-Index NKI) aufgeführt. Die vollständigen Ergebnistabellen befinden sich im Anhang A.1.

Abbildung 77: Lageplanskizze des Straßenabschnitts im Innenstadtbereich für Beispielrechnung



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.4.2.1 Szenario 1 – Mittlerer Umgebungsschall

In Szenario 1 wird von einem mittleren Umgebungsschall von 50 dB ausgegangen. Dieser Wert scheint derzeit zwar sehr niedrig, ist für die Zukunft gesehen als langfristiges Ziel jedoch plausibel. Die Ergebnisse sind nach Kategorie Rollgeräusche (Tabelle 20), Stoßgeräusche (Tabelle 21) und Kurvengeräusche (Tabelle 22) dargestellt.

Tabelle 20: Ergebnisse Szenario 1 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	1,5	~ 300	~ 60	4,80	65
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 21: Ergebnisse Szenario 1 - Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	4,5	~ 800	~ 60	13,07	25
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich	7,5	~ 1.200	~ 750	1,57	200

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 22: Ergebnisse Szenario 1 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
1a	Gleisbogenradius < 50 m	16,5	~ 1.900	~ 150	12,85	25
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 1.900	~ 150	10,02	30
21	Radabsorber am Radreifen	13,5	~ 1.700	~ 650	2,75	115

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.4.2.2 Szenario 2 – Hoher Umgebungsschall

In Szenario 2 wird von einem relativ hohen Umgebungsschall von 75 dB ausgegangen. Damit übersteigt der Umgebungsschall den Straßenbahnlärm um fünf Dezibel. Die Ergebnisse sind nach Kategorie Rollgeräusche (Tabelle 23), Stoßgeräusche (Tabelle 24) und Kurvengeräusche (Tabelle 25) dargestellt.

Tabelle 23: Ergebnisse Szenario 2 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	1,5	~ 100	~ 60	1,63	190

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 24: Ergebnisse Szenario 2 – Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	4,5	~ 200	~ 60	3,74	85

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 25: Ergebnisse Szenario 2 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
1a	Gleisbogenradius < 50 m	16,5	~ 350	~ 150	2,36	135
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 300	~ 150	2,18	145

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.4.2.3 Szenario 3 – Niedriger Umgebungsschall

In Szenario 2 wird von einem relativ niedrigen Umgebungsschall von 20 dB ausgegangen. Die Ergebnisse sind nach Kategorie Rollgeräusche (Tabelle 26), Stoßgeräusche (Tabelle 27) und Kurvengeräusche (Tabelle 28) dargestellt.

Tabelle 26: Ergebnisse Szenario 3 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	1,5	~ 300	~ 60	4,87	65
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 27: Ergebnisse Szenario 3 - Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	4,5	~ 800	~ 60	13,22	25
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich	7,5	~ 1.200	~ 750	1,60	195

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Tabelle 28: Ergebnisse Szenario 3 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 4 pro 100 m)	16,5	~ 2.000	~ 150	13,53	25
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 1.500	~ 150	10,27	30
21	Radabsorber am Radreifen	13,5	~ 1.800	~ 650	2,85	110

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.4.2.4 Sensitivitätsanalyse - Reduktion des Straßenbahnschalls auf 0 dB

In einem vierten Beispiel soll untersucht werden, wie es sich auf das Modell auswirkt, wenn der Straßenbahnschall auf nahezu null Dezibel reduziert wird. Dafür wird als schallmindernde Maßnahme ein Tunnelbauwerk betrachtet. Als Investition werden 60 Mio. Euro angesetzt, das sind die alleinigen Mehrkosten für das Tunnelbauwerk, die Investition für das Gleis bleiben die gleichen. Die Mehrkosten für die Instandhaltung belaufen sich auf etwa 600.000 Euro im Jahr bei einer Lebensdauer von 60 Jahren. Mit einem Diskontzinssatz von 1,7 Prozent ergibt sich ein Annuitätsfaktor von 0,0267. Es ergeben sich somit jährliche Kosten von 2,2 Mio. Euro. Dabei wird von einem mittleren Umgebungslärm von 50 dB(A), wie in Szenario 1, und einer Schallreduktion der Straßenbahn von 70 dB(A) auf 0 dB(A) ausgegangen.

Das Ergebnis in Tabelle 29 zeigt, dass sich der Bau eines Tunnelbauwerks rein aus schallschutztechnischen Gründen erst ab einer Betroffenenanzahl von etwa 308.000 auf einen betrachteten Kilometer Streckenabschnitt sozio-ökonomisch rentiert. Diese Zahl ist sehr hoch und ist praktisch kaum zu erreichen, zeigt aber auch, dass ein Tunnelbauwerk sich im Normalfall nicht ausschließlich über eine Schallminderung rentieren kann, sondern noch viele weitere Faktoren, die mit einberechnet werden müssen, wie zum Beispiel städtebauliche, wirtschaftliche oder ökologische Faktoren. Das Modell gibt, wie hier gezeigt wird, somit auch für ein vergleichbar extremes Beispiel einen plausiblen Wert aus.

Tabelle 29: Ergebnis Sensitivitätsanalyse

Maßnahme	Schall-minderung im Mittel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
Tunnelbauwerk	70	~ 2.200	~ 2.200.000	0,001	~ 308.000

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.2.5 Zusammenfassende Empfehlungen für die sozio-ökonomische Bewertung

Die verschiedenen Maßnahmen wurden in den Ergebnissen nach ihrer Effizienz sortiert. Bei der Betrachtung der Kosten je Dezibel sortiert von kostengünstig zu kostenintensiv und bei der Nutzen-Kosten-Analyse ab wie vielen Betroffenen sich solch eine Maßnahme rentiert, sortiert nach aufsteigender Betroffenheit. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Maßnahmen mit geringen Kosten und einer Rentabilität bereits mit wenigen Betroffenen zuerst durchgeführt werden sollen.

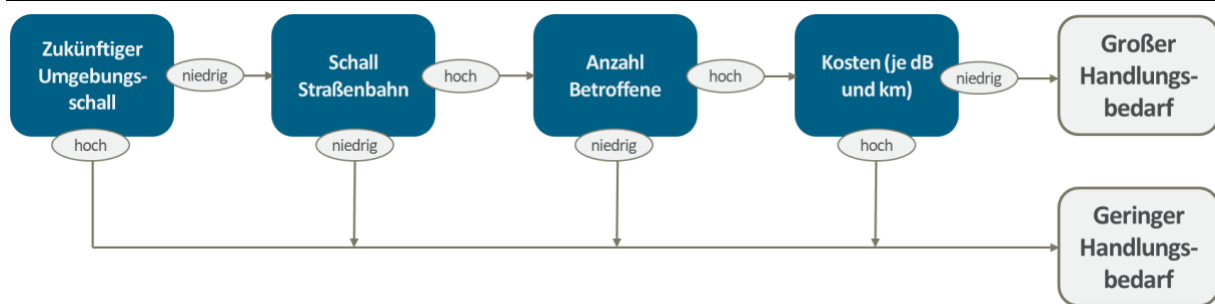
Die drei Szenarien der Nutzen-Kosten-Analyse unterscheiden sich durch einen mittleren, einen hohen und einen niedrigen Umgebungsschall. Je höher der Umgebungsschall, desto geringer ist die Anzahl der Maßnahmen, die sich nach diesem Beispiel rentieren. Das unterstreicht die Aussage, dass die Minderung einer Schallquelle erst dann ins Gewicht fällt und bewusst wahrnehmbar ist, wenn sie sich deutlich von einer weiteren Schallquelle unterscheidet. Ist der Umgebungsschall beispielsweise lauter als der Straßenbahnschall, so kann nicht empfohlen werden, den Straßenbahnschall zu mindern. Liegt der Umgebungsschall aber bereits deutlich darunter, kommen Maßnahmen in Frage.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der oben aufgeführten Szenarien lässt sich feststellen, dass trotz verschiedener Szenarien und Wirkungskategorien für dieses Beispiel meist dieselben Maßnahmen mit einem positiven Nutzen-Kosten-Faktor auftauchen. Bei genauerer Betrachtung aller Ergebnisse, sortiert nach ihrer Reihenfolge lässt sich außerdem feststellen, dass sich die Reihenfolgen der Maßnahmen kaum ändern, auch bei den Ergebnissen der Kosten je Dezibel. Die rentabelsten Maßnahmen sowie die unrentabelsten Maßnahmen bleiben trotz verschiedener Szenarien dieselben. Die Fragestellung, welche der Maßnahmen sich am ehesten rentiert, ist unabhängig von der Anzahl Betroffener. Dafür reicht bereits ein einfacher Vergleich der Kosten je Dezibel.

Für die Fragestellung, ob sich eine Maßnahme überhaupt rentiert, sollte die Anzahl der Betroffenen in jedem Fall hinzugezogen werden. Die kritische Menge hängt von der Maßnahme ab. Die Spanne, wann sich eine Maßnahme lohnt, ist sehr weit gefächert. Bei einer Umsetzung lohnen sich Maßnahmen aus dem unteren Bereich der Spanne bereits sehr schnell, während sich Maßnahmen aus dem oberen Bereich der Spanne ausschließlich aus Gründen einer Lärminderung kaum gesamtwirtschaftlich positiv werden

Zusammengefasst ergeben sich insgesamt vier Schlüsselfaktoren, um schallmindernde Maßnahmen vergleichen zu können: Kosten je Dezibel und Kilometer, Anzahl der Betroffenen, Schallemission der Straßenbahn sowie Umgebungsschall. Eine Maßnahme rentiert sich am ehesten sozio-ökonomisch, je niedriger die Kosten sind, je höher die Betroffenheit, je schallintensiver das bisherige Straßenbahnsystem und je niedriger der Umgebungsschall (Abbildung 78).

Abbildung 78: Schlüsselfaktoren für den Vergleich von schallmindernden Maßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Es ist auf die Untersuchung im Auftrag des UBA vom Juni 2019 zu verweisen, in welcher Finanzierungsmodelle zur Gesamtlärbewertung vorgestellt werden (vgl. Liepert et al. 2019). Nach dieser Studie wird ein Nutzen-Kosten-Indikator basierend auf der VDI 3722 Blatt 2 vorgeschlagen. Dafür wird ein Belastungsindex WEBI (wirkungsbezogener energetischer Belastungsindex) definiert. In das Finanzierungsmodell gehen die Wirksamkeit der Maßnahme bezogen auf die Quelle j im Verhältnis auf die Wirksamkeit der Maßnahme bezogen auf den Gesamtlärm ein.

6.3 Regulatorische und wirtschaftliche Anreize für Lärmvermeidungsmaßnahmen

6.3.1 Zielstellung und Ausgangslage

Die Vermeidung von Lärmemissionen ist in der Prioritätensetzung der Verkehrsunternehmen und ihrer kommunalen Aufgabenträger grundsätzlich nachrangig gegenüber beispielsweise wirtschaftlichen Entscheidungskriterien. Dabei ist bekannt, dass die Aufnahme von Lärm bei den wahrnehmenden Personen Krankheiten und damit mittelbar volkswirtschaftliche Kosten verursachen. Das Risiko für Erkrankungen steigt mit zunehmendem Lärm. Diese „klassische“ umweltpolitische Problematik führt zu der Forderung, dass der Faktor Lärm künftig stärker bei der Bereitstellung öffentlicher Verkehre wie Straßenbahnen berücksichtigt werden muss. Dies könnte auch helfen, die Akzeptanz in der Gesellschaft beispielsweise für die vielerorts geplanten Neubaumaßnahmen zu erhöhen.

Daher braucht es regulatorische und wirtschaftliche Anreize, diesen Aspekt hinreichend zu berücksichtigen. Im Folgenden werden verschiedene Maßnahmen im Hinblick auf die technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen von Straßenbahnverkehren aufgeführt, die eine solche Anreizwirkung entfalten könnten. Zu berücksichtigen ist, dass eine isolierte Betrachtung von Lärminderungsanreizen alleine im Bereich von Straßenbahnverkehren nicht zielführend ist. Ein sinnvolles Anreizmodell müsste vielmehr alle Lärmemittenten im urbanen Raum umfassen, mindestens aber die weiteren Verkehrssegmente. Anders gesagt, ein Anreizmodell für leise Straßenbahnen bringt weder eine Verbesserung der Lärmsituation bei Bussen noch bei den Fahrzeugen des motorisierten Verkehrs. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich vorrangig auf ein isoliertes System im Bereich der Stadt- und Straßenbahnen. Dies stellt den Ausgangspunkt aller weiteren Überlegungen, beispielsweise im Hinblick auf eine Sektor-übergreifende Steuerung dar. Dieses Vorgehen besitzt den Vorteil, in einem eingegrenzten Rahmen konkret auf die Ausgestaltung des Rahmens der Straßenbahnsysteme und seine Marktorganisation eingehen zu können.

Einen Überblick über wie auch immer existierende Anreizsysteme zu gewinnen, war die Zielsetzung einer Umfrage im Rahmen dieses Gutachtens. Dabei wurden Verkehrsunternehmen

zu existierenden Anreizen/Motivlagen befragt, lärm mindernde Maßnahmen durchzuführen. Ergebnis der Umfrage ist, dass zwei Drittel der Antwortenden Beschwerden von Anwohnenden über Lärm als Grund für Maßnahmen sehen. Ebenso viele geben an, die vorgeschriebenen Geräuschimmissionsgrenzwerte der 16. BImSchV sowie die Vorgaben der Kommunen gemäß der EU-Richtlinie zum Umgebungslärm (RL 2002/49/EG) einzuhalten. Hingegen erscheinen Förderanreize in dieser Stichprobe weniger als sinnvolle Instrumente angesehen zu werden. Keinem der antwortenden Verkehrsunternehmen werden von Aufgabenträgerseite aus Lärmvorgaben im Rahmen von Fahrzeugneubeschaffungen oder über Nahverkehrspläne vorgegeben.

Die Ergebnisse dieser Umfrage zeigen exemplarisch, dass der vorhandene Instrumentenkasten keine institutionalisierten Werkzeuge bereithält. Daher werden an dieser Stelle die zur Verfügung stehenden Optionen an Instrumentarien beleuchtet, die für eine Implementierung von Lärm minderungsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Hierzu werden Anreizinstrumente untersucht, die die relevanten Akteurinnen und Akteure dazu bewegen können, Lärmemissionen von Straßenbahnsystemen durch technische Maßnahmen möglichst weit einzudämmen.

Der Begriff der Anreizinstrumente soll zur Einordnung an dieser Stelle weit definiert werden, in dem auch die **regulatorischen Vorgaben** mit betrachtet werden. Diese machen auf der gesetzlichen Ebene klare Vorgaben, die durch die handelnden Unternehmen zwingend auszuführen sind. Die regulatorischen Vorgaben sind etabliert und werden durch verschiedene Zuständigkeiten und Institutionen regelmäßig überprüft. Zuwiderhandeln gegen diese Normen kann zu harten Sanktionsmechanismen gegen Unternehmen (z. B. Entzug der Betriebserlaubnis) bis hin zu strafrechtlichen Maßnahmen gegen handelnde Personen führen.

Im Zentrum stehen an dieser Stelle aber die **wirtschaftlichen Anreizinstrumente**. Diese zeichnen sich in Abgrenzung zu regulatorischen Vorgaben dadurch aus, dass sie eine grundsätzlich freiwillige Aktion bei den beanreizten Institutionen oder Personen auslöst und hierfür ein Belohnungs- und/oder Bestrafungssystem (Bonus-Malus) einsetzt. Die Bandbreite solcher Instrumente ist grundsätzlich sehr weit und reicht von Steuern/Abgaben bis hin zu weichen Faktoren wie Image des Unternehmens. Gleichzeitig gibt es heute wenige Beispiele von ökonomischen Lenkungsinstrumenten.

Damit geht es um die Frage, an welchen Stellen und mit welchen Instrumenten politisches- oder verwaltungsseitiges Handeln intervenieren kann, um Verkehrsunternehmen zu einer Lärm minderung bei Straßenbahnsystemen zu bewegen.

Unter wirtschaftlichen Anreizinstrumenten kann im weiteren Sinne auch die **investive Förderung** verstanden werden, d. h. die Gewährung von nicht rückzahlbaren Zuschüssen. Diese werden im Fall von Fahrzeugen typischerweise von den Ländern gewährt, da der Bund keine Fahrzeuginvestitionen fördert. Bei infrastrukturellen Maßnahmen können sowohl Bund als auch Land Fördergeber sein. Hinzu können regional/anlassbezogen Fördermöglichkeiten durch Programme der Europäischen Union (z. B. EFRE) kommen. Jedenfalls bedingt die investive Förderung kommunaler Verkehrsunternehmen in der Regel einen kommunalen Eigenbeitrag, der von der Stadt oder dem städtischen Verkehrsunternehmen zu tragen ist. Förderprogramme für das Anlagevermögen von Straßenbahnen ermöglichen oft erst die Investitionen, da sich eine investive Förderung in entsprechend geringerer Abschreibungen des Anlagevermögens beim Verkehrsunternehmen übersetzt – und damit eine fortlaufende Verringerung des kommunalen Aufwands darstellt. Speziell das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) verfolgt das

Ansinnen, größere Maßnahmen (über 50 Mio. Euro zuwendungsfähige Kosten) durch eine gezielte Förderung zu ermöglichen.²⁴

Auch wenn Förderprogramme im Weiteren mit als Instrumente betrachtet werden, muss festgehalten werden, dass damit nicht ein wirtschaftlicher Anreiz im engeren Sinne – als Rahmenbedingung für eine das Verhalten des Wirtschaftssubjekts ändernde Maßnahme – verstanden werden muss. De facto führt die investive Förderung bei kommunalen Verkehrsunternehmen der Stadt- und Straßenbahnsysteme nur dazu, dass eine (kommunal getragene) staatliche Förderung durch eine weitere staatliche Förderung (des Landes oder des Bundes) substituiert wird. Daher kann der wirtschaftliche Anreizeffekt der generellen investiven Förderung von Infrastruktur und Fahrzeugen in diesem Marktumfeld grundsätzlich nur als eingeschränkt wirksam erachtet werden. Nun könnte eingewendet werden, dass eine spezielle Förderung, beispielsweise von besonders leisen Fahrzeugkomponenten, wirtschaftliche Anreize für leisere Fahrzeuge setzen würde. Aber auch hier zeigt sich die schwierige Abgrenzung zu regulatorischen Vorgaben: Wenn Bund oder das Land eine solche Förderung tragen, könnte in beiden Fällen alternativ eine regulatorische Vorgabe die wesentlich effektivere, weil bindende Maßnahme sein. Der wirtschaftliche „Anreizeffekt“ bestünde jeweils erneut nur darin, dass die Mehrkosten nicht mehr durch die kommunale Ebene zu tragen wären.

6.3.2 Marktversagen als Begründung für öffentliche Eingriffe

Die Begründung für staatliches Eingreifen, sei es durch regulatorische Vorgaben oder durch wirtschaftliche Anreizinstrumente, ergibt sich aus dem Entstehen von Nutzungskonflikten.²⁵ In der Sprache der Wohlfahrtsökonomie spricht man von externen Effekten, wenn aufgrund der Nutzung eines Gutes oder einer Dienstleistung anderen Personen an einer anderen Stelle Nutzungseinbußen entstehen, ohne dass diese Nutzungseinbußen im Nutzungspreis des Gutes abgebildet sind und den Betroffenen zugeleitet werden können. Hierunter können alle umweltbezogenen Effekte wie auch Lärm verstanden werden.

Übersetzt bedeutet dies, dass der durch die Straßenbahnsysteme entstehende Lärm Anwohnende belastet, diese aber für diese Belastung keinen finanziellen Ausgleich erhalten. Angeführt werden könnte allenfalls ein Komfortvorteil, der in einer vermutlich geringen Entfernung zur nächsten Haltestelle und damit in einer „guten Anbindung“ für die lärmbelasteten Anwohnenden ergibt. Das Fehlen des finanziellen Ausgleichs bedingt ebenso, dass der Nutzungspreis für das Straßenbahnsystem nicht die verursachenden externen Kosten beinhaltet. Dies gilt analog für die Umweltschäden, die der Gebrauch von Verbrennungsmotoren verursacht, z. B. bei Pkw. Zwar kann bei den gemeinwirtschaftlichen Dienstleistungen der Daseinsvorsorge eines Straßenbahnsystems schlecht argumentieren, dass ein fehlender Preisaufschlag zu einer verzerrten, d.h. zu hoher Inanspruchnahme des Gutes führt. Der Preisaufschlag materialisiert sich eher auf der Seite der Lärmgeschädigten, die z. B. höhere gesundheitliche Risiken oder höhere Aufwendungen für Lärmschutzmaßnahmen zu tragen haben.

So wie Marktversagen ein öffentliches Eingreifen notwendig macht, so sehr gilt es nach dem Subsidiaritätsprinzip, dass die Handlung auf der möglichst niedrigen Verwaltungsebene

²⁴ Nach § 2 Abs. 1 Nr. 2 a) GVFG ist der Bau oder Ausbau von Verkehrswegen der Straßenbahnen, Hoch- und Untergrundbahnen sowie Bahnen besonderer Bauart förderfähig, soweit sie dem öffentlichen Personennahverkehr dienen und auf besonderem Bahnkörper geführt werden. Darüber hinaus sind gemäß § 2 Abs. 3 GVFG in den Verdichtungsräumen und Randgebieten der neuen Länder inkl. Berlin auch Erneuerungsinvestitionen förderfähig.

²⁵ Nutzungskonflikt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass beide Bedürfnisse befriedigt werden, ohne dass gegenseitig Einschränkungen entstehen müssen. Würde der Lärm nur im für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbaren Bereich anfallen, entfielen logischerweise der störende Effekt und damit der Nutzungskonflikt.

stattfinden soll. Im Fall des deutschen Organisationsschemas des Straßenbahnmarktes kommt deshalb zu dem geschilderten Marktversagenstatbestand noch ein weiterer wichtiger Aspekt dazu: die enge institutionelle Identität der (kommunalen) Akteurinnen und Akteure, die zu Interessen- und Zielkonflikten führt. So ist zu konstatieren, dass der deutsche Straßenbahnmarkt so organisiert ist, dass die wesentlichen Akteurinnen und Akteure alle grundsätzlich in kommunaler Hand sind:

- ▶ Das kommunale Verkehrsunternehmen (KVU) als die Verkehrsleistung erbringender Lärmverursacher
- ▶ Die kommunale Verwaltung (typischerweise vertreten durch das Beteiligungsdezernat) als (i. d. R. alleiniger) Gesellschafter des kommunalen Verkehrsunternehmens
- ▶ Die kommunale Verwaltung (typischerweise vertreten durch das Verkehrsdezernat) als kommunaler Aufgabenträger und Bestellende/Auftraggebende der Verkehrsleistung
- ▶ Die kommunale Verwaltung generell als Gewährleistungstragende für die ÖPNV-Infrastruktur
- ▶ Die kommunale Verwaltung (typischerweise vertreten durch das Tiefbauamt) und/oder das kommunale Verkehrsunternehmen als Betreibende/Bereitstellende der ÖPNV-Infrastruktur
- ▶ Zusätzlich besitzen kommunale Institutionen oft Verantwortlichkeiten für die technische Regulierung von Infrastruktur/Fahrzeugen

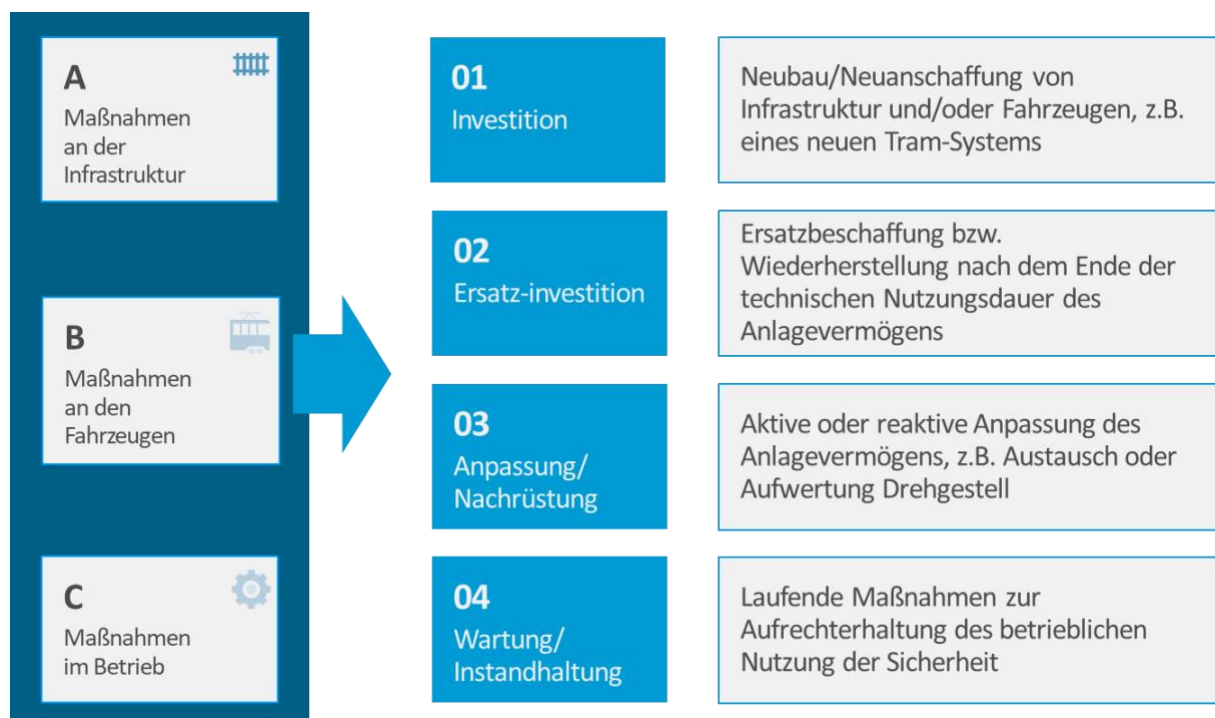
Diese kommunale Mehrfachrolle führt zu Zielkonflikten hinsichtlich einer Strategie für leise Straßenbahnsysteme. Beispielsweise ist der kommunale Aufgabenträger in seiner Rolle als Bestellende und damit Finanzierende öffentlicher Verkehre aus wirtschaftlichen, also kurzfristigen haushälterischen Gründen weniger geneigt, leise Fahrzeuge anzuschaffen, als in ihrer Rolle als Repräsentantin oder Repräsentant für alle, zum Beispiel für lärmgeplagte Bürgerinnen oder Bürger. Gleiches gilt für ihre Rolle als Gewährleistungstragende/r der kommunalen Infrastruktur. Darüber hinaus besteht das „normale“ Spannungs- und Zielkonfliktverhältnis in ihrer Doppelrolle als Auftraggebenden (Aufgabenträger) und Auftragnehmenden (Gesellschaftende des KVU) der öffentlichen Verkehre. Schnell ersichtlich ist, dass eine ökonomische Regulierung von Lärmreduzierungsinstrumenten nicht noch zusätzlich auf dieser Ebene angesiedelt werden sollte.

6.3.3 Systematisierung der Eingriffsmöglichkeiten

Zentrale Fragestellung ist, wo ökonomische Anreizwirkungen entfaltet werden können und wo sich eher regulatorische Maßnahmen anbieten.

Um eine Selektion der Instrumentarien vornehmen zu können, wird die Wertschöpfungskette der Infrastruktur- und Fahrzeugbewirtschaftung in Abbildung 79 schematisch defragmentiert.

Abbildung 79: Wertschöpfungskette Infrastruktur- und Fahrzeugbewirtschaftung



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Der Lebenszyklus von Infrastruktur und Fahrzeugen kann im Hinblick auf lärm mindernde Maßnahmen in die folgenden vier Bereiche des Lebenszyklus eingeteilt werden:

- **Investition (01)** stellt die grundlegende Entscheidung über die Anschaffung oder Herstellung eines Anlagegutes dar. Hier handelt es sich um die Situation, dass eine Stadt/Kommune den Aufbau eines Straßenbahnsystems umsetzt. Im Zuge der Formulierung der Pflichtenhefte bzw. der Ausschreibungsbedingungen können Vorgaben für die Hersteller/Bauunternehmen für ein „leises“ Straßenbahnsystem eingewebt werden. Zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung besteht die Möglichkeit, Infrastruktur und Fahrzeuge hinsichtlich eines leiseren Betriebes optimal einzustimmen.
- **Ersatzinvestition (02)** stellt hingegen den Zeitpunkt einer Erneuerungs- oder Ersatzbeschaffung dar. Das Anlagegut hat seine Nutzungsdauer erreicht und wird erneuert bzw. ausgetauscht, wodurch sich die technischen Eigenschaften ändern (Verbesserung). Auch hier können entsprechende Vorgaben in den Vergabeunterlagen gemacht werden. Allerdings ist es aufgrund einer unterschiedlichen Nutzungsdauer von Infrastruktur und Fahrzeugen unwahrscheinlich, dass der Ersatzinvestitionszeitpunkt zusammenfällt. Daher wird regelmäßig nur eines der Anlagegüter ausgetauscht.
- **Anpassung/Nachrüstung (03)** meint eine im Hinblick auf die Lärmemissionen wesentliche Änderung des Anlagegutes, die über die Maßnahmen der regelmäßigen Instandhaltung hinausgehen. Hierzu können beispielsweise die Nachrüstung von Radabsorbern zählen. Die Maßnahmen der Anpassung/Nachrüstung können damit gezielt für Lärm mindernde Maßnahmen eingesetzt werden, auch wenn der Grund der Anpassung möglicherweise einen anderen Hintergrund hat (z. B. übermäßiger Verschleiß). Eine genaue

zeitliche Zuordnung von Maßnahmen der Anpassung/Nachrüstung ist nicht möglich. Diese werden anlassbezogen nach dem Ermessen des Verkehrsunternehmens (oder Bestellenden) oder infolge einer technischen Notwendigkeit während der gesamten Lebensdauer des Anlagegutes vorgenommen.

- Wartung/Instandhaltung (04) betrifft die regelmäßigen Aufgaben der Instandhaltung. Dabei steht vor allem die Sicherstellung der Betriebssicherheit im Vordergrund. Die Maßnahmen haben jeweils nicht unbedingt einen unmittelbaren Bezug zu der Lärmemission der Systeme. Bei Fahrzeugen ergeben sich die Aufgaben insbesondere aus den Fristenvorgaben der Herstellenden sowie gesetzlichen Vorgaben (bei der Infrastruktur existiert kein entsprechend standardisiertes Vorgehen). Die Regelmäßigkeit der Wartung und Instandhaltung bedingen ebenso ein stetiges Ausüben der Maßnahmen über den gesamten Lebenszyklus.

Neben den durch die Anlagegüter definierten Zeitpunkten von technischen Maßnahmen steht auch die Vergabe eines öffentlichen Dienstleistungsauftrages bzw. Verkehrsvertrages als ein wirksamer Eingriffszeitpunkt zur Verfügung. Die europarechtlichen Vorgaben ermöglichen eine Vertragslaufzeit von bis zu 22,5 Jahren. Im Rahmen einer bei kommunalen Verkehrsunternehmen üblichen In-house-Beauftragung steht der/dem kommunalen Aufgabentragenden frei, detaillierte Vorgaben zu den Lärmwirkungen der Straßenbahnsysteme vorzugeben (vgl. Abbildung 41). Darüber hinaus können Lärmvorgaben neben den Lärmaktionsplänen auch im Nahverkehrsplan formuliert sein, wie der Nahverkehrsplan 2019 – 2023 für Berlin (Land Berlin 2019) zeigt (vgl. Abschnitt 4.6).

Nicht weiter betrachtet werden rein betriebliche Maßnahmen, die systematisch neben wirtschaftlichen Anreizinstrumenten und regulativen Vorgaben zu nennen sind. Dabei können gerade betriebliche Vorgaben einen hohen Wirkungsgrad verursachen. Beispielsweise sei hierbei auf die Möglichkeit der Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung für Straßenbahnsysteme verwiesen. Eine verringerte Geschwindigkeit wirkt unmittelbar dämpfend auf den Umgebungslärm – führt aber gleichzeitig zu signifikanten verkehrlichen (Attraktivitätsverlust des Angebotes) und wirtschaftlichen (Bedienung muss mit mehr Fahrzeugen vorgenommen werden) Nebeneffekten.

6.3.4 Wirkungsgrad der Instrumente

Zunächst wird eine generelle Einschätzung entwickelt, welche Art von Instrumentarien für welche Eingriffszeitpunkte bzw. Wertschöpfungsstufen geeignet sind. Dabei kann nur eine aggregierte Sicht angewandt werden, da Unternehmen unterschiedliche Kalküle und Reaktionsweisen kennen, die für sich genommen möglicherweise sogar eine spezifische Regulierungskonzeption rechtfertigen würden. Vor dem Hintergrund aber, dass keine individuellen Lösungen, sondern systemische Ansätze für Lärminderungsmaßnahmen befördernde Instrumentarien gesucht werden, braucht es eine gewisse Abstraktion.

Zu unterscheiden ist die Wirkung von **regulatorischen Vorgaben** und von **wirtschaftlichen Anreizsystemen**.

- Regulatorische Vorgaben als MUSS-Kriterien besitzen vom Wesen her eine sehr hohe Wirkung, da sie grundsätzlich umgesetzt werden müssen. Ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme greifen für die Anlagegüter häufig – im Übrigen aus wirtschaftlichen Überlegungen motivierte – Bestandsschutzregeln, die sie von der laufenden Anpassung der

Anlagen nach dem Stand der Lärmtechnik befreien. Durch dieses Einfrieren der regulatorischen Vorgaben eignen sich die Eingriffszeitpunkte Anpassung/Nachrüstung (03) sowie Wartung/Instandhaltung (04) weniger für normengeleitete Anreizsysteme. Regulatorische Vorgaben sind aber umso wirkungsvoller bei den Eingriffszeitpunkten der Investition (01) und Ersatzinvestition (02). Hier sind die Mehrkosten von Lärminderung stärker befördernden Komponenten oder Bauweisen anschaulich nicht so groß wie bei einer Situation, wo Bestandsanlagen sehr wesentlich verändert werden müssen. Darüber hinaus bleiben jedoch übergeordnete Anforderungen (z. B. Maßnahmen von Lärmaktionsplänen) an die kommunalen Verwaltungen bestehen, Umgebungslärm zu reduzieren. Diese können aber dazu führen, dass eine regulatorische Vorgabe eine Anpassung oder Nachrüstung der Anlagegüter faktisch notwendig macht. Eine Anwendung von Geräuschvorgaben für bestehende Fahrzeuge ist bei den Eisenbahnen für die Güterwagen eingeführt worden, die die Vorgaben der TSI Fahrzeuge Lärm nicht einhalten, das sind die Wagen mit Graugussklötzen. Die EU hat für diese Wagen im Januar 2019 ein Fahrverbot ab dem 8. Dezember 2024 auf den so genannten „Quieter Routes“ eingeführt. Quieter Routes sind alle Schienenstrecken mit einer Minimallänge von 20 km, auf denen nachts durchschnittlich mehr als zwölf Güterzüge fahren. Fahrverbote für laute Wagen des Bestands wurden auch durch das deutsche Schienenlärmschutzgesetz eingeführt (siehe Abschnitt 4.2.6).

- Wirtschaftliche Anreizsysteme sind keine MUSS-Kriterien, ihre Wirkungsweise zeichnet sich dadurch aus, dass der Adressat, das KVV, eine grundsätzlich freiwillige Aktion durchführt. Wenn die Anreizwirkung richtig kalibriert ist, wird das KVV die von der regulierenden Institution gewünschte Aktion wählen, da diese sie in bestimmter Weise belohnt – bzw. die Wahl einer anderen Aktion eine Verschlechterung nach sich ziehen könnte. Wirtschaftliche Anreizinstrumente konstruieren für die KVV ein ökonomisches Kalkül: Das KVV soll aufgrund des Anreizsystems beispielsweise dazu bewogen werden, höhere Ausgaben (für Lärminderungsmaßnahmen) zu tätigen, um eine Einnahme zu generieren oder eine andere (idealerweise höhere) Ausgabe nicht tätigen zu müssen. Die empirische Forschung zeigt aber auch, dass das Verhalten von nicht ausschließlich ökonomischen Kalkülen geleitet werden (Fehr und Schmidt 2006). Vielmehr werden psychologische und soziale Faktoren in die Entscheidungsfindung von Personen bzw. von Unternehmen als Summe menschlicher Entscheider eingebunden.

Dennoch ist anzunehmen, dass ein wirtschaftlicher Anreiz dann gelingt, wenn das Kalkül Belohnung gegen Mehrausgabe zur Anwendung kommt. Dabei ist bei wirtschaftlichen Anzeilelementen von einer grundsätzlichen Äquivalenz zwischen Belohnung/Bestrafung und den Opportunitätskosten auszugehen. Dies impliziert, dass ein wirtschaftlicher Anreiz größer sein müsste, um ein KVV zu einer Ersatzbeschaffung eines Anlagegutes (Lebenszyklusbereich 02, Tabelle 30) zu bewegen, als wenn es sich „nur“ um eine Maßnahme der laufenden Wartung handelt (Lebenszyklusbereich 04, Tabelle 30). Aufgrund der Kapitalintensität von Neu- oder Ersatzbeschaffungen kann daher davon ausgegangen werden, dass die Nutzung von wirtschaftlichen Anreizinstrumenten nicht für den Lebenszyklusbereich 02 (Tabelle 30) geeignet ist. Hier dürften vorrangig regulatorische Eingriffe zielführend sein.

Dagegen scheinen die Stellschrauben in den Lebenszyklusbereichen 03 und 04 (Tabelle 30) für wirtschaftliche Anreizinstrumente in Betracht zu kommen. Der Fokus auf diese Wertschöpfungsstufen erklärt sich durch die vergleichbar geringen Aufwendungen, die diese verursachen. Hinzu kommt, dass anzunehmen ist, dass in der Anpassung von Komponenten punktgenaue und effiziente Maßnahmen durchgeführt werden können. Damit sind vorwiegend für die Bereiche der Anpassung/Nachrüstung (Lebenszyklusbereich 03, Tabelle 30) und Wartung/Instandhaltung (Lebenszyklusbereich 04, Tabelle 30) geeignete Instrumente zu entwerfen, die das Verkehrsunternehmen in eine wirtschaftliche Abwägung „zwingen“, zwischen Belohnung (im Fall einer Umsetzung von Lärminderungsmaßnahmen) und Nicht-Belohnung oder Bestrafung. Idealerweise wäre dabei die Belohnung in finanziellen Kennziffern in etwa so groß wie die Aufwendungen für die Lärminderungsmaßnahmen zu wählen.

Tabelle 30: Vermuteter Wirkungsgrad der Anreizinstrumente je Wertschöpfungsstufe

Lebenszyklusbereich	Regulatorische Vorgaben	Wirtschaftliche Anreize
01 Investition	Sehr hoher (aber statischer) Wirkungsgrad durch technische Standards	Aufgrund hoher Kapitalintensität der Maßnahmen und fehlender Zahlungsbereitschaften sehr geringer Wirkungsgrad
02 Ersatzinvestition	Hoher (aber statischer) Wirkungsgrad technischer Standards wird ggf. durch unterschiedliche Ersatzzeitpunkte der Assets gemindert	Aufgrund hoher Kapitalintensität der Maßnahmen und fehlender Zahlungsbereitschaften sehr geringer Wirkungsgrad
03 Anpassung/Nachrüstung	Vorgaben können Maßnahmen faktisch notwendig machen. Grundsätzlich gilt aber, dass regulatorischen Vorgaben zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme eingefroren werden	Fokus wirtschaftlicher Anreizmechanismen (hoher technischer Wirkungsgrad; vergleichbar moderate Aufwendungen)
04 Wartung/Instandhaltung	identisch mit Lebenszyklusbereich 03	identisch mit Lebenszyklusbereich 03

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

6.3.5 Beschreibung möglicher wirtschaftlicher Anreizinstrumente

Nachfolgend sind mögliche wirtschaftliche Anreizinstrumente zusammengetragen und kurz beschrieben, die sich ggf. für den hiesigen Betrachtungsgegenstand verwenden ließen. Dabei handelt es sich um eine Sammlung an Instrumentarien, die im Rahmen von projektinternen Workshops entwickelt wurden.

Die im Folgenden aufgeführten Instrumente eint, dass sie auf die Lärmvermeidung von Straßenbahnen abzielt. Demzufolge wurden speziell Instrumente gewählt, die eine spezifische Lenkungswirkung auf Maßnahmen der Lärmvermeidung in diesem Verkehrsegment ausüben. Da die Instrumente oft eine höhere Qualität der Anlagen zum Ziel haben, wirken sie beim Verkehrsunternehmen unmittelbar kostensteigernd. Wegen der isolierten Betrachtung kann der Eindruck entstehen, dass der Fokus spezifisch auf für Straßenbahnen passende Instrumentarien die Empfehlung impliziert, diese Verkehrssysteme alleine zu regulieren. Dies würde aber zu einer komparativen Verteuerung des Verkehrsträgers führen. Dies ist ausdrücklich nicht die Intention.

Die Instrumentarien sollen jeweils als Ausschnitt eines Gesamtinstrumentariums verstanden sein, welches die verschiedenen Lärmquellen, insbesondere des Verkehrslärms, entsprechend ihrer Lärmwirkungen auf die Bevölkerung mit einbezieht. Hierbei sind sowohl die weiteren Verkehrsegmente des öffentlichen Verkehrs (insbesondere Bus) als auch die individuellen Lärmemittenten auf der Straße derart zu berücksichtigen, dass – auch mit Blick auf die über den Lärm hinausgehenden Emissionen im Verkehrsträgervergleich – keine komparativen wirtschaftlichen Nachteile für Straßenbahnen entstehen.

Die folgenden Instrumentarien verkehrsträgerübergreifend, insbesondere unter Einbeziehung des Kraftverkehrs zu konzipieren kann an dieser Stelle nicht vorgenommen werden. Dies sollte im Rahmen eines gesonderten Untersuchungsrahmens geschehen. Gerade bei der Entwicklung von wirtschaftlichen Anreizmodellen ist die Komplexität und horizontale Heterogenität der ÖPNV-Finanzierung eine zentrale Herausforderung, die an eine entsprechend integrierte Betrachtungsweise anzulegen ist.

6.3.5.1 Steuerliche Instrumente

Steuern eignen sich grundsätzlich gut, um Anreizwirkungen auszusenden. Besonders wirkungsvoll dürfte der Einsatz von Verbrauchssteuern sein, da die unmittelbare Nutzung sofort eine wirtschaftliche Auswirkung nach sich zieht, die zu Verhaltensänderungen führen kann – wie die Erfahrungen beispielsweise mit der Alkopopsteuer zeigen. Ein steuerliches Instrument müsste in unserem Fall allerdings an der Emission von Lärm andocken, der nur mittelbar mit dem Gebrauch eines Gutes in Einklang zu bringen ist: Denn für Lärminderung müssen nicht die Nutzende zu einer Verhaltensänderung bewegt werden, sondern das Verkehrsunternehmen.

Für die Exekution einer Steuer sind in unserem Anwendungsfall – unabhängig von ihrer materiellen Begründbarkeit – die Länder und der Bund mögliche Kandidierende. Eine Besteuerung auf kommunaler Ebene scheidet unter logischen Gesichtspunkten aus. Jede Besteuerung besitzt zudem den Nachteil des Non-Affektationsprinzips, das heißt der Steuerertrag kann nicht zweckgebunden einer bestimmten Verwendung (zum Beispiel Umsetzung von Lärminderungsmaßnahmen) zugeführt werden. Insbesondere eine Bundessteuer dürfte deshalb den kommunalen Interessen zuwiderlaufen, da nicht gesichert werden kann, dass die Mittel in den kommunalen Bereich zurückfließen.

Bezogen auf den konkreten Anwendungsfall der Straßenbahnsysteme ist zu bemerken, dass die Adressatin bzw. der Adressat des Instrumentariums auf der öffentlichen Ebene angesiedelt ist, jedenfalls so lange von kommunalen Verkehrsunternehmen auszugehen ist. Daher ist aus ökonomischer Sicht zu hinterfragen, ob ein steuerliches auch ein sachgerechtes Instrument sein kann. Schließlich ist anzunehmen, dass es auf Ebene von staatlichem- oder Verwaltungshandeln nicht notwendig ist, über ein solches Instrumentarium eine marktgerechte Umgebung zu simulieren.

Eine mögliche Ausgestaltung eines steuerlichen Instruments kann in einer Besteuerung von KVV als Lärmproduzenten gesehen werden. Die Steuerschuld könnte abhängig vom Umfang der Lärmemissionen der Straßenbahnen (**Lärmsteuer**) auszugestalten sein. Je höher die Lärmemissionen eines Straßenbahnsystems, desto höher wäre der fällige Steuerbetrag.

Die Lärmsteuer könnte einerseits zwar als Aufschlag auf die Gewerbe- oder Körperschaftssteuer angedacht sein. Jedoch scheiden Ertragssteuern als Instrument im gemeinwirtschaftlichen ÖPNV systematisch aus.

Damit verbliebe eine neu zu konzipierende Lärmsteuer des Bundes oder der Länder als Möglichkeit. Gegen die Länderlösung spräche, dass erstens kein bundesweiter, systemischer Ansatz mit diesem Instrument verfolgt werden kann. Zweitens ist zu beachten, dass eine

Besteuerung nur dann sinnvoll und möglicherweise zulässig ist, wenn mehr als ein KVV mit Straßenbahntechnik im Land besteuert werden kann: Derzeit erfüllen nur elf Länder diese Voraussetzung.

Eine sinnvolle und anreizkompatible Lärmsteuer müsste jedoch einen verkehrsträgerübergreifenden Ansatz wählen. Das bedeutet, dass neben den Straßenbahnsystemen mindestens auch die weiteren Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, idealerweise auch der motorisierte Individualverkehr zu berücksichtigen wären. Gleichzeitig wäre zu erwägen, neben dem Lärm auch die weiteren Umweltwirkungen (Schadstoffemissionen) einzubeziehen. Unterbliebe der verkehrsträgerübergreifende Ansatz, würde die Einführung einer reinen Lärmsteuer für die Straßenbahnsysteme diese im Verkehrsträgervergleich zusätzlich belasten.

Ein anderer Ansatz ist, das steuerliche Instrument bei den Anwohnenden anzusetzen, die dem Lärm ausgesetzt sind. Die Grundsteuer wirkt sowohl auf Eigenheimbesitzende als auch auf Mietende, da die Grundsteuer in der Regel auf die Mietende umgelegt wird. Konzeptionell ist dann eine Minderung der Steuerlast für Personen zu konzipieren, die Lärm ausgesetzt sind. Dabei kann der Anreizeffekt bei einer Entlastung der Lärmkonsumenten nicht direkt darauf abzielen, dass das KVV Maßnahmen zur Lärminderung umsetzt. Vielmehr liegt die Anreizwirkung darin begründet, dass die Stadt, der das Grundsteueraufkommen zusteht, eine Minderung des Aufkommens hinnehmen muss und deshalb stärker auf sein Verkehrsunternehmen einwirkt.

Die **Differenzierung der Grundsteuer** wurde bereits verschiedentlich diskutiert, wenn es um die Schaffung neuer ÖPNV-Finanzierungsinstrumente geht (Ehrmann et al. 2013; Hamburg Institut Research gGmbH 2015; Gies et al. 2016). Dabei bestand die Grundüberlegung darin, den finanziellen Mehrwert von Immobilien, die durch eine gute Verkehrsanbindung an Wert gewinnen, teilweise zurückzuführen, um das gemeinwirtschaftliche Angebot mit zu finanzieren.

Eine nach der Lärmimmission von Straßenbahn- und weiteren Verkehrssystemen differenzierte Grundsteuer müsste konzeptionell in der Lage sein,

- ▶ eine zur Verkehrslärmmessung gerichtsfeste Methodik zu entwickeln,
- ▶ die Berechnungsgrundlage der Grundsteuer sehr fein zu differenzieren und
- ▶ eine mindestens jährliche Anpassung der Steuererhebung zuzulassen, um Änderungen der Lärmimmissionen abzubilden (z. B. infolge von Lärminderungsmaßnahmen, Anpassungen des Betriebs).

Angesichts der jahrzehntelangen, bisher ergebnislosen, Diskussion über eine Grundsteuerreform fehlt jedoch die Zuversicht, dass ein solches Instrumentarium gesetzlich implementiert werden kann. Darüber hinaus ist zu konstatieren, dass die Anreizwirkung auf die kommunale Seite sehr schwach ist. Es ist kaum davon auszugehen, dass ein geringeres Grundsteueraufkommen allein dazu führen wird, dass die Stadt Lärminderungsmaßnahmen anstößt. Daher ist Skepsis angebracht, was die Nutzbarkeit für die hiesigen Zwecke betrifft. Darüber hinaus gilt auch in diesem Fall, dass wenn überhaupt nur dann eine wirksame Anreizsetzung unterstellt werden kann, wenn eine verkehrsträgerübergreifende Betrachtung von Lärmemissionen einfließen würde.

Hinzu kommt: Der Vorschlag der Bundesregierung zur Grundsteuerreform vom November 2018 für ein wertabhängiges Modell sieht ein Ertragswertverfahren als Steuermessgröße vor, dass die Nettokaltmieten zur Grundlage nimmt: je höher die Miete, desto höher die Grundsteuer

(Bundesministerium der Finanzen 2018). Eine Umsetzung dieses Vorschlags würde den oben geschilderten Anreizeffekt nebenbei mit umsetzen, wenn davon auszugehen ist, dass die Mieten in besonders lärmbelasteten Straßen ceteris paribus niedriger sind.

6.3.5.2 Transparenz

Ein häufig verwendetes und gleichzeitig einfaches Anzeilelement ist die Herstellung einer öffentlichen Vergleichsbasis. Die Grundidee für dieses Instrument, wiederkehrend die Lärmemissionen der unterschiedlichen Straßenbahnsysteme zu messen und die Ergebnisse zu veröffentlichen. Indem mit dem Lärm der „Output“ für leisere Straßenbahnsysteme gemessen wird, ergibt sich eine leichte Übertragbarkeit auf die Effizienz der hierfür angestrebten Maßnahmen. In Städten, in denen eine Verschlechterung und/oder ein im Bundesvergleich schlechtes Ergebnis vorliegt, könnte eine politische Diskussion entfacht werden, die in verstärkten Anstrengungen für Lärminderung mündet.

Das Benchmarking bzw. die öffentliche Darlegung von Daten und Datentrends sind gerade für den Bereich von Umweltwirkungen als Instrument bekannt, um politisches Handeln zu befördern. Als aktuelles Beispiel können die NO_x-Emissionen und deren Übersetzung in unterschiedliche Maßnahmenpakete auf kommunaler Ebene genannt werden. Dabei sind im Bereich des öffentlichen Verkehrs auch wiederkehrende quantitative (zum Beispiel Vergleich der Ticketpreise) als auch qualitative (zum Beispiel Nutzendenzufriedenheit) Instrumente bekannt.

Ein Benchmarking des Lärms würde voraussetzen, dass

- ▶ eine einheitliche und eindeutige Messmethode definiert wird (bisher werden vorrangig pauschalisierte Messmethoden angesetzt) – vergleiche hierzu auch den Abschnitt statische und dynamische Förderung
- ▶ eine neutrale Instanz, welche die Messungen durchführt und publiziert.

Eine transparente, z. B. jährliche Veröffentlichung der Lärmemissionen und deren Veränderung zu den Vorjahren kann das Image eines kommunalen Verkehrsunternehmens und der Stadt in der Öffentlichkeit beeinflussen. So könnten besondere Erfolge bei der Lärmreduzierung als Marketing genutzt werden, zum Beispiel leiseste Stadt oder leisestes Straßenbahnsystem. Dies ist zwar kein harter ökonomischer Anreiz, jedoch ist deren Wirkung gerade auf Managemententscheidungen nicht zu unterschätzen. Darüber hinaus böte es den kommunalen Aufgabenträgern die Möglichkeit, dem KVV bzw. dem Vorstand messbare Ziele aufzugeben, beispielsweise in Zielvereinbarungen. Auch hier könnte die Berücksichtigung der Lärmemissionen der gesamten Flotte des KVV im Linienverkehr einen umfassenderen Ansatz darstellen.

6.3.5.3 Förderung

Eine Alternative besteht in der Förderung von leisen Anlagenkomponenten (**Investive Förderprogramme**). Hierzu müsste jeweils voraussichtlich auf Landesebene ein Förderinstrumentarium eingeführt, oder bestehende Förderinstrumentarien um den Förderzweck der Lärminderung ergänzt werden. Dann könnte die Förderung die spezifischen Mehraufwendungen für lärm mindernde Komponenten anteilig bezuschussen. Zum Zeitpunkt der Neu- oder Ersatzinvestition sind Förderinstrumente bereits etabliert. Die Förderung führt zu einer Verminderung der Aufwendungen auf der Ebene der kommunalen Unternehmen.

Als förderfähige Ausgaben werden in den einschlägigen Richtlinien sehr generelle Angaben wie beispielsweise „Bau oder Ausbau von Straßenbahntrassen“ oder die „Beschaffung von

Straßenbahnfahrzeugen“ genannt. Hierunter können auch besonders leise Trassen oder Fahrzeuge subsumiert sein. Dennoch wäre zu empfehlen, das Förderziel der Lärminderung ergänzend aufzunehmen. Dabei wird die Förderung üblicherweise vor allem für die Neu- oder Ersatzinvestition gewährt. Hingegen üblicherweise nicht förderfähig sind investive Aufwendungen für eine Nachrüstung am Fahrweg oder am Fahrzeug.

Unter **statischer Förderung** ist ein Förderprogramm zu verstehen, das vom Bund für die Verbesserung der Lärmemissionen von Straßenbahnsystemen aufgelegt wird. Die Statik der Förderung bezieht sich auf gleichbleibende Kriterien der Förderung bzw. unter Zugrundelegung einer statischen Verteilung der Mittel.

Das Förderprogramm soll keine konkreten Maßnahmen (Projektförderung) fördern, sondern den Verkehrsunternehmen Budgets zukommen lassen, die diese für Lärminderungsmaßnahmen im Straßenbahnsystem verausgaben (Nachweisführung über Verwendungsnachweis). Im Vergleich zu den heutigen Förderprogrammen, die jeweils nur auf investive Förderungen abstellen, würde in diesem Fall ermöglicht, dass die Verkehrsunternehmen neben investiven auch konsumtive, d.h. nicht aktivierungsfähige Aufwendungen finanzieren können. Dies versetzt die KVV in die Lage, Lärminderungsmaßnahmen flexibel und unabhängig von der Aufwandsart zu planen und auszuführen – mit dem Ziel, eine möglichst effiziente Umsetzung zu erreichen. Idealerweise würde den Verkehrsunternehmen zugestanden werden, die Fördermittel über einen begrenzten Zeitraum anzusparen (mehrere Jahre), um kapitalintensive nicht-investive Anpassungen vornehmen zu können. Normalerweise sieht das Haushaltsrecht so etwas bisher aber nicht vor. In dem geschilderten Rahmen stellt das Förderprogramm eine Erhöhung des Budgets für die KVV dar, Lärminderungsmaßnahmen zu finanzieren.

Für eine solche Förderung durch den Bund sind die gesetzlichen Voraussetzungen zu schaffen, da dieser bisher keine Finanzierungszuständigkeit für diesen Bereich besitzt. Eine Blaupause für eine mögliche Lösung könnte die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) zwischen dem Bund und den bundeseigenen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) sein. Die über die LuFV ausgereichten Zuweisungen des Bundes können eigenverantwortlich für die vorgesehene Verwendung eingesetzt werden, wobei die EIU sich im Gegenzug zu Eigenanteilen an der Finanzierung verpflichten. Angemerkt sei, dass die im Rahmen der LuFV zugewiesenen Mittel für Erneuerungsinvestitionen an bundeseigenen Schienenwegen vorgesehen sind und nur an bundeseigene Unternehmen ausgereicht werden. Eine Finanzierung von anderen Unternehmen kann unter den Tatbestand einer staatlichen Beihilfe nach Art. 107 AEUV fallen.

Als Weiterentwicklung der statischen Förderung nimmt die **dynamische Förderung** das Instrumentarium der Transparenz mit auf. So könnten die objektiven Ergebnisse des Benchmarkings die Wirksamkeit der durch die Verkehrsunternehmen finanzierten Maßnahmen als Output-Kriterium bewerten. Darüber hinaus könnte das Ergebnis des Benchmarkings auch einen Einfluss auf die Höhe der Förderung implizieren: Je besser ein Verkehrsunternehmen eine Lärminderung umsetzt, desto besser stellt es sich wirtschaftlich.

Um den Anreiz auf die Verkehrsunternehmen zu verstärken, möglichst effiziente Lärminderungsstrategien umzusetzen, könnte das Förderprogramm also dynamisiert werden. Kern der Anreizsetzung ist die Variabilität der Zuweisungshöhe bei gegebenem Budget. Dabei reicht es aus, nur einen Teil der Zuweisung variabel zu halten. Der Großteil könnte an weitgehend festen Kriterien gebunden sein (z. B. Einwohnerzahl, Fläche, Gleis-km).

Der Anreiz für die KVV entfaltet sich darin, dass nicht nur die eigenen Anstrengungen die Höhe der (Veränderung der) Zuweisungen aus dem Förderprogramm determinieren – sondern auch der relative Erfolg der Lärminderungsmaßnahmen im Vergleich zu den

Lärmminderungserfolgen aller anderen Betreibenden (vgl. Abbildung 80). Dadurch wird eine positive Rivalität unter den Straßenbahnbetreibenden implementiert, deren Zielsetzung für jedes KVV darin besteht, durch einen möglichst effizienten Einsatz der Mittel für die Lärmminderung möglichst *viele* Fördermittel zu bekommen. Die Tatsache, dass dies bedeutet, dass gleichzeitig andere KVV *weniger* Fördermittel erhalten, wird den Anreizeffekt nur verstärken.

Abbildung 80: Ablaufschema einer dynamischen Lärmminderungsförderung



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll Deutschland GmbH)

Das skizzierte dynamische Lärmfördersystem setzt auf verschiedenen Voraussetzungen an:

- die Schaffung der rechtlichen Voraussetzungen für die Einrichtung eines Bundesförderprogramms, das KVV begünstigt (Länderaufgabe) und gleichzeitig konsumtive Aufwendungen finanzieren kann,
- einheitliche und eindeutige „gerichts feste“ Messmethoden des Lärmbenchmarkings und
- eine nachvollziehbare und sachgerechte Methodik für die Anpassung der Verteilung der Fördermittel in Abhängigkeit der Ergebnisse des Lärmbenchmarkings.

Ein Praxisbeispiel der dynamischen Förderung ist die Schlüsselbildung der ÖPNV-Finanzierung in der Verordnung über die Finanzierung des übrigen öffentlichen Personennahverkehrs im Land Brandenburg (ÖPNVFV). Über die ÖPNVFV hat das Land Brandenburg mehrere ehemalige Finanzierungsinstrumente in einem Budget gebündelt und reicht diese als pauschale Zuweisungen an die kommunalen Aufgabenträger für die Finanzierung des straßengebundenen ÖPNV weiter.

Die Mittel werden nach transparenten Indikatoren verteilt. Dabei wird unterteilt in Strukturkriterien (z. B. Fläche), Aufwandskriterien (z. B. Fahrplanangebot; Einsatz kommunaler Eigenmittel für den ÖPNV) und Erfolgskriterien (Veränderung der Nutzendenzahlen).

Mit der ÖPNVfV wurde ein starker Realisierungswettbewerb unter den Aufgabenträgern induziert. Die kommunalen Aufgabenträger werden damit beanreizt, möglichst viel Angebot für gegebenen Aufwand bereit zu stellen – und gleichzeitig möglichst viel Nachfrage zu generieren. Als Ergebnis konnte beobachtet werden, dass im Land Brandenburg von den Aufgabenträgern unterschiedliche Strategien eingesetzt wurden, um den Mittelzufluss zu maximieren. Prominentestes Beispiel ist der PlusBus (vertaktetes Grundnetz), der häufig durch Bedarfsverkehre komplementiert wird, z. B. in Prignitz, Uckermark oder Spree-Neiße.

Insgesamt wird von einer hohen Wirksamkeit des Anreizinstruments ausgegangen. Mit leicht rückläufigem öffentlichen Finanzmitteleinsatz konnte, landesweit gesehen, das straßengebundene ÖPNV-Angebot stabil gehalten – und die Nachfrage trotz der demografischen Entwicklung sogar erhöht werden.

6.3.5.4 Öffentlicher Dienstleistungsauftrag (ÖDA)

Schließlich kann der öffentliche Dienstleistungsauftrag (ÖDA) als zentrales Instrument des kommunalen ÖPNV-Aufgabenträgers Träger für die Verankerung einer politischen Zielsetzung für leise öffentliche Verkehrssysteme darstellen. Der ÖDA bzw. Verkehrsvertrag regelt Leistungen und Ausgleichsansprüche im Binnenverhältnis zwischen kommunaler Bestellerin oder Besteller und KVV nach Verordnung (EG) 1370/2007. Im ÖDA steht es der Stadt oder dem Landkreis frei, qualitative Vorgaben an die Leistungserbringung zu formulieren – wie z. B. eine Zielvorgabe für die Lärmemission des öffentlichen Verkehrssystems. Die Anreizwirkung besteht damit auf Basis einer vertraglichen Vereinbarung. Darüber hinaus können die lärmbedingten Vorgaben ebenfalls im Nahverkehrsplan (NVP) als zentralem Planungselement beschrieben sein.

Dies alleine ist noch keine Voraussetzung dafür, dass der ÖDA ein wirksames Mittel ist, da es der/dem kommunalen Bestellenden grundsätzlich freisteht, wie eng die Vorgaben umgesetzt werden (vgl. Abschnitt 6.3.2). Die oben beschriebene enge institutionelle Identität der kommunalen Akteurinnen und Akteure (Besteller und KVV) spricht tendenziell dafür, dass die Entscheidung für/gegen Lärminderungsziele nach betriebswirtschaftlichem Kalkül (d. h. negativ) entschieden wird.

Jedoch ist davon auszugehen, dass entsprechende Maßnahmen ergriffen werden – wenn eine starke politische Übereinkunft für ein leiseres öffentliches Verkehrssystem besteht. In diesem Fall, wenn der politische Wille z. B. eine klare Lärminderungsvorgabe formuliert, kann der ÖDA als Anreizinstrumentarium sehr wirkungsvoll, weil justiziabel sein. Er wirkt dann wie eine vertragliche Obligation, die eine bestellende Institution im Rahmen eines offenen Vergabeverfahrens an nicht-verbundene Verkehrsunternehmen stellen würde (was im schienengebundenen Stadtverkehr aber nicht Marktrealität ist). Der Besteller kann die Zielrichtung zusätzlich durch entsprechende Vereinbarungen mit den KVV-Vorständen verankern.

Zu beachten ist, dass die Infrastrukturbereitstellung nicht Gegenstand von öffentlichen Dienstleistungsaufträgen der Verordnung (EG) 1370/2007 ist. Dort ist „nur“ die Erbringung der Verkehrsleistung Gegenstand. Ein Aufgreifen im NVP oder im ÖDA ist gleichwohl möglich, wenngleich jeweils die lokalen Gegebenheiten der Infrastrukturbereitstellung und -verantwortlichkeiten zu beachten sind (Beispiele: Hannover, Görlitz).

Die Ausarbeitung/Verhandlung des NVP und des ÖDA sind eindeutig kommunale Aufgaben. Daher stellen diese Instrumente grundsätzlich keinen systemischen (bundesweiten) Charakter

dar, sondern müssen jeweils auf lokaler Ebene veranlasst werden. Die/der Bundesgesetzgebende könnte aber ihren/seinen Stellenwert im PBefG ausbauen und z. B. die Formulierung von verbindlichen Lärminderungszielen vorgeben.

6.3.6 Lösungsansätze für Anreize zur Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen

Wie oben bereits erwähnt herrscht im Bereich des ÖPNV mit Straßenbahnen in Deutschland auf Betreibendenseite im Grunde kein Wettbewerb. In der Regel werden die städtischen oder kommunalen Verkehrsunternehmen durch die jeweiligen Aufgabenträger direkt mit der Erbringung der Verkehrsleistung betraut. Es handelt sich also um ein (natürliches) Monopol. Die genauen Rahmenbedingungen dieser Monopole wurden in den vorherigen Abschnitten dargestellt.

Den größten Handlungsspielraum halten die Aufgabenträger inne. Dies sind im ÖPNV die kreisfreien Städte, Kreise, Zweckverbände, Verkehrsverbünde oder teilweise die Länder. Die Aufgabenträger können Kriterien in unterschiedlichen Verträgen und Plänen definieren. Diese Kriterien können unter anderem im Nahverkehrsplan, in den Ausschreibungsdokumenten oder im finalen öffentlichen Dienstleistungsvertrag festgehalten werden.

Es hat sich herausgestellt, dass die Aufgabenträger den vorhandenen Spielraum zur Lärminderung im Vergabeverfahren für öffentliche Dienstleistungsaufträge nicht immer nutzen, um (lärmspezifische) Vergabekriterien zu definieren. Eine Ursache kann darin liegen, dass Lärminderungsmaßnahmen kostenintensiv sind und in der Regel von Seiten des Aufgabenträgers direkt oder indirekt auch zu tragen sind.

Auf der anderen Seite stehen insbesondere die Städte im Attraktivitätswettbewerb untereinander. Lebenswertigkeit ist ein Standortvorteil, zu dem auch eine Minimierung der Lärmemissionen gehört. Folglich sollten die Aufgabenträger im Straßenbereich ein ureigenes Interesse in der Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen besitzen, ohne Straßenbahnen im Wettbewerb der Verkehrssysteme untereinander zu benachteiligen.

Um dieses zu beanreizen bietet es sich an, die Aufgabenträger diesbezüglich zu unterstützen, lärmreduzierende Maßnahme zu definieren und von den kommunalen Verkehrsunternehmen möglichst kostenneutral umsetzen zu lassen.

7 Monitoring

7.1 Grundsätzliche Anmerkungen zur Umsetzung eines Monitoringsystems

Nach der 16. BImSchV sind die Schallemissionen und -immissionen für Fahrzeuge und Fahrwege in durchschnittlichem Zustand zu berechnen. Wie im Kapitel 5 gezeigt worden ist, führt der Betrieb auf den Strecken mit der Zeit zu einer Abweichung von diesem Zustand. Dies gilt sowohl für die Fahrzeuge selber als auch für den Fahrweg. Es ist daher Aufgabe des Verkehrsunternehmens, diese Abweichungen zu erkennen und den Ausgangszustand immer wieder herzustellen bzw. zu bewahren. Hierzu ist eine ständige akustische Überwachung von Fahrzeug und Fahrweg erforderlich. Einige grundsätzliche Möglichkeiten zur akustischen bzw. schwingungstechnischen Überwachung von Fahrzeug und Fahrweg wurden u. a. in einem Gutachten zur Entwicklung einer Prüfstrecke für die Geräuschttypprüfung von Schienenfahrzeugen (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2004, S. 20ff.) und in einem Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Lärminderung im innerstädtischen Schienenpersonennahverkehr (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, S. 118ff.) vorgestellt. Einige dieser Vorschläge werden im Folgenden weiter konkretisiert.

Zur Überwachung der Schallemissionen von Straßenbahnen ist zu unterscheiden hinsichtlich der emittierten Geräusche auf der freien Strecke mit Radien größer 200 m und denen die in (engen) Gleisbögen bzw. in Kreuzungen und Weichen auftreten. Je nach lokalen Randbedingungen und vorhandenen Minderungsmaßnahmen können hier jeweils sehr unterschiedliche Geräusche auftreten. In den vorangegangenen Kapiteln 2 und 5 wurden diese ausführlich beschrieben.

Grundsätzlich wirken sich Minderungsmaßnahmen in den Bereichen von Fahrzeug und Fahrweg unmittelbar auf die Schallemissionen und somit auch auf die Schallimmissionen aus. Im Innenstadtbereich kann die Schallausbreitung infolge von möglichen Mehrfachreflexionen an den Straßenfahrflächen und Gebäuden sehr unterschiedlich sein. Daher ist eine allgemeine Aussage über die Wirkung von Schallminderungsmaßnahmen an den Immissionsorten nicht bzw. nur bedingt möglich.

Für Geräusche, die von einer Straßenbahn im Innenstadtbereich auf einer weitgehend geraden freien Strecke verursacht werden, gilt, dass eine messtechnische Erfassung der hiervon verursachten Schallemissionen und Schallimmissionen in der Regel nur bedingt möglich ist. Im innerstädtischen Bereich sind oft zahlreiche weitere Schallquellen, insbesondere durch den Individualverkehr, vorhanden. Dies macht eine Selektion der allein von den Straßenbahnen verursachten Fahrgeräusche (Roll- und Antriebsgeräusche) sehr schwierig bzw. nahezu unmöglich. Anders verhält es sich mit den besonderen Geräuschen in engen Gleisbögen (Quietschen, Zischen) und Kreuzungen/Weichen (Schlag- und Rumpelgeräusche). Solche Geräusche sind in der Regel gekennzeichnet durch hohe Schallpegel in bestimmten, quellenbezogenen Frequenzbereichen. Sie heben sich somit aus den allgemeinen Umgebungsgeräuschen heraus. Die Wirkung von Maßnahmen zur Minderung dieser Geräusche kann sowohl im Nahbereich der Quellen als auch an den Immissionsorten vor den Gebäuden erfasst werden.

Schallmessungen im Nahbereich eines Gleises bieten den großen Vorteil, dass hier ein direkter Bezug zur Vorbeifahrt relativ einfach herzustellen ist. Dies gilt für alle oben genannten Geräusche. Solche Schallmessungen bedingen jedoch eine Zusammenarbeit mit den jeweiligen Verkehrsunternehmen, da durch die Nähe zum Gleis eventuell der Betrieb berührt wird. In der Regel sind die Ergebnisse von Schallmessungen nahe an der Quelle immer eindeutiger zu

interpretieren, daher konzentrieren sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf diesen Bereich.

Zur akustischen Überwachung der Fahrzeuge wurde vom DIN die Norm 38452-1 zur Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen erstellt. In diesem Dokument, das derzeit (Oktober 2020) als Entwurf vorliegt (E DIN 38452-1)²⁶, werden für drei verschiedene Qualitätsstufen Verfahren zur Erfassung und Auswertung von Schalldaten an der Strecke beschrieben. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, dass vor Ort unterschiedliche Daten für die Fahrzeuge und für die Gleise zu erheben sind. Als Messpunkt wird in dem Normentwurf ein Punkt in 7,5 m Entfernung von Gleismitte und in 1,2 m Höhe über Schienenoberkante genannt. Dieser Messpunkt entspricht dem Emissionspunkt nach DIN EN ISO 3095. Wie bereits dargestellt worden ist, beeinflussen vor allem der Fahrzeugzustand, die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Gleiszustand und die Streckenführung die Schallemissionen.

Für die Anwendung dieses Normentwurfs sind für Straßenbahnen folgende Punkte zu beachten:

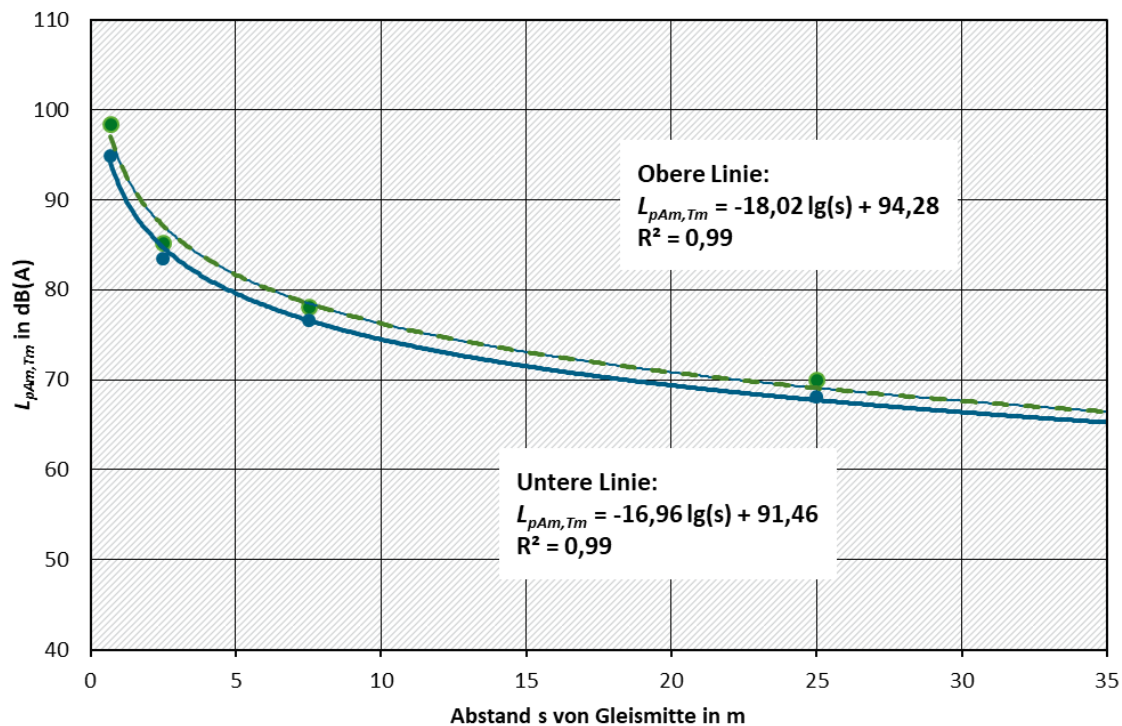
- ▶ Uneingeschränkt kann sie auf unabhängigen Bahnkörpern angewendet werden.
- ▶ Bei besonderen Bahnkörpern ist eine Anwendung eingeschränkt möglich. Hier sind insbesondere die Schallemissionen der anderen Verkehrsteilnehmenden zu berücksichtigen.
- ▶ Bei straßenbündigen Bahnkörpern ist nach der Lage der Gleise im Straßenraum zu unterscheiden: Seitliche Lage oder mittige Lage.
 - Bei der Lage des Bahnkörpers seitlich der Fahrbahn ist kein Straßenverkehr zwischen einem Gleis und dem Schallmesspunkt möglich, sodass die Schallpegelmessung durch den Individualverkehr nicht oder nur geringfügig beeinflusst wird.
 - Bei mittiger Lage ist Straßenverkehr auf beiden Seiten der Gleise vorhanden. In diesem Fall ist eine Schallmessung in der Regel nicht sinnvoll, da hier die Geräusche durch den motorisierten Individualverkehr eine eindeutige Messung der Straßenbahngeräusche nicht zulassen. In einer Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr wird z. B. über Schallmessungen bei mittiger Gleisführung im Bereich einer wenig befahrenen Straßeneinmündung berichtet (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2010). Eine Beeinflussung der Schallpegel durch den Individualverkehr ist jedoch auch hier in der Regel nicht vollständig zu unterdrücken. Nur unter Überwachung durch das Messpersonal können gestörte Signale weitgehend ausgeblendet werden.

Grundsätzlich gilt: Je geringer der Abstand zwischen dem Gleis und dem Mikrofon ist, umso geringer ist hierbei der mögliche Einfluss des Individualverkehrs. Der sonst übliche Abstand von 7,5 m (vgl. E DIN 38452-1, S. 20) könnte in solchen Situationen auch unterschritten werden. Ein geringerer Abstand bietet außerdem den Vorteil, dass einzelne Quellen eindeutiger detektiert werden können. Je nach Aufgabenstellung und lokalen Randbedingungen ist der Abstand festzulegen. Hierzu zeigt Abbildung 81 den Zusammenhang zwischen dem Schienenkörperschall, gemessen am Schienenkopf in y-Richtung, und den Schallemissionen in verschiedenen Abständen zur Gleismitte. Alle Messwerte sind A-bewertete Mittelungspegel. Die Messwerte aus mehreren Vorbeifahrermessungen einer Straßenbahn auf einem Betonschwellengleis wurden statistisch ausgewertet. Dargestellt ist die Standardabweichung vom Mittelwert nach oben und

²⁶ Voraussichtlich wird die Norm noch im Laufe des Jahres 2020 vom DIN als Weißdruck veröffentlicht.

nach unten. Der Abstand für den Schienenkörperschall wurde auf 0,7 (gleich halber Schienenabstand eines Gleises) festgelegt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt für beide Linien 0,99. Somit kann beim Monitoring – je nach lokalen Randbedingungen – der Messort für das Mikrofon in unterschiedlichen Abständen zum Gleis angeordnet werden. Eine „Kalibrierung“ der Ausbreitungssituation sollte im Vorfeld durch eine Anzahl Vorbeifahrten mit akustisch guten Fahrzeugen erfolgen.

Abbildung 81: Darstellung der Schallausbreitung unter Einbindung des Schienenkörperschalls



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

7.2 Vorhandene Überwachungssysteme

Von einzelnen Verkehrsunternehmen werden bereits Techniken angewandt, mit denen Unrundheiten (Flachstellen, Polygone usw.) an den Rädern ermittelt werden. Im Folgenden werden drei unterschiedlich arbeitende Systeme kurz vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung ist bei den jeweils im Folgenden genannten KVV und Herstellenden zu erhalten.

7.2.1 ADUR – Automatische Detektion unrunder Räder

Das System „ADUR – Automatische Detektion unrunder Räder“ funktioniert wie folgt (vgl. auch Abschnitt 7.4.3):

- Vollautomatische, stationäres Messsystem zur Erkennung von Radunrundheiten bei Überfahrt von Zügen auf der freien Strecke,
- Zuordnung der Messungen zu den einzelnen Fahrzeugen und deren Achsen,
- Vergleich der Abweichungen (Δr) vom idealen Rundlauf anhand vorgegebener Anhaltswerte und anschließende Einstufung der Abweichungen durch ein Ampelsystem:

- Rot ($\Delta r > 0,5 \text{ mm}$)
- Gelb ($0,2 \text{ mm} \leq \Delta r \leq 0,5 \text{ mm}$)
- Grün ($\Delta r < 0,2 \text{ mm}$)

- Wird der „gelbe Bereich“ des Anhaltswertes erreicht oder überschritten, erfolgt eine Meldung an die Werkstatt zwecks Reprofilierung der betreffenden Räder.

Diese Anlagen kommen auf normal befahrenen Streckenabschnitten zum Einsatz. Diese sollten über folgende Randbedingungen verfügen:

- Konstante Betriebsbedingungen,
- Gerade Trassierung ohne Neigungswinkel und
- die Möglichkeit, eine gleichmäßige Geschwindigkeit fahren zu können (mindestens 40 km/h).

Das Messsystem arbeitet wie folgt:

Mit Dehnungsmessstreifen (DMS) wird die Durchbiegung der Schienen zwischen zwei Schwellen ermittelt und hieraus der Wert für Δr berechnet. Diese Messung erfolgt über die Strecke von mindestens zwei Radumdrehungen.

Eine solche Überwachungseinrichtung wird z. B. bei der Hamburger Hochbahn eingesetzt.

7.2.2 Wheel Monitoring System (Radüberwachungssystem)

Dieses System arbeitet mit Beschleunigungssensoren. An die Gleismessstelle werden folgende Anforderungen gestellt (Lutzenberger et al. 2008):

- Gleis in einem Betriebshof,
- Gleis sollte regelmäßig überfahren werden, in einem guten Betriebszustand (durchschnittlich gepflegtes Gleis i. S. d. Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV) sein und in einer Geraden liegen,
- die ankommenden Fahrzeuge werden mit gebräuchlichen Identifikationssystemen erkannt,
- mit Sensoren werden die bei Überfahrt angeregten Beschleunigungen am Schwellenfuß gemessen, aufgezeichnet und an einen Netzwerkcomputer des Unternehmens gesendet.

Aus den Zeitpunkten der Maxima und der in der Datenbank gespeicherten Fahrzeugdaten (Achsabstände) werden die aktuellen Geschwindigkeiten jeder Achse sowie die hiervon verursachten Beschleunigungen am Schwellenfuß sowie weitere statistische Kenngrößen berechnet.

Mit den aufgezeichneten Daten wird in einem weiteren Schritt die mögliche Polygonisierung der Räder berechnet. Hierzu werden zunächst die von einer Achse verursachten Messsignale ausgeschnitten und mit einer festgelegten Routinefrequenz (abgeleitet von einem runden Rad) bewertet. Hieraus wird dann ein sogenannter Polygonindikator ermittelt. Abschließend wird anhand von Vergleichswerten bestimmt, ob ggf. eine Radbearbeitung erforderlich ist.

Eine Flachstelle äußert sich in einem stoßartigen Schlag zwischen Rad und Schiene. Hierdurch werden beide Bauteile breitbandig angeregt. Um ein Referenzspektrum zur automatisierten Detektion der Flachstellen zu erhalten, wird zunächst die Schiene mit einem Hammerschlag angeregt. Die bei einer Überfahrt gemessenen Signale werden dann mit diesem Referenzsignal verglichen. Aus diesem Vergleich wird ermittelt, ob ggf. eine Flachstelle vorliegt.

Ein solches System wird z. B. bei den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) und der VAG Nürnberg eingesetzt.

7.2.3 LASCA (Hochgeschwindigkeits-Lasermesssystem)

Als dritte Möglichkeit zur Radüberwachung dient ein Laser-Messsystem, hier am Beispiel des Systems LASCA (vgl. INNOtec Systems GmbH 2020). Dieses Messsystem arbeitet wie folgt:

- ▶ Lasergestützte, richtungsgebundene Verformungserfassung der Schiene (Biegemoment).
- ▶ Langzeitstabile, formschlüssig geklemmte Sensorenbefestigung ohne Eingriff in den Oberbau.
- ▶ Einfache Einstellung der Sensoren durch optische Justage (Lichtpunkt auf dem Sensor bewirkt eine Spannungsteilung),
- ▶ Abnehmbarer, auf O-Ringen gelagerter Lichtstrahl- und Wetterschutz.

Mit dem Messsystem verbunden ist eine umfassende Analyse- und Auswertungssoftware

- ▶ Modulare Software zur automatischen Rad-, Achs-, und Fahrzeuergenerkennung und deren Bewertung nach kundenspezifischen Anhaltswerten z. B.:
 - Flachstellen und Ausbröckelungen in Anzahl und mm/Rad.
 - Rundlaufabweichungen in Form und Kraft pro Rad.
 - Lastverschiebungen in Achse, Drehgestell und Fahrzeug.
 - Dynamisches Laufverhalten der Fahrzeuge usw.
- ▶ Grafische Datenaufbereitung
- ▶ Modulare Meldelinien
 - Sofortmeldung mit Ampelstatus und Schadcode.
 - Gefilterte Kundendaten je Zug oder Fahrzeug.
 - Tageslisten und Statistiken.
 - Lebenszeichen und Wartungshinweise.

Ein Einsatz von LASCA in einem Straßenbahnunternehmen ist nicht bekannt.

7.3 Konzept für eine akustische Überwachung

In Handlungsempfehlungen zur Lärminderung im innerstädtischen Schienenverkehr, die zwischen 2004 und 2007 für das Umweltbundesamt erarbeitet wurden, wird auf das Thema einer akustischen und/oder schwingungstechnischen Überwachung von Fahrzeug und Fahrweg eingegangen (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a). Es werden folgende allgemeine Hinweise auf eine mögliche Problemlösung gegeben:

Neben der Schienenrauheit trägt auch die Radrauheit wesentlich zur gesamten Schallemission bei. Im Nahverkehr betrifft dies vorrangig Flachstellen, die durch ein Blockieren der Räder beim Bremsen verursacht werden. Um Schallemissionen deutlich zu verringern, wäre eine besonders wirksame Lösung, diese (und andere) Störstellen auf den Radfahrflächen zu vermeiden. Bisher treten allerdings trotz Blockier- und Schleuderschutzeinrichtungen Flachstellen auf, vor allem in den Herbstmonaten. Derzeit übernimmt häufig das Fahrpersonal die Überwachungsfunktion, indem es subjektiv akustisch wahrgenommene Störungen an die Werkstatt meldet. Dieses System lässt sich objektivieren, indem die akustischen Signale aus dem Rad-Schiene-Kontakt durch eine Messeinrichtung aufgezeichnet und analysiert werden. Grundsätzlich bestehen hierfür zwei Vorgehensweisen:

- Alle Räder / Radsätze eines Fahrzeuges werden einzeln mit Mikrofonen oder Beschleunigungssensoren überwacht. Dies erfordert einen nicht unerheblichen Geräteaufwand, wobei dieser jedoch durch „Massenfertigung“ möglicherweise auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß reduziert werden könnte.
- An einer oder mehreren Stellen innerhalb des Straßenbahnnetzes eines Verkehrsunternehmens werden stationäre Messstellen eingerichtet, welche die erforderlichen Überwachungsaufgaben übernehmen. Die Anzahl der Messstellen hängt von der Größe des Netzes und vom Umlaufplan der Fahrzeuge ab. Für eine verlässliche Messung ist es erforderlich, dass jedes Fahrzeug in regelmäßigen Abständen (z. B. zweimal je Tag) an einer solchen Überwachungsstelle vorbeifährt. Danneskiold-Samsøe et al. beschreiben eine solche realisierte Überwachungsstelle, die in Kopenhagen zum Einsatz kommt (Danneskiold-Samsøe et al. 2001a, S. 107ff.). Als mögliche Stellen für die Positionierung einer solchen Anlage bieten sich daher insbesondere die Ein- und Ausfahrten von Betriebshöfen an. In Abschnitt 7.2 werden hierzu weitere umgesetzte Lösungen vorgestellt.

Im Folgenden wird ein weitergehendes Konzept zur akustischen Überwachung beschrieben. Unterschieden wird nach Fahrzeugüberwachung und Fahrwegüberwachung.

7.3.1 Fahrzeugüberwachung durch Messungen im Schienenbereich

Mit den eingangs dargestellten Methoden (Abschnitt 7.2) ist eine akustische Fahrzeugüberwachung nur indirekt möglich. Alle drei Methoden beziehen sich auf eine Überwachung der „Unrundheit“ der Räder. Flachstellen, Polygone und Rauheiten werden durch Messungen im Gleisbereich ermittelt. Dies erfordert in jedem Fall einen Zugriff auf das Gleis. Hiermit ist jedoch auch der große Vorteil verbunden, dass die Messsignale nicht von Fremdeinwirkungen beeinflusst werden. In E DIN 38452-1 wird eine akustische Überwachung der Schallemissionen von Schienenfahrzeugen beschrieben. Diese Norm legt ein Verfahren mit drei verschiedenen Qualitätsstufen fest, die sich in Aufwand und Aussagekraft unterscheiden. Eine Überwachung nach dieser Norm beinhaltet unter anderem sowohl eine Erfassung der Radzustände als auch – in der dritten Qualitätsstufe – der sonstigen schallemittierenden Quellen

des Fahrzeugs. Durch eine Quellenanalyse und Vergleiche mit anderen Messungen ist eine teilweise Separation der Schallquellen möglich. In Abhängigkeit von der konkreten Aufgabe sind sowohl die Messmikrofonanordnungen als auch ergänzende Messungen, z. B. zur Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit, festzulegen. Folgende Aufgaben sind denkbar:

- ▶ Akustische Langzeit- oder Dauerüberwachung der Fahrzeuge auf einem geraden Streckenabschnitt,
- ▶ Ermittlung der Wirksamkeit von schallmindernden Maßnahmen am Fahrzeug oder am Gleis über einen langen Zeitraum,
- ▶ Ermittlung der Schallemissionen und Vergleich mit festgelegten Anhaltswerten.

Weiterhin ist zu beachten auf welchen Gleisabschnitt die Überwachungseinrichtung zu installieren ist. Je nach Bahnkörperart, straßenbündiger, besonderer oder unabhängiger Bahnkörper (Abschnitt 2.1), und in Abhängigkeit von den Umgebungsgeräuschen sind unterschiedliche Messanordnungen zu planen und zu installieren. Am einfachsten sind Messeinrichtungen an unabhängigen Bahnkörpern mit weitgehend freier Schallausbreitung möglich. Eingeschränkt werden hier die Messungen nur durch das Betretungsrecht der die Strecke umgebenden Grundstücke.

In DIN EN ISO 3095 ist folgender Messabstand vorgegeben: 7,5 m von Gleismitte und in 1,2 m Höhe über Schienenoberkante (bzw. 3,5 m Meter bei Einzelkomponenten auf dem Dach, die Schall emittieren). Für diesen Messpunkt werden die in der Tabelle 4-1 der VDV-Schrift 154 empfohlenen Pegelhöchstwerte genannt. Grundsätzlich sind aber auch andere Messpositionen denkbar. Je näher die Messpunkte an das Gleis heranrücken, umso besser sind die Teilschallquellen zu detektieren. Wird von dem Normmesspunkt ausgegangen, dann sind grundsätzlich folgende Messpositionen an einer zweigleisigen Strecke mit unabhängigem Bahnkörper möglich:

- ▶ Methode 1: Mikrofone auf beiden Seiten der Strecke in einem Abstand von jeweils 7,5 m zum nächsten Gleis.
- ▶ Methode 2: Mikrofone auf beiden Seiten der Strecke in einem Abstand von jeweils 7,5 m zum gegenüberliegenden Gleis. Hierbei rücken die Mikrophone näher an die Strecke heran. Bei einem Gleisabstand von z. B. 3,4 m ergibt sich so ein ergänzender Messabstand von 4,1 m ($7,5 \text{ m} - 3,4 \text{ m}$).
- ▶ Methode 3: Mikrofone auf einer Seite hintereinander in je 7,5 m zu einem der beiden Gleise.

Bei der Anordnung der Mikrofone nach Methode 2 wird der Schall über die Gleise hinweg erfasst, bei Methode 3 gilt dies für das weiter entfernte Gleis.

Bei einem besonderen Bahnkörper sind, je nach Gleislage in Straßenmitte oder am Straßenrand, nur die Methoden 2 und 3 möglich (siehe hierzu auch die unten vorgestellten Beispiele).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Methoden 1 und 2 eine Betretung der Gleisanlagen erfordert, um den genauen Messabstand zum Gleis zu ermitteln.

Sind Langzeitmessungen in einem Gleisbogen durchzuführen, z. B. zur Ermittlung der Wirksamkeit von Maßnahmen gegen das Auftreten von Kurvenquietschgeräuschen, können auch andere Messpunktanordnungen gewählt werden (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2009a).

Voraussetzung für eine akustische Langzeit-Überwachungseinrichtung ist die Erkennung einer Zugvorbeifahrt und des befahrenen Gleises. Hierzu gibt es mehrere Möglichkeiten:

- ▶ Die eindeutigste Lösung dieser Aufgabe bietet die Detektion unmittelbar im Gleis, z. B. durch Installation von Achszählern. Körperschallaufnehmer an den Schienen oder auf den Schwellen sind eine weitere Möglichkeit. So wird z. B. in einer Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes zur Geräuschminderung von Straßenbahnen eine Methode beschrieben, bei der in einem gewissen Abstand in Gleislängsrichtung je ein Geophon auf einer Schwelle installiert worden ist (Krüger et al. 1993/2005). Wird ein bestimmtes Schwinggeschwindigkeitssignal eines Geophons überschritten, dann wird ein ergänzendes Triggersignal von null auf den Wert eins gestellt. Der Wert „eins“ bedeutet Vorbeifahrt, der Wert „null“ keine Vorbeifahrt. Dieses Triggersignal startet dann sowohl die Schallaufzeichnung vor Ort und dient später auch zur Auswertung der Schallsignale zur Ermittlung von Maximalpegeln, Mittelungspegeln und Terzspektren.
- ▶ Eine weitere Lösung bietet die Anordnung von Lichtschranken neben dem Gleis oder in Gleismitte.
- ▶ Als weitere Möglichkeit zur Triggerung der Messeinrichtung ist auch durch das Schallsignal der Straßenbahn selbst möglich. Durch die Aufzeichnung eines vor Ort ermittelten typischen Schallsignals und deren Hinterlegung in der Software kann eine Zugvorbeifahrt erkannt werden. Mögliche typische lokal auftretende Fremdgeräusche aus Störquellen könnten ebenfalls erfasst werden, anhand eines Musters erkannt und so aus dem gesamten Datenfundus ausgeblendet werden.
- ▶ Die Anordnung von einem oder mehreren Geophonen im Boden neben der Strecke stellt eine weitere Möglichkeit dar (siehe folgende praktische Beispiele). Mit dieser Methode und der Triggerung über den Schallpegel ist eine Gleisbetretung nicht erforderlich.

Je nach Aufgabenstellung sind unterschiedliche Weiterverarbeitungen der aufgezeichneten Schallsignale möglich.

- ▶ Am einfachsten ist die Ermittlung des Maximalpegels L_{pAFmax} je Vorbeifahrt. Zahlreiche Untersuchungen zeigen für Straßenbahnen einen guten Zusammenhang zwischen diesem Schallpegel und dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$ und dem Vorbeifahrtexpositionspegel TEL :
 - $L_{pAeq,Tp} = L_{pAFmax} - 1 \text{ dB}$ (VDV 2011b, S. 14)
 - $TEL = L_{pAFmax} - 1 \text{ dB}$ (Danneskiold-Samsøe et al. 2001b, S. 23) für Fahrzeuglängen $\geq 30 \text{ m}$
 - $TEL = L_{pAFmax} + (0,5 \text{ dB} \mp 0,5 \text{ dB})$ (Danneskiold-Samsøe et al. 2001b, S. 23) für Fahrzeuglängen $< 30 \text{ m}$.

Je nach Genauigkeit der Triggerung, z. B. durch Achszähler oder Lichtschranken, können die Schallpegel $L_{pAeq,Tp}$ und TEL auch direkt aus den aufgezeichneten Schallsignalen ermittelt werden.

Die Schallpegel je einer Vorbeifahrt können dann, je nach Dauer der Messung vor Ort, weiterverarbeitet werden zu Mittelungspegeln je

- ▶ Stunde,
- ▶ Tag / Nacht,
- ▶ Woche usw.

Frequenzanalysen (Terzen oder Oktaven) bieten weitere Möglichkeiten zur Detektion von „Unregelmäßigkeiten“ an den Fahrzeugen, die zu einer verstärkten Schallemission führen. Eine gute Basis zur Erkennung von solchen Unregelmäßigkeiten sind Schallmessungen auf einem Normgleis zur akustischen Abnahme von neuen Fahrzeugen. Hiervon können Referenzmuster abgeleitet werden.

7.3.2 Fahrwegüberwachung durch Messeinrichtungen am Fahrzeug

Der Zustand der Gleise, insbesondere der Schienenfahrflächenrauheit, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schallemissionen (Abschnitt 2). Daher ist es ergänzend zu der Fahrzeugüberwachung erforderlich, auch diese Schallquelle zu überwachen. Von der DB AG wird hierzu der sogenannte Schallmesswagen eingesetzt (Danneskiold-Samsøe et al. 2001b, S. 96ff). Hierbei handelt es sich um einen von einer elektrisch angetriebenen Lokomotive gezogenen Dreiwagen-Zug mit einem Messwagen, der zwischen zwei „Begleitwagen“ angeordnet ist. Der Schall wird in einer mit Absorberelementen ausgekleideten Kabine oberhalb eines ungebremsten Drehgestells erfasst. Das Messmikrofon in der Kabine ist über einer kreisrunden Öffnung, durch die der Schall aus dem Drehgestell dringt, angeordnet. Auch hierbei wird der gemessene Schalldruck mit Schallmustern verglichen und so eine Beschreibung des aktuellen Streckenzustands ermittelt.

In für das Umweltbundesamt bereits 2007 fertiggestellten Handlungsempfehlungen zur Lärminderung im innerstädtischen Schienenpersonennahverkehr wird ein hiervon inspiriertes, vereinfachtes Verfahren beschrieben, welches im Schienennetz von Straßenbahnen eingesetzt werden kann (STUVA e. V. und STUVAtec GmbH 2007a, 116f.). Hierzu dienen folgende Messungen:

- ▶ An entsprechend ausgerüsteten Linienfahrzeugen:
 - Beschleunigungsmessungen auf Radsatzlagern,
 - Luftschallmessungen im Bereich der Drehgestelle oder vor einzelnen Rädern oder
- ▶ Verwendung eines besonderen Wagens (Anhänger) analog dem Schallmesswagen der DB AG. Mit diesem Anhänger kann dann das gesamte Gleisnetz eines Verkehrsunternehmens in regelmäßigen Abständen befahren und somit der (akustische) Gleiszustand ermittelt werden.

Auch hier bieten entsprechenden Schallmuster eine gute Basis, um Gleisunregelmäßigkeiten, wie Riffel, Rauheiten, ausgefahrene Schweiß- und Isolierstöße zu erkennen.

Abbildung 9 (Seite 44) und Abbildung 34 (Seite 70) zeigen beispielhaft Schallpegelmessergebnisse im Bereich des Drehgestells einer Straßenbahn. Um eine anwendungsreife Lösung zu präsentieren, sind jedoch weitergehende Auswertungen vorhandener Messaufzeichnungen sowie ergänzende Messungen erforderlich.

7.4 Beispiele für eine Anwendung von E DIN 38452-1

Mögliche Anwendungen einer Langzeitmesseinrichtung mit Erkennung des befahrenen Gleises bei Straßenbahnen werden im Folgenden für zwei unterschiedliche Streckenabschnitte in Köln vorgestellt. Hierzu wurden zwei Strecken mit besonderem Bahnkörper ausgewählt, bei denen die Umgebungsgeräuschsituation sich deutlich unterscheiden.

7.4.1 Anwendungsfall 1

7.4.1.1 Situationsbeschreibung

In Abbildung 82 sind die Streckensituation und die Anordnung der Messpunkte neben einer zweigleisigen Straßenbahnstrecke dargestellt. Folgende vier Messpunkte wurden eingerichtet:

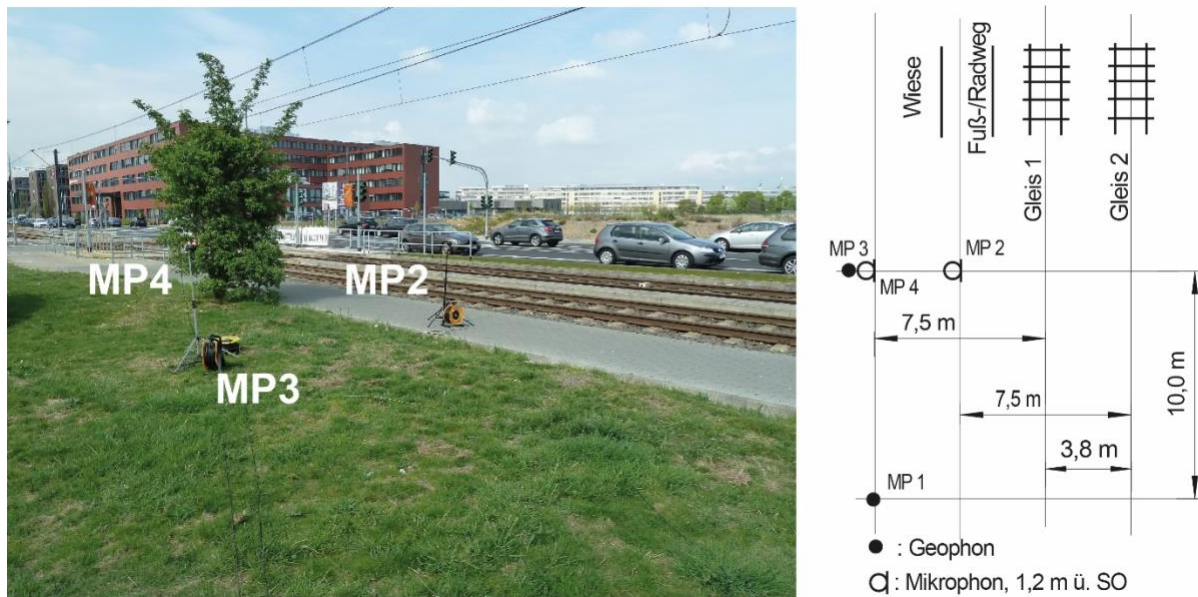
- ▶ MP1: Schwinggeschwindigkeitsmesspunkt im Boden, 10 m Abstand vom Hauptquerschnitt,
- ▶ MP2: Messmikrofon im Hauptquerschnitt in 7,5 m Abstand zum entfernten Gleis und 1,2 m über Schienenoberkante,
- ▶ MP3: Schwinggeschwindigkeitsmesspunkt im Boden, im Hauptquerschnitt mit den beiden Mikrofonen,
- ▶ MP4: Messmikrofon im Hauptquerschnitt in 7,5 m Abstand zum nahen Gleis und 1,2 m über Schienenoberkante.

Es handelt sich um einen besonderen Bahnkörper in Seitenlage einer Fahrbahn. Auf der anderen Seite des Bahnkörpers ist ein Rad-/Fußweg vorhanden. Daneben ist eine Wiese. Auf der Wiese wurden die vier Messpunkte angeordnet.

Aufgezeichnet wurden der Luftschall und die Erschütterungen im Boden von einigen Vorbeifahrten auf beiden Gleisen. Bei den Messungen mit den Geophonen ging es vorrangig um die Erkennung des befahrenen Gleises. Dies sollte dann auch eine entsprechende Zuordnung der Schallereignisse ermöglichen.

Die Straße im Hintergrund von Abbildung 82 wurde nur gelegentlich befahren, vorwiegend dient sie zum Parken. Daher war der durch Kraftfahrzeuge verursachte Schall sehr gering und praktisch zu vernachlässigen.

Abbildung 82: Messstrecke 1 und Anordnung der Mikrofone und Geophone im Boden



Erkennbar sind die beiden Luftschall-Messorte mit Mikrofonen (MP2 und MP4) sowie ein Geophon-Standort für die Körperschallmessung (MP3). Die Position des Körperschallmesspunktes MP1 liegt außerhalb des Bildausschnittes (siehe Karte).

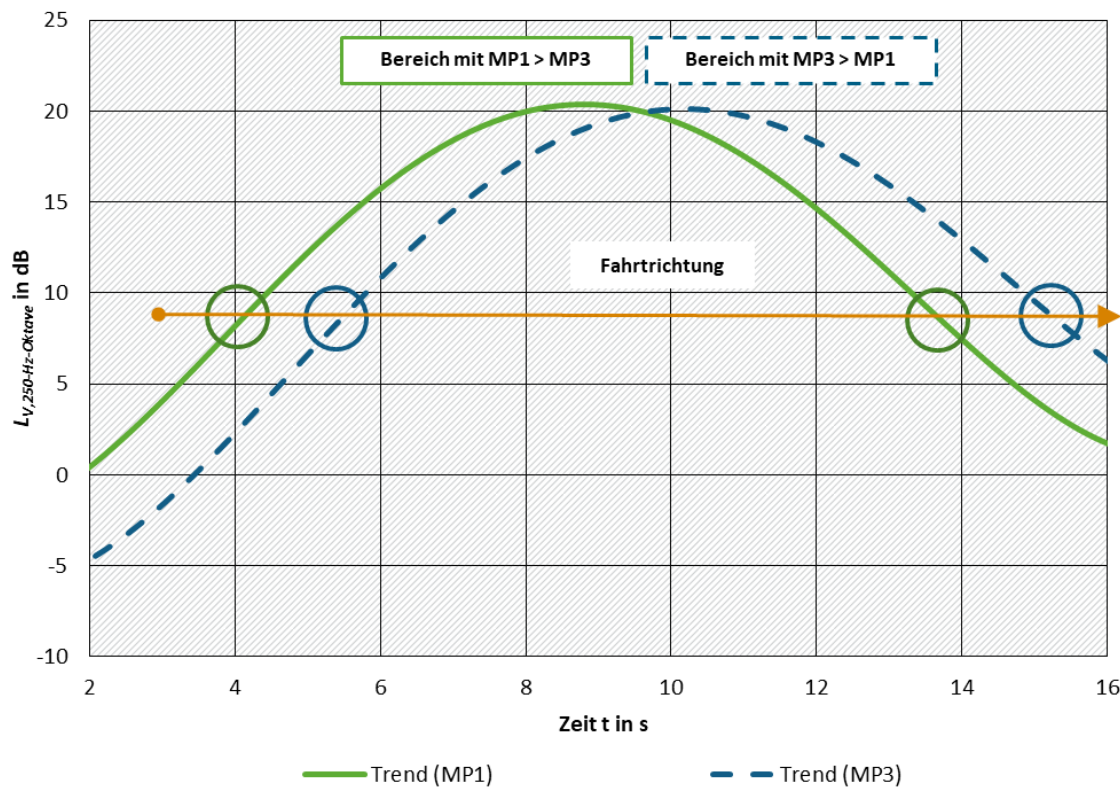
Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

7.4.1.2 Ergebnis

Wie bereits beschrieben, sollte mit diesen Messungen ermittelt werden, ob durch die Anordnung der Geophone im Boden eine Zuordnung der Vorbeifahrten zu den befahrenen Gleisen möglich ist.

Aus den Erschütterungssignalen wurden Oktav-Zeit-Spektren für die Oktaven von 8 Hz bis 500 Hz erstellt. Aus diesen Ergebnissen wurden dann unterschiedliche Trendlinien (gemittelten Pegelverläufe über die Zeit) berechnet. Die Trendlinien der 250 Hz Oktave ergab die eindeutigsten Ergebnisse zur Erkennung des befahrenen Gleises. Ein solches Ergebnis zeigt Abbildung 83. In dieser Abbildung sind die ermittelten Trendlinien der Schwinggeschwindigkeit an den in Abbildung 82 dargestellten Messpunkten MP1 und MP3 dargestellt. Das Fahrzeug fährt auf Gleis 2, dem vom Rad- und Gehweg weiter entfernten Gleis. Die höheren Pegel treten zunächst am Messpunkt MP1 auf, da dieser zuerst passiert wird. Infolge der Bodendämpfung und Entfernung zwischen den beiden Messpunkten im Boden sind die Schwinggeschwindigkeitspegel am Messpunkt MP3 kleiner. Je weiter sich das Fahrzeug dem Messquerschnitt mit den beiden Luftschallmikrofonen nähert, desto stärker nähern sich die Pegel der beiden Erschütterungsmesspunkte an, da das Fahrzeug jetzt gleichzeitig auf beide Messpunkte im Boden einwirkt. Nach dem Verlassen des Messquerschnitts mit den Luftschallmesspunkten kehrt sich die Situation um, es sind die höheren Pegel am Messpunkt MP3 vorhanden. Somit ergibt sich eine eindeutige Zuordnung aus diesen beiden Erschütterungsmesswerten zur Fahrtrichtung und in der Regel damit auch zum befahrenen Gleis. Dieser Umstand ließe sich bei einer automatisch arbeitenden Messstation in die Auswertesoftware integrieren.

Abbildung 83: Darstellung der Erschütterungsmessergebnisse im Boden (Trendlinien)



$L_{v,Oktave}$ über die Zeit; das Fahrzeug fährt auf Gleis 2 (entferntes Gleis bezogen auf die Schallmesspunkte)

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Erläuterungen zu Abbildung 83:

- Dargestellt sind die aus den Oktavpegel-Zeit-Spektren berechneten Trendlinien (gemittelte Pegelverläufe) der Ergebnisse der beiden Bodenmesspunkte MP1 (grüne Linie) und MP3 (blaue, gestrichelte Linie): Diese Trendlinien sind im Bild bezeichnet durch blau „Trend (MP1)“ und rot durch „Trend (MP3)“.
- Die beiden Trend-Linien kreuzen sich im Bild knapp unterhalb der Zeit von 10 Sekunden und teilen somit das Bild in zwei Teilbereiche links und rechts:
 - Im Teilbereich links sind die Pegelwerte der grünen Trendlinie größer als die Pegelwerte der blauen (gestrichelten) Trendlinie. Dies besagt, dass die Messwerte am Messpunkt MP1 größer sind als am Messpunkt MP3,
 - Im Teilbereich rechts sind die Pegelwerte der blauen (gestrichelten) Trendlinie größer als die Pegelwerte der grünen Trendlinie. Dies besagt, dass die Messwerte am Messpunkt MP3 größer sind als am Messpunkt MP1.
 - Ein zusätzlich eingezeichneter orangener Pfeil zeigt von links nach rechts und beschreibt die Fahrtrichtung. Dieser Pfeil schneidet die Trendlinien sowohl zu Beginn der Vorbeifahrt als auch am Ende der Vorbeifahrt. Diese Schnittpunkte sind durch Kreise markiert. Diese Schnittpunkte treten zeitlich nacheinander auf. Zu Beginn, das Fahrzeug fährt auf den Messquerschnitt zu, wird zunächst die grüne Trendlinie (Messpunkt MP1)

und danach die blaue (gestrichelte) Trendlinie (MP3) gekreuzt. Nach der Ausfahrt des Fahrzeugs aus dem Messquerschnitt kehrt sich das Verhältnis um.

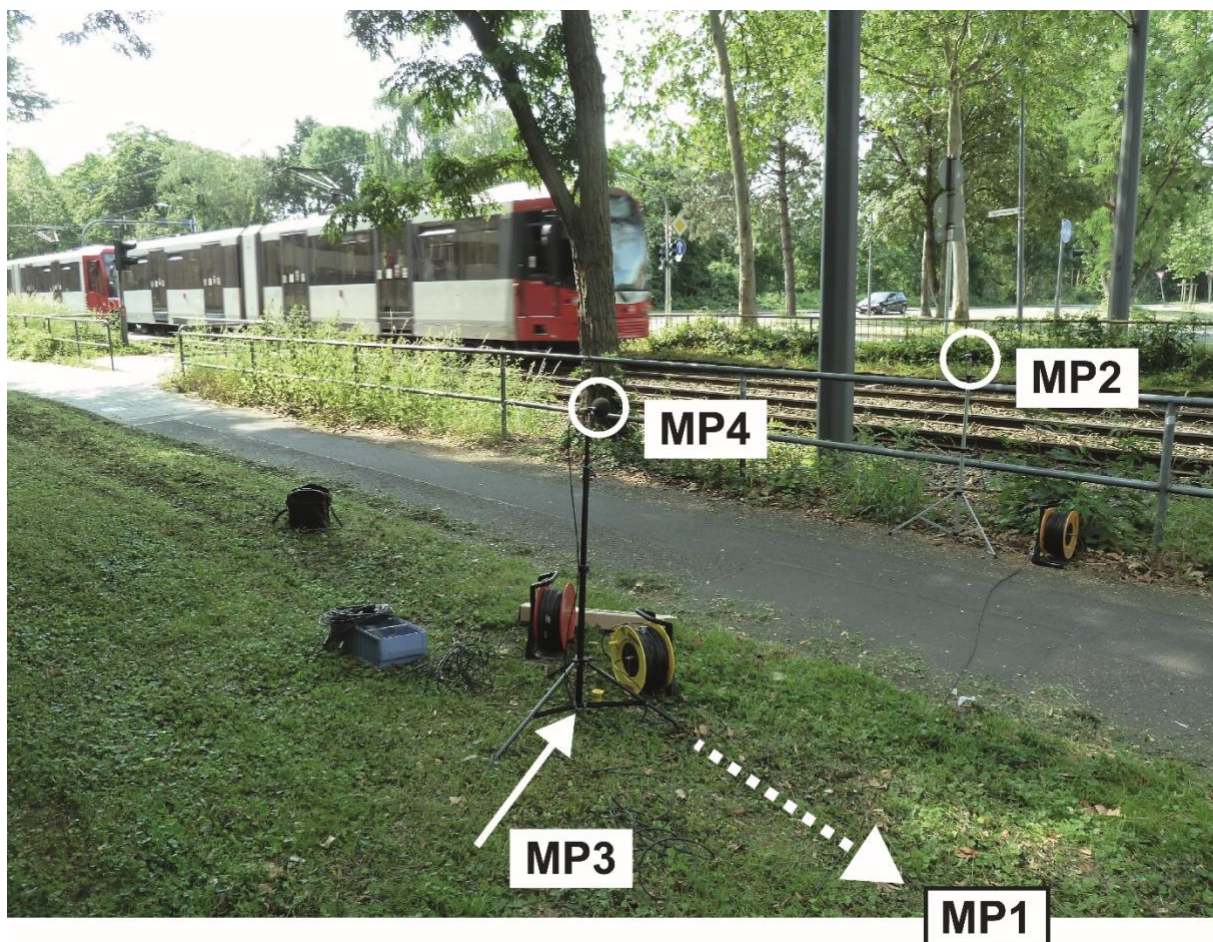
- Hierdurch ist eine eindeutige Fahrtrichtung des Fahrzeugs zu erkennen (von Messpunkt MP1 nach Messpunkt MP3) und somit das befahrene Gleis.

7.4.2 Anwendungsfall 2

7.4.2.1 Situationsbeschreibung

Da im innerstädtischen Bereich oft Situationen vorherrschen, in denen die Gleise neben einer stark vom Individualverkehr befahrenen Straße liegen, wurden weitere Messungen an eben einer solchen Strecke durchgeführt. Die Messanordnung war prinzipiell so wie in Abbildung 82 beschrieben. Ein Foto der Situation zeigt Abbildung 84. Die beiden Mikrofone waren wie bei der oben beschriebenen Messung (Anwendungsfall 1, Abschnitt 7.4.1) jeweils in 7,5 m Abstand zu den beiden Gleisen und in 1,2 m Höhe über der Schienenoberkante angeordnet.

Abbildung 84: Messsituation an Gleisen neben einer stark befahrenen Straße, Mikrofonpositionen



Die Positionen der Luftschall-Messpunkte MP2 und MP4 (Mikrophone) sind entsprechend gekennzeichnet, die Position der Geophone im Boden ist durch MP1 und MP3 gekennzeichnet. Das zweite Geophon (MP1) im Abstand von 10 m zur Mikrofonebene ist im Bild nicht zu sehen. Der rechte Pfeil zeigt die Richtung des Standortes an.

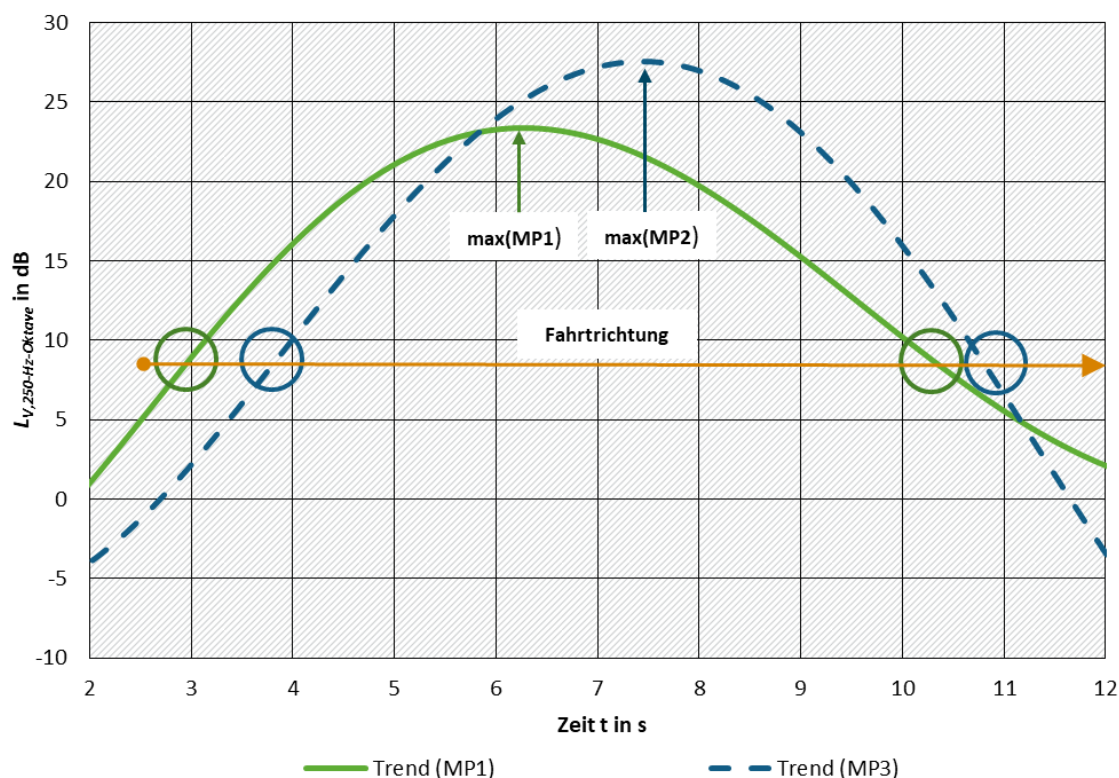
Quelle: Eigene Darstellung (STUVA)

7.4.2.2 Ergebnisse

In den beiden folgenden Abbildungen (Abbildung 85 und Abbildung 86) sind beispielhaft Ergebnisse einer Fahrt auf dem straßennahen Gleis an der Messstelle aus Abbildung 84 dargestellt. Zunächst zeigt Abbildung 85 die Erschütterungssignale im Boden für die beiden Messpunkte MP1 und MP3. Aus diesen Signalen wurde jeweils eine Trend-Linie berechnet. Anhand dieser Linien ergibt sich eindeutig die Fahrtrichtung und somit in der Regel auch das befahrene Gleis. Einen weiteren Indikator stellen die jeweiligen Maximalwerte der Trend-Linien dar (Abbildung 85). In Abhängigkeit von der Fahrtrichtung treten sie im zeitlichen Bezug nacheinander auf. Anhand der Verschiebung gegeneinander kann die Messung einer Fahrtrichtung eindeutig zugeordnet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung zeigt Abbildung 86. In dieser Abbildung sind die AF-bewerteten Pegel des gemessenen Luftschalls und der Erschütterungen dargestellt. Wiederum aus den Erschütterungssignalen $L_{vAF}(t)$ ist die Fahrtrichtung dadurch abzuleiten, dass danach gesucht wird, an welchem Messpunkt in der zeitlichen Abfolge als erstes die höheren Pegel auftreten. Hierzu dient der in der Abbildung von links nach rechts zeigende, schwarze Pfeil. Näherungsweise kann aus dieser Darstellung auch die Vorbeifahrzeit T_p abgelesen werden. In der Abbildung ist diese dargestellt. Es ergibt sich ein T_p von ca. 4,7 s. Mit der Fahrzeuglänge von ca. 58 m folgt somit eine Geschwindigkeit von ungefähr 44 km/h.

Abbildung 85: Messergebnis – Erschütterungssignale im Boden an den Messpunkten MP1 und MP3 für die Messstelle aus Anwendungsfall 2



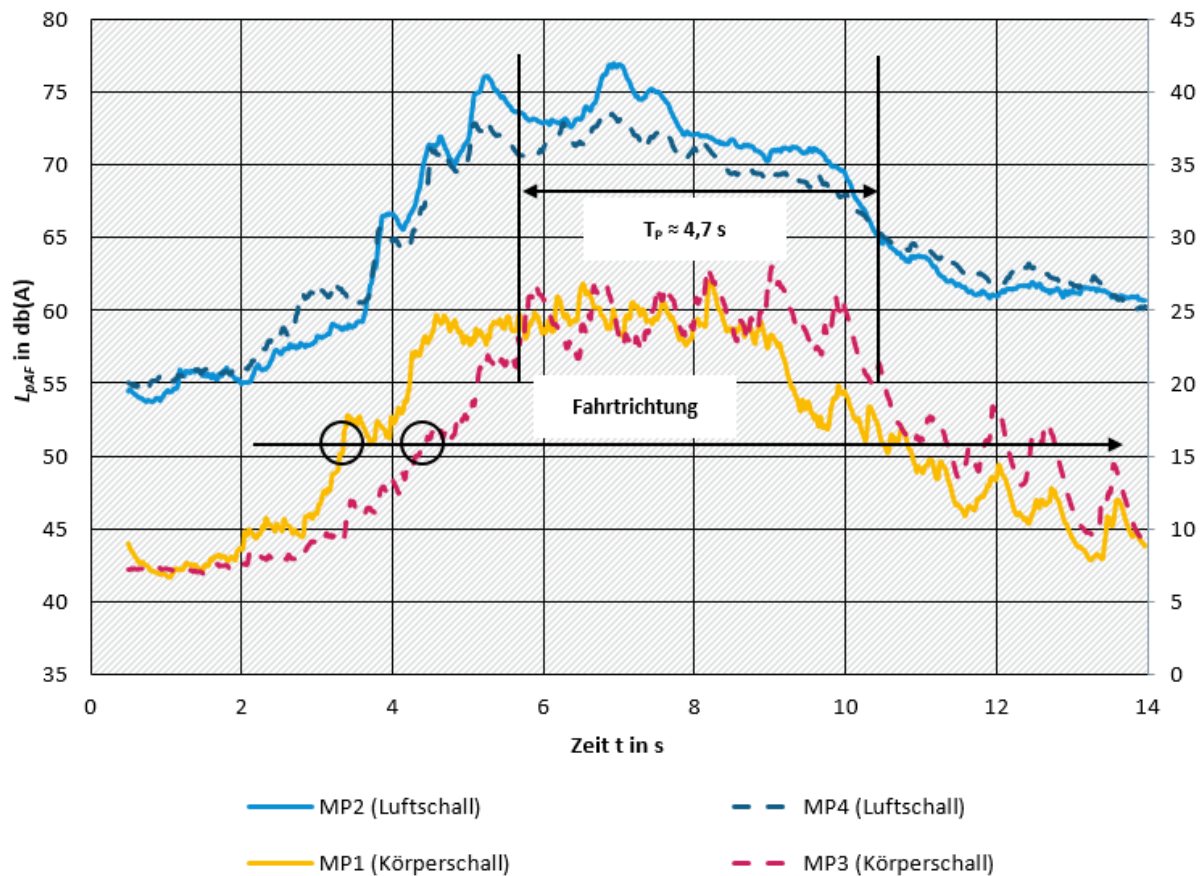
Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Beschreibung zu Abbildung 85 (Pegel-Zeit-Verlauf der Erschütterungssignale):

- Trend (MP1) und Trend (MP3): Linearisierte Pegelverläufe (Trendlinien) der Erschütterungsmesswerte im Boden für die 250 Hz Oktave,

- $\max(\text{MP1})$ und $\max(\text{MP3})$: Maximalwerte der Trend-Linien der an den beiden Messpunkten MP1 und MP3 gemessenen Erschütterungssignale.

Abbildung 86: Messergebnis einer Vorbeifahrt



Darstellung der AF-bewerteten Erschütterungssignale (KS) und Schalldrucksignale (LS) an den vier Messpunkten (siehe Abbildung 84).

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Erläuterungen zu Abbildung 86 (Pegel-Zeit-Verlauf der Luftschallsignale $L_{pAF}(t)$ und Erschütterungssignale $L_{vAF}(t)$ alle Signale A-bewertet):

- MP2-LS: Luftschallpegelverlauf am Messpunkt MP2, hellblaue Linie,
- MP4-LS: Luftschallpegelverlauf am Messpunkt MP4, dunkelblaue (gestrichelte) Linie,
- MP1-KS: Körperschallpegelverlauf am Messpunkt MP1, gelbe Linie,
- MP3-KS: Körperschallpegelverlauf am Messpunkt MP3, magentafarbene (gestrichelte) Linie.

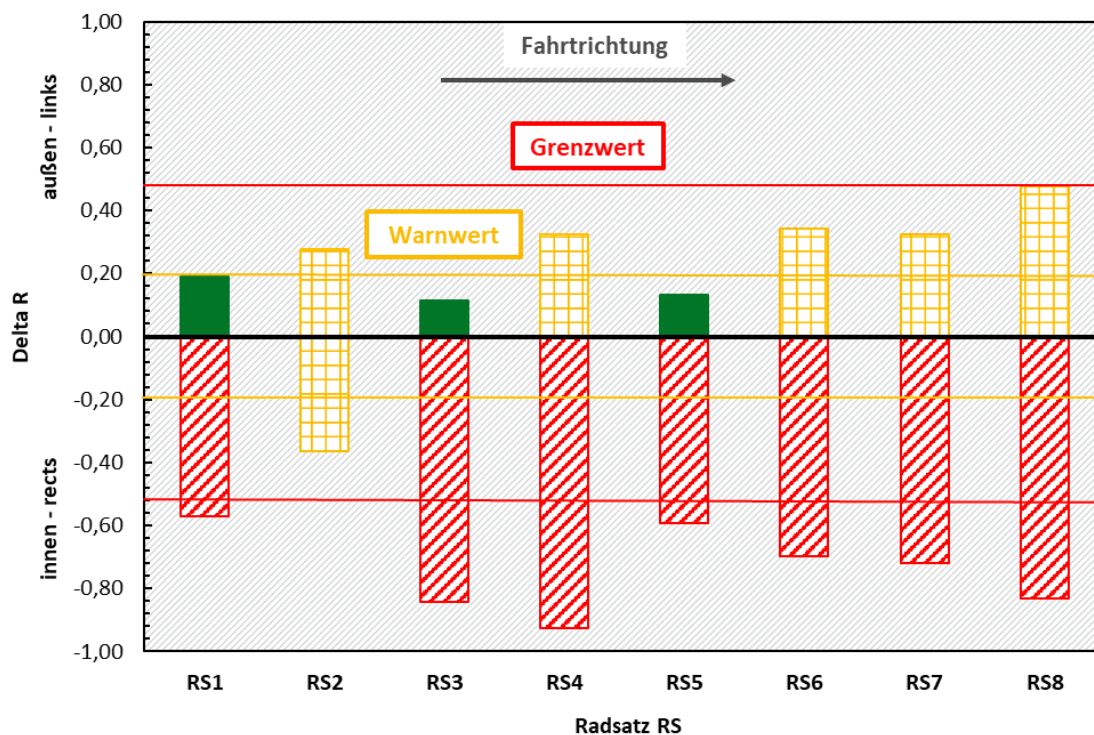
Mit T_p , hier 4,7 Sekunden, wird die reine Vorbeifahrtzeit eines Fahrzeugs bezeichnet (gekennzeichnet durch die schwarzen, senkrechten Linien). Die Fahrtrichtung ist von links nach rechts, dargestellt durch einen schwarzen Pfeil.

7.4.3 Beispiel für eine praktische Anwendung der ADUR-Anlage

Das Ergebnis einer Überwachungsmessung an einem Fahrzeug mit Rädern ohne und mit Flachstellen zeigt Abbildung 87. Dargestellt ist ein Ergebnis eines Fahrzeugs mit vier Drehgestellen (entspricht acht Radsätzen), einer Gesamtlänge von 34 m und einem Gesamtgewicht von etwa 47 Tonnen. Bei der Überwachungsmessung betrug die Geschwindigkeit 57,3 km/h. In der Abbildung sind folgende Angaben enthalten:

- ▶ Fahrtrichtung (hier nach rechts),
- ▶ Abszisse: Radsatznummer (RS1 bis RS8, in der Abbildung von links nach rechts),
- ▶ Ordinate: Delta R für die Beschreibung der Flachstellenausprägung. Bei $\Delta R \geq 0,2$ mm und $< 0,5$ mm wird eine Warnung erstellt, bei $\Delta R \geq 0,5$ mm wird der Grenzwert überschritten,
- ▶ Mit Ausnahme vom rechten Rad am Radsatz 2 überschreiten alle Messwerte der Räder auf der rechten Seite (unterhalb der Nulllinie) den Grenzwert, sie sind daher rot markiert. Auf der linken Seite (oberhalb der Nulllinie) überschreitet kein Rad den Grenzwert. Die Räder an den Radsätzen 2, 4, 6, 7 und 8 sind gelb markiert, da sie den Warnwert überschritten haben. Die drei verbleibenden Räder der linken Seite an den Radsätzen 1, 3 und 5 sind grün gekennzeichnet da sie unterhalb der Schwelle für den Warnwert liegen.

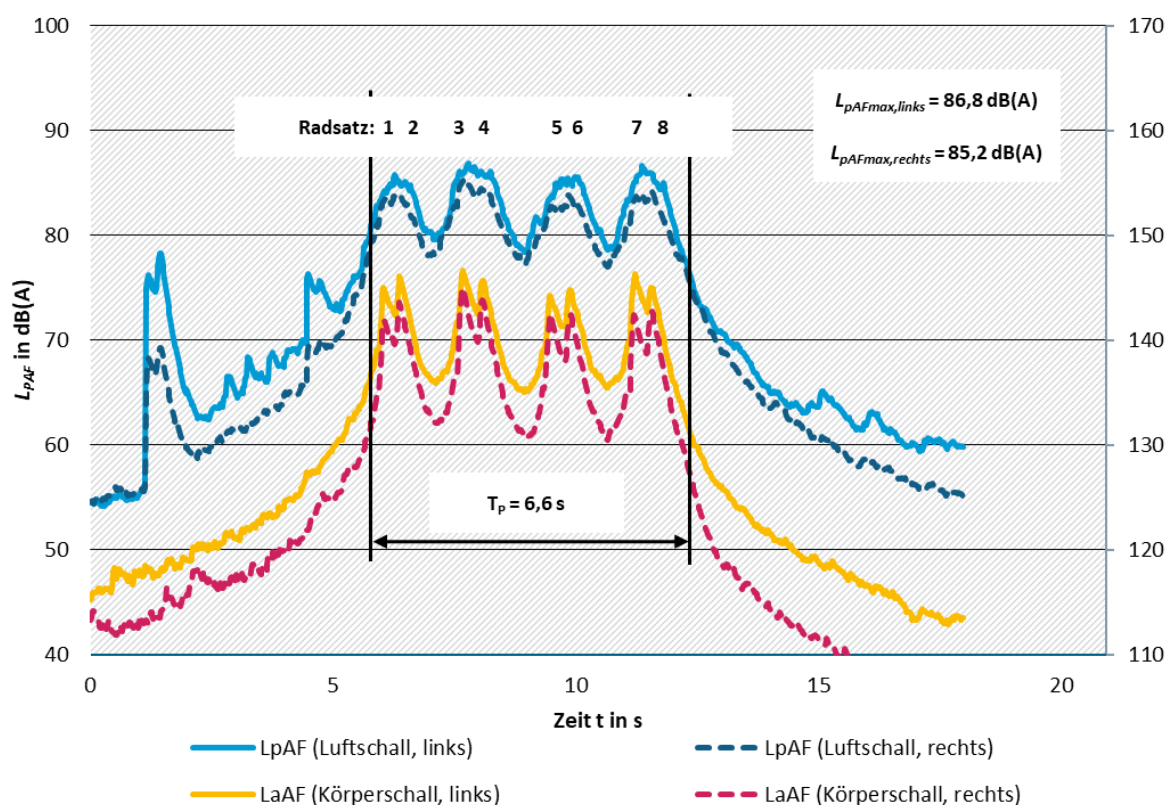
Abbildung 87: Ergebnis einer Überwachungsmessung mit dem System ADUR



Quelle: Hamburger Hochbahn AG (bearbeitet: STUVA)

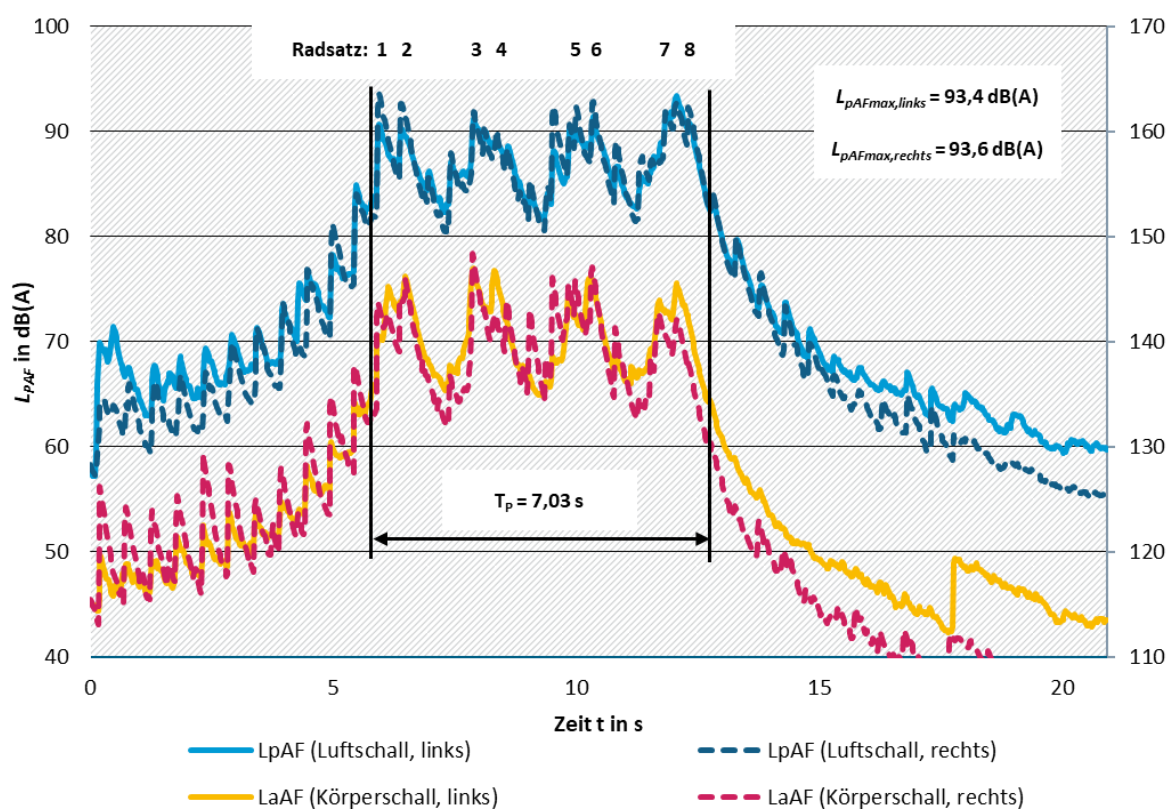
Das oben beschriebene Fahrzeug wurde auch auf der Strecke schalltechnisch vermessen. An den beiden Schienen wurde der Körperschall am Schienenfuß in vertikaler Richtung gemessen. Zusätzlich erfolgte die Messung der Schallpegel auf beiden Seiten in einem Abstand von 2,5 m zur Gleismitte und in 0,6 m Höhe über der Schienenoberkante. Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. In Abbildung 88 sind beispielhaft die Messwerte des Luftschalls und des Körperschalls Schiene als AF-bewertete Pegelschriebe für die genannten Messpunkte für die Geschwindigkeit von 20 km/h dargestellt. Abbildung 88 zeigt das Ergebnis ohne Flachstellen und Abbildung 89 mit Flachstellen.

Abbildung 88: Überwachungsmessung für eine Vorbeifahrt einer U-Bahn ohne Flachstellen



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Abbildung 89: Überwachungsmessung für eine Vorbeifahrt einer U-Bahn mit Flachstellen



Quelle: Eigene Messung (STUVA)

Erläuterungen zu Abbildung 88 und Abbildung 89:

- ▶ L_{pAF} : Schalldruckpegelverläufe auf beiden Seiten des Gleises als hell- und dunkelblaue Linien, Messpunkte in 2,5 m Abstand zur Gleismitte und 0,6 m Höhe über Schienenoberkante. Die in den beiden Abbildungen angegebenen Maximalpegel beziehen sich auf diese Messpunkte
- ▶ L_{aAF} : Körperschallpegelverläufe (Schwingbeschleunigung a) auf beiden Schienen (Schienenfuß) des Gleises als gelbe und magentafarbene (gestrichelte) Linien
- ▶ Gestrichelte Linien beschreiben die Messpunkte auf der rechten Seite, durchgezogene Linien die Messpunkte auf der linken Seite des Gleises
- ▶ Alle Signale AF-bewertet
- ▶ T_p beschreibt die Vorbeifahrzeit

Aus den Abbildungen ergeben sich folgende wesentliche Merkmale für die Fahrten ohne und mit Flachstellen:

- ▶ Signale ohne Flachstellen
Abbildung 88 zeigt die Schall- und Beschleunigungssignale für die Bereiche vor, während und nach einer Durchfahrt durch den Messquerschnitt. Auf der linken Fahrzeugseite sind die Schallsignale für den gesamten dargestellten Zeitbereich größer als auf der rechten Fahrzeugseite. Der hohe Schallpegel zu Beginn der Aufzeichnung ist auf eine „Störung“ im Gleis vor dem eigentlichen Messquerschnitt zurückzuführen. Die vier Drehgestelle führen zu deutlichen Schallpegelanhebungen, die Werte zwischen ca. 84 dB(A) und 87 dB(A) annehmen. Im Pegel-Zeit-Verlauf des Beschleunigungssignals führen die einzelnen Räder zu deutlich erkennbaren Pegelspitzen.
- ▶ Signale mit Flachstellen
Abbildung 89 zeigt die entsprechenden Signale mit Flachstellen. Im Vergleich mit den Signalen ohne Flachstellen sind hier besonders deutlich im Zeitbereich vor der Durchfahrt durch den Messquerschnitt die durch die Flachstellen verursachten Schlaggeräusche zu erkennen. Besonders deutlich trifft dies für die Pegel auf der rechten Fahrzeugseite zu. Diese Schlaggeräusche dominieren auch das eigentliche Vorbeifahrgeräusch im Messquerschnitt. Die Schallpegelspitzen liegen jetzt bei ca. 92 dB(A) bis 94 dB(A). Die ADUR-Anlage (Abbildung 87) gibt diesen Zustand der Räder wieder. Die Messung auf der ADUR-Anlage erfolgte kurz nach der Schallmessung mit demselben Fahrzeug.

Der Abstand der durch die Flachstellen verursachten Pegelspitzen beträgt ca. 0,48 Sekunden. Dies ergibt eine Frequenz von ca. 2 Hz. Bei der üblichen Streckenhöchstgeschwindigkeit von 80 km/h erhöht sich diese Frequenz auf 8 Hz. Geräusche mit diesen Frequenzen sind vom Menschen nicht wahrzunehmen. Durch die einzelnen Stöße werden jedoch Rad und Schiene breitbandig angeregt und somit hörbarer Schall erzeugt. In Abbildung 89 liegen diese Schalldruckpegelspitzen im Bereich von 66 dB(A) bis 74 dB(A), je nach Entfernung des Fahrzeugs vom Messquerschnitt.

Die Unterschiede der Maximalpegel zwischen den Zuständen mit und ohne Flachstellen betragen auf der linken Seite 6,6 dB(A) und auf der rechten Seite 8,4 dB(A).

Die gemittelten Absolut- und Differenzpegel für die höheren Geschwindigkeiten sind für den Luftschall-Messpunkt auf der rechten Seite in 7,5 m Abstand von Gleismitte und 1,2 m über Schienenoberkante in Tabelle 31 dargestellt. Im Mittel sind diese Differenzpegel etwas kleiner als 6 dB(A).

Tabelle 31: Gemittelte Messwerte von Fahrzeugvorbeifahrten ohne und mit Flachstellen auf den Rädern

Messpunkt in 7,5 m Abstand von Gleismitte und in 1,2 m Höhe über Schienenoberkante.

v [km/h]	$L_{pAFmax,m}$ in dB(A) ohne Flach-stellen	$L_{pAFmax,m}$ in dB(A) mit Flach-stellen	Pegel-differenz	$L_{pAeq,Tp}$ in dB(A) ohne Flach-stellen	$L_{pAeq,Tp}$ in dB(A) mit Flach-stellen	Pegel-differenz
40	82,8	88,7	5,9	90,9	86,3	5,4
60	87,3	92,9	5,6	85,7	91,6	5,9
80	90,6	95,6	5,3	89,1	95,4	6,3

Quelle: Eigene Messung (STUVA)

7.4.4 Schlussfolgerungen aus den Messungen

Aus den durchgeführten Messungen an Straßenbahnstrecken lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- ▶ Durch Erschütterungsmessungen im Boden im Abstand von 10 m in Gleislängsrichtung ergeben sich eindeutige Hinweise auf die Fahrtrichtung und somit bei Straßenbahnen in der Regel auch auf das befahrene Gleis,
- ▶ Die Auswertungen zeigten unterschiedliche Möglichkeiten zur Aufarbeitung der Erschütterungssignale:
 - Ermittlung der Trendlinien (geglättete Linien),
 - Ermittlung der Maximalwerte der Trendlinien,
 - Darstellung der AF-bewerteten Erschütterungssignale.
- ▶ Alle drei Auswertemöglichkeiten ergeben eindeutige Hinweise auf die Fahrtrichtung und somit auf das befahrene Gleis.

Für die praktische Anwendung ist eine Kombination dieser Möglichkeiten für eine eindeutige Erkennung der Fahrtrichtung u. U. anzuwenden.

Insbesondere die Messungen neben einer stark befahrenen Straße zeigen aber auch, dass eine völlige „Unterdrückung“ der Straßenverkehrsgeräusche kaum möglich ist. Zur Anwendung der oben skizzierten Messmethoden zur akustischen Fahrzeugüberwachung sind demnach nach Strecken in einer möglichst ruhigen Umgebung zu suchen. Eine Anwendung der E DIN 38452-1 auch für Straßenbahnen ist dann möglich.

Die Anwendung der ADUR-Anlage ergibt eindeutige Hinweise auf den (akustischen) Zustand der Räder eines Fahrzeugs. Die relativ geringe Schallpegelanhebung durch die Flachstellen bei diesem Fahrzeug (rund 6 dB(A)) kann auf das relativ hohe Fahrgeräusch des untersuchten

Fahrzeugs zurückgeführt werden (Tabelle 31). Bei Fahrzeugen mit einem geringeren Fahrgeräusch ist eine höhere Pegeldifferenz zu erwarten.

7.5 Nutzen eines Monitoringsystems

Eine akustische Fahrzeug- und Fahrwegüberwachung bietet erhebliche Vorteile für das Verkehrsunternehmen und für die betroffenen Anwohnenden.

In Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV wird von einem „durchschnittlich gepflegtes Rad-Schiene-System“ ausgegangen. Auf diesen Zustand beruhen alle Korrekturwerte in der Verordnung und somit auch die berechneten Schallimmissionen. Um diesen Zustand zu bewahren sind die beiden folgenden Schritte unumgänglich:

- ▶ Bestandsaufnahme des Istzustands für ein „durchschnittlich gepflegten Rad-Schiene-System“ und
- ▶ regelmäßige Überprüfung dieses Zustands.

Diese Vorgehensweise garantiert auf der einen Seite den Anwohnern, dass die berechneten Werte im Mittel dauerhaft nicht überschritten werden und den Verkehrsunternehmen starke Argumente für den Betrieb und den weiteren Ausbau des Streckennetzes. Im Einzelnen ergeben sich die im Folgenden zusammengefassten Vorteile.

7.5.1 Fahrzeugüberwachung

- ▶ Nutzen für das Verkehrsunternehmen
 Von einigen Verkehrsunternehmen werden bereits Fahrzeugüberwachungseinrichtungen eingesetzt (siehe oben). Vorwiegend geht es hierbei um die automatische Erkennung von Abweichungen des Rades von der optimalen runden Form. Dies ermöglicht eine verbesserte Einsatzplanung der Werkstatt (Personal und Maschinen) zur Beseitigung der Schäden. Die genannten Störstellen wirken sich unmittelbar auf die Belastung der Drehgestelle und des Fahrwegs aus. Eine rechtzeitige Beseitigung der Störstellen hat somit positive Auswirkungen auf den Erhalt eines guten Rad-Gleis-Zustands, die erforderlichen Wartungsintervalle beider Komponenten können damit verlängert werden. Hierdurch können Kosten eingespart werden.
- ▶ Eine akustische Überwachung bietet ergänzend auch die Erfassung von möglichen „Störungen“ bei den weiteren Schallquellen eines Fahrzeugs (z. B. Motor, Getriebe und Aggregate).
- ▶ Nutzen für die Anwohnenden
 Die genannten Störstellen belasten nicht nur Fahrzeug und Fahrweg, sie wirken sich auch unmittelbar auf die Anregung von Luftschall und Erschütterungen und somit auf die Immissionen in den benachbarten Gebäuden aus. Runde und glatte Radfahrflächen tragen somit zu geringen Immissionen und somit zu einer höheren Akzeptanz einer Straßenbahnlinie durch die betroffenen Anwohnenden bei. Dies dürfte sich sowohl auf die vorhandenen Strecken als auch auf die Planung neuer Strecken positiv auswirken. Hierdurch kann die Umsetzung neuer Projekte kurzfristiger umgesetzt werden und somit können (neue) Stadtteile schneller mit einer Straßenbahn bedient werden.

7.5.2 Fahrwegüberwachung

Auf die Anregung von Luftschall und Erschütterungen trägt auch der Zustand des Gleises in erheblichem Umfang bei. Insbesondere betrifft dies die Streckenführung (Gerade, Gleisbogen, Weichen, Kreuzungen, Isolier- und Schweißstöße) sowie die Fahrflächenrauheit der Schienen. Ein dauerhafter Erhalt eines guten Zustands der genannten Gleiskomponenten wirkt sich somit unmittelbar auf die Immissionen in den benachbarten Gebäuden aus.

- ▶ Nutzen für das Verkehrsunternehmen
Eine dauerhafte (akustische) Überwachung der oben genannten Gleisbereiche bietet für die VU die Möglichkeit einer vorausschauenden und zielgerichteten Planung von Wartungs- und Erneuerungsarbeiten.
- ▶ Nutzen für die Anwohnenden
Eine regelmäßige Gleisüberwachung und die darauf beruhende Gleispflege garantiert dauerhaft geringe Schallemissionen und erhöht somit die Akzeptanz durch die Anwohnenden.

8 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Umsetzung Lärm reduzierender Maßnahmen bei Straßenbahnen

8.1 Relevante Akteurinnen und Akteure

Die kreisfreien Städte, Kreise, Zweckverbände, Verkehrsverbünde oder teilweise die Länder können als Aufgabenträger Kriterien in unterschiedlichen Verträgen und Plänen definieren. Es besteht die Möglichkeit diese Kriterien unter anderem im Nahverkehrsplan, in den Ausschreibungsdokumenten oder im finalen öffentlichen Dienstleistungsvertrag festzuhalten.

Die weiteren Akteurinnen und Akteure, die Verkehrsunternehmen und die Genehmigungsbehörden, besitzen jeweils einen begrenzten Handlungsspielraum. Die Verkehrsunternehmen müssen dabei die Vorgaben der Aufgabenträger aus den Verträgen und Plänen konkret umsetzen. Der Handlungsspielraum begrenzt sich somit auf die Auswahl der konkreten Fahrzeuge, der Maßnahmen an der Infrastruktur oder der Maßnahmen im Betriebsablauf. Aufgrund der oft hohen Investitionskosten für lärm mindernde Maßnahmen fehlt ein ausreichendes Anreizsystem für Verkehrsunternehmen in diesen Aspekt zu investieren. Lediglich die Faktoren Imagegewinn und technischer Vorreiter könnten Anreize sein.

Auch die Genehmigungsbehörde hat einen mehr ausführenden und kontrollierenden Auftrag als die Festsetzung von Schallemissionsgrenzwerten. Die Behörde ist für die Abnahme von Neubaustrecken oder neuen Fahrzeugen verantwortlich und muss dabei auf die Einhaltung der Grenzwerte und Normen achten. Nur bei nicht einhalten von Grenzwerten kann die Genehmigungsbehörde die Betriebserlaubnis verweigern oder einschränken.

Es hat sich herausgestellt, dass die Aufgabenträger den vorhandenen Spielraum zur Lärminderung im Vergabeverfahren für öffentliche Dienstleistungsaufträge nicht immer nutzen, um (lärmspezifische) Vergabekriterien zu definieren. Eine Ursache kann darin liegen, dass Lärminderungsmaßnahmen kostenintensiv sind und in der Regel von Seiten des Aufgabenträgers direkt oder indirekt auch zu tragen sind.

Auf der anderen Seite stehen insbesondere die Städte im Attraktivitätswettbewerb untereinander. Lebenswertigkeit ist ein Standortvorteil, zu dem auch eine Minimierung der Lärmemissionen gehört. Folglich sollten die Aufgabenträger im Straßenbereich ein ureigenes Interesse in der Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen besitzen, ohne Straßenbahnen im Wettbewerb der Verkehrssysteme untereinander zu benachteiligen.

8.2 Rechtliche bzw. organisatorische Werkzeuge

Grundsätzlich sollten aus Sicht des Immissionsschutzes die Regelungslücken im Ordnungsrecht beseitigt werden, das sind fehlende Geräuschemissionsgrenzwerte und fehlende Immissionsgrenzwerte für den Bestand). Aus den bisherigen Erfahrungen ist dies offensichtlich nur als langfristige Aufgabe umzusetzen.

Kurzfristig sind Geräuschemissionsvorgaben in Nahverkehrsplänen ein zielführendes Instrument. Diese können mittelfristig auch als Grundlage des öffentlichen Dienstleistungsauftrags dienen. Ihre bundesweite Verbindlichkeit und Harmonisierung – auch als Signal an die Herstellenden - müssen verbessert werden. Ein Bonusprogramm für besonders leise Straßenbahnen sollte mit einem Förderprogramm verknüpft werden. Als Regelungsbereich mit hoher Wirksamkeit sollten die Vorgaben für die Gleispflege verbessert werden.

Parallel dazu sind die Anlage 2 zur 16. BImSchV oder die nationale Umsetzung des CNOSSOS-Verfahren in Richtung einer differenzierteren Beschreibung der Emissionsannahmen für

Straßenbahnkomponenten weiterzuentwickeln, damit ein Katalog von amtlich zugelassenen leiseren Komponenten für die Straßenbahnen existiert.

8.3 Verfügbarkeit Lärm reduzierender Maßnahmen

Der Katalog von Maßnahmen ist umfangreich. Diese sind zu unterschiedlichen Investitionssummen und jährlichen Kosten einzubauen und zu betreiben.

Die Kostensätze der Lärminderungsmaßnahmen setzen sich zusammen aus den Neuinvestitionen und den Unterhaltungskosten (Instandhaltungskosten, Kosten für Betriebsmittel, usw.). Es sei darauf hingewiesen, dass die Daten zu Kosten und Lärminderungspotentialen hohen Unsicherheiten unterliegen. Einige technische Maßnahmen befinden sich noch in der Entwicklung oder sind noch recht neu und gingen über einige Testläufe bisher noch nicht hinaus.

8.4 Wirtschaftliche Aspekte lärmreduzierender Maßnahmen und Anreize zur Umsetzung

Die verschiedenen Maßnahmen wurden in den Ergebnissen nach ihrer Effizienz sortiert. Bei der Betrachtung der Kosten je Dezibel wurde von kostengünstig zu kostenintensiv sortiert. Bei der Nutzen-Kosten-Analyse fand die Sortierung der Anzahl Betroffenen, ab welcher sich solch eine Maßnahme rentiert, nach aufsteigender Betroffenheit statt. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Maßnahmen mit geringen Kosten und einer Rentabilität bereits mit wenigen Betroffenen zuerst durchgeführt werden sollen. Für eine erste Betrachtung der Maßnahmen ist der Einbezug der Betroffenheit also nicht unbedingt notwendig. Dafür reicht bereits ein einfacher Vergleich der Kosten je Dezibel.

Zusammengefasst ergeben sich insgesamt vier Schlüsselfaktoren, um schallmindernde Maßnahmen vergleichen zu können: Kosten je Dezibel und Kilometer, Anzahl der Betroffenen, Schall der Straßenbahn sowie Umgebungsschall. Eine Maßnahme rentiert sich am ehesten sozio-ökonomisch, je niedriger die Kosten sind, je höher die Betroffenheit, je schallintensiver das bisherige Straßenbahnsystem und je niedriger der Umgebungsschall.

Es hat sich herausgestellt, dass die Aufgabenträger den vorhandenen Spielraum zur Lärminderung im Vergabeverfahren für öffentliche Dienstleistungsaufträge nicht immer nutzen, um (lärmspezifische) Vergabekriterien zu definieren. Eine Ursache kann darin liegen, dass Lärminderungsmaßnahmen kostenintensiv sind und in der Regel von Seiten des Aufgabenträgers direkt oder indirekt auch zu tragen sind.

Lebenswertigkeit ist ein Standortvorteil, zu dem auch eine Minimierung der Lärmemissionen gehört. Folglich sollten die Aufgabenträger im Straßenbahnbereich ein ureigenes Interesse in der Umsetzung lärmreduzierender Maßnahmen besitzen, ohne Straßenbahnen im Wettbewerb der Verkehrssysteme untereinander zu benachteiligen (vgl. Abschnitt 8.1).

Um dieses zu beanreizen bietet sich an die Aufgabenträger diesbezüglich zu unterstützen, lärmreduzierende Maßnahme zu definieren und von den kommunalen Verkehrsunternehmen möglichst kostenneutral umsetzen zu lassen.

8.5 Vorteile eines Monitoringsystems

Eine akustische Fahrzeug- und Fahrwegüberwachung bietet erhebliche Vorteile für das Verkehrsunternehmen und für die betroffenen Anwohnenden.

In Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV wird von einem „durchschnittlich gepflegten Rad-Schiene-System“ ausgegangen. Auf diesen Zustand beruhen alle Korrekturwerte in der Verordnung und somit auch die berechneten Schallimmissionen. Um diesen Zustand zu bewahren sind die beiden folgenden Schritte unumgänglich:

- ▶ Bestandsaufnahme des Ist-Zustands für ein „durchschnittlich gepflegtes Rad-Schiene-System“ (i. S. d. 16. BImSchV) und
- ▶ regelmäßige Überprüfung dieses Zustands.

Diese Vorgehensweise garantiert den Anwohnenden, dass die berechneten Werte dauerhaft nicht überschritten werden und gibt den Verkehrsunternehmen starke Argumente für den Betrieb und den weiteren Ausbau des Streckennetzes an die Hand. Eine dauerhafte (akustische) Überwachung von Fahrzeugen und Gleisbereichen bietet für die Verkehrsunternehmen zudem die Möglichkeit einer vorausschauenden und zielgerichteten Planung von Wartungs- und Erneuerungsarbeiten. Eine regelmäßige Gleisüberwachung und eine darauf beruhende Gleispflege garantiert dauerhaft niedrige Schallemissionen und erhöht somit die Akzeptanz der Anwohnenden für den Straßenbahnbetrieb.

9 Literaturverzeichnis

Gesetze und Rechtsvorschriften

16. BImSchV: Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2269) geändert worden ist.

2002/735/EG: Entscheidung der Kommission vom 30. Mai 2002 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems gemäß Artikel 6 Absatz 1 der Richtlinie 96/48/EG (Text von Bedeutung für den EWR) (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2002) 1952). Fundstelle: ABl. L 245 vom 12.09.2002, S. 402-506.

2006/66/EG: Entscheidung der Kommission vom 23. Dezember 2005 über die Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge - Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2005) 5666). Fundstelle: ABl. L 37 vom 8.2.2006, S. 1.

2008/217/EG: Entscheidung der Kommission vom 20. Dezember 2007 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2007) 6440). Fundstelle: ABl. L 77 vom 19.03.2008, S. 1.

2008/C 115/13: Konsolidierte Fassungen des Vertrags über die Europäische Union und des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union. Fundstelle: ABl. C 115 vom 9. Mai 2008, S. 13.

24. BImSchV: Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung vom 4. Februar 1997 (BGBl. I S. 172, 1253), die durch Artikel 3 der Verordnung vom 23. September 1997 (BGBl. I S. 2329) geändert worden ist“.

34. BImSchV: Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung) vom 6. März 2006 (BGBl. I S. 516), die zuletzt durch Artikel 111 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

AEG: Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1795) geändert worden ist.

AEUV: Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (Konsolidierte Fassung). Fundstelle: ABl. C 326 vom 26.10.2012, S. 47.

Anlage 2 (zu § 4) 16. BImSchV: Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2269) geändert worden ist, Anlage 2 (zu § 4) Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03). Fundstelle: BGBl. I 2014, S. 2271 – 2313.

BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 103 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

BOStrab: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1410) geändert worden ist.

BUB: Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe); Anlage 1 zur Bekanntmachung der Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Absatz 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV). Fundstelle: BAnz AT 28.12.2018 B7.

BMU; BMVI (28.12.2018): Bekanntmachung der Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Absatz 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) vom 20. November 2018. Fundstelle: BAnz AT 28.12.2018 B7.

Durchführungsverordnung (EU) 2019/774: Durchführungsverordnung (EU) 2019/774 der Kommission vom 16. Mai 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 in Bezug auf die Anwendung der technischen

Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge -Lärm“ auf Bestandsgüterwagen.
Fundstelle: ABl. L 139 I vom 27.5.2019, S. 89.

GVFG: Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Januar 1988 (BGBl. I S. 100), das zuletzt durch Artikel 323 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

GVFG: Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Januar 1988 (BGBl. I S. 100), das zuletzt durch Artikel 463 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.

GVFG-SH: Gesetz über die Verwendung der Kompensationsmittel des Bundes nach Artikel 143c Absatz 1 des Grundgesetzes und der Landesmittel zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse der Gemeinden in Schleswig-Holstein (Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz Schleswig-Holstein) vom 24. Mai 2019 (GVObI. 2019 180).

LGVFG BW: Gesetz über Zuwendungen des Landes zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse der Gemeinden (Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz) vom 20. Dezember 2010 (GBl. 2010, S. 1062), zuletzt geändert durch Gesetz vom 19. November 2019 (GBl. S. 484).

NGVFG: Gesetz über Zuwendungen des Landes zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden (Niedersächsisches Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz) vom 27. März 2014 (Nds. GVBl. 2014, S. 79), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 24.10.2019 (Nds. GVBl. S. 309). Fundstelle: Nds. GVBl. 2014, 79.

ÖPNVFV: Verordnung über die Finanzierung des übrigen öffentlichen Personennahverkehrs im Land Brandenburg (ÖPNV-Finanzierungsverordnung) vom 3. Januar 2005 (GVBl. II/05, [Nr. 02], S. 42) zuletzt geändert durch Verordnung vom 18. Januar 2018 (GVBl. II/18, [Nr. 4]).

PBefG: Personenbeförderungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. August 1990 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 329 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

RegG: Regionalisierungsgesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378 ,2395), das zuletzt durch Artikel 19 Absatz 23 des Gesetzes vom 23. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3234) geändert worden ist.

RegG: Regionalisierungsgesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378 ,2395), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 14. Juli 2020 (BGBl. I S. 1683) geändert worden ist.

RL (EU) 2016/797: Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Fundstelle: ABl. L 138 vom 26.05.2016, S. 44.

RL 2001/43/EG: Richtlinie 2001/43/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 zur Änderung der Richtlinie 92/23/EWG des Rates über Reifen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern und über ihre Montage. Fundstelle: ABl. L 211, S. 25 vom 04.08.2001.

RL 2002/49/EG: Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. Fundstelle: ABl. L 189 vom 18.07.2002, S. 12.

RL 2008/50/EG: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Fundstelle: ABl. L 152 vom 11.6.2008, S. 1.

RL 2012/34/EU: Richtlinie 2012/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. November 2012 zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums (Neufassung). Fundstelle: ABl. L 343, S. 32 vom 14.12.2012.

RL 2014/24/EU: Richtlinie 2014/24/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 über die öffentliche Auftragsvergabe und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/18/EG. Fundstelle: ABl. L 94, S. 65 vom 28.3.2014.

RL 2014/25/EU: Richtlinie 2014/25/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 über die Vergabe von Aufträgen durch Auftraggeber im Bereich der Wasser-, Energie- und Verkehrsversorgung

sowie der Postdienste und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/17/EG. Fundstelle: ABl. L 94, S. 243 vom 28.3.2014.

Rili Mobilität: Richtlinie des Ministeriums für Infrastruktur und Landesplanung zur Senkung des CO₂-Ausstoßes im Verkehr gemäß Operationellem Programm des Landes Brandenburg für den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) in der Förderperiode 2014-2020 (Rili Mobilität) in der Fassung des Erlass vom 18.08.2016.

RL SFF: Richtlinie des Ministeriums für Verkehr über die Förderung von Schienenfahrzeugen (Richtlinie Schienenfahrzeugförderung – RL SFF) Vom 26.09.2017 (Az.: 3-3894.3/355).

RZÖPNV: Gemeinsame Bekanntmachung der Bayerischen Staatsministerien des Innern, für Bau und Verkehr und der Finanzen, für Landesentwicklung und Heimat über die Richtlinien für die Gewährung von Zuwendungen des Freistaates Bayern für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV-Zuwendungsrichtlinien – RZÖPNV) vom 6. Dezember 2017 (AllMBI. S. 538).

Schall 03: Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen (Ausgabe 1990). Fundstelle: ABl. der Deutschen Bundesbahn Nr. 14 vom 4. April 1990.

SchlärmschG: Schienenlärmschutzgesetz vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2804).

SchLV: Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über die Lärmzulässigkeit von Schienenfahrzeugen (Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung – SchLV) vom 26.03.1993 (BGBl. Nr. 414/1993) i. d. F. vom 23.08.2020.

TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5).

TR Sp: Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab); Mai 2006, Bearbeitungsstand März 2004.

VBUSch: Bekanntmachung der Vorläufigen Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Abs. 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) – Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen (VBUSch) vom 22. Mai 2006. Fundstelle: Bundesanzeiger 154a vom 17.08.2006.

Verordnung (EG) 1370/2007: Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Schiene und Straße und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 1191/69 und (EWG) Nr. 1107 des Rates. Fundstelle: ABl. L 315 vom 3.12.2007, S. 1.

Verordnung (EU) 1299/2014: Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Fundstelle: ABl. L 356 vom 12.12.2014, S. 1.

Verordnung (EU) 1302/2014: Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Fundstelle: ABl. L 356 vom 12.12.2014, S. 228.

Verordnung (EU) 1304/2014: Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU. Fundstelle: ABl. L 356 vom 12.12.2014, S. 421.

VwV-LGVFG: Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Verkehr zur Durchführung des Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes.

VV-EntflechtG/Verkehr: Verwaltungsvorschriften zur Durchführung von § 3 Abs. 1 des Entflechtungsgesetzes - RdErl. des MLV vom 12. 7. 2007 – 34-30117/31332.

Normen und Regelwerke

DIN EN ISO 266, 1997-08: Akustik - Normfrequenzen (ISO 266:1997).

DIN 1320, 2009-12: Akustik – Begriffe.

ISO 1996-2, 2017-07: Akustik - Beschreibung, Messung und Beurteilung von Umgebungslärm - Teil 2: Bestimmung vom Schalldruckpegeln.

DIN EN ISO 3095, 2014-07: Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013.

DIN 4150-1, 2001-06: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen.

DIN 4150-2, 1999-6: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.

ISO 14837-1, 2005-07: Mechanische Schwingungen - Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr - Teil 1: Allgemeine Anleitungen.

E DIN EN 15610, 2017-10: Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Schienen- und Radrauhheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen; Deutsche und Englische Fassung prEN 15610:2017.

E DIN 38452-1, 2020-03: Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen - Teil 1: Emissionen; Text Deutsch und Englisch.

DIN 45645-1, 1996-07: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft.

DIN 45672-1, 2018-02: Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen - Teil 1: Messverfahren für Schwingungen.

VDI 3722 Blatt 2, 2013-05: Wirkung von Verkehrsgeräuschen - Blatt 2: Kenngrößen beim Einwirken mehrerer Quellenarten.

VDI 3722 Blatt 1, 1988-08: Wirkungen von Verkehrsgeräuschen.

VDI 3837, 2013-01: Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen - Spektrales Prognoseverfahren.

Weitere Quellen

Albert, Holger; Raquet, Erwin (1979): Gummigefederte Räder in Leichtbauweise zur Geräuschminderung der U-Bahn-Fahrzeuge der Hamburger Hochbahn AG. Sonderdruck aus Verkehr und Technik. Fried. Krupp Hüttenwerke AG. Bochum (Heft 1/1979).

Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (2019): Rillenschienenbewässerung auf dem Betriebshof Gerwigstraße der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH sowie in der Wendeschleife Rheinstetten „Bach West“. Karlsruhe, 21.11.2019. E-Mail an STUVA e. V.

Arx, Johannes von (2001): Cobra: Die neue Generation der Züricher Straßenbahn. In: *Der Nahverkehr* 19 (11), S. 28–32.

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) (2005): Studie zur Kostenverhältnismäßigkeit von Schallschutzmaßnahmen. Grundsätze für die Prüfung nach § 41 Abs. 2 Bundes-Immissionsschutzgesetz. Augsburg (Schriftenreihe, Heft 176).

Berndt, P. (1987): Untersuchung zur Geräuschminderung bei Scheibenbremsen im Schienennahverkehr. Bericht 12 im Rahmen des BMFT-Forschungsprogramms „Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden, Teilprogramm Schienennahverkehr“. Knorr-Bremse AG. München.

Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH (2019): Prinzipieller Aufbau eines Schwingungsdämpfers - Beispielbild. Bochum, 20.09.2019. E-Mail an STUVA e. V.

Brandi, Clara; Messner, Dirk (2015): Urbanisierung: Ein Megatrend, der unsere Zukunft bestimmt. In: *Diplomatisches Magazin* 56 (2), S. 36–39.

Bremer Straßenbahn AG (2020): Das neue Schienenschleiffahrzeug der Bremer Straßenbahn AG. Bremen, 02.10.2020. E-Mail an STUVA e. V.

Bugarcic, Helmut; Thevis, Peter; Breznovsky, Milan; Lierke, Klaus (1986): Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden. Teilprogramm Schienennahverkehr. Primärunterdrückung der Bogenlaufgeräusche durch alternative Radsatzstell- und -steuerungsmechanismus (Förderungskennzeichen TV 8458 A 3). Abschlussbericht. Hg. v. Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT). Technische Universität Berlin, Institut für Fahrzeugtechnik (Bericht 21).

Bundesministerium der Finanzen (2018): Steuern. Neuregelung der Grundsteuer. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/2018-11-29-Neuregelung-der-Grundsteuer.html>, zuletzt geprüft am 07.09.2020.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016): Lärmschutz im Schienenverkehr. Alles über Schallpegel, innovative Technik und Lärmschutz an der Quelle. 4. Auflage. Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2020): Lärmvorsorge und Lärmsanierung an Schienenwegen. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/laermvorsorge-und-laermsanierung.html>, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009): Nationales Verkehrslärmschutzpaket II. Lärm vermeiden – vor Lärm schützen.

Danneskiold-Samsøe, Ulrik; Kalivoda, Manfred; Krüger, Friedrich; Barsikow, Bernd (2001a): A Study of European Priorities and Strategies for Railway Noise Abatement. Annex II, Retrieval of System Cases, Report 01.979. EU Commission, Directorate-General for Energy and Transport (Bruxelles). Belgium.

Danneskiold-Samsøe, Ulrik; Krüger, Friedrich; Kalivoda, Manfred; Barsikow, Bernd (2001b): A Study of European Priorities and Strategies for Railway Noise Abatement. Annex II. Retrieval of System Cases. Report 01.980, ODS Reference No.: 00.2335.

DB Netz AG (2012): Innovative Maßnahmen zum Lärm- und Erschütterungsschutz am Fahrweg. Schlussbericht. Frankfurt am Main.

Dittrich, M. G. (TNO); Hemsworth, B. (ERRI) (1997): History and Status Quo of International Standards for Measurement of Exterior Railway Noise.

Ehrmann, Heike; Naumann, René; Petersen, Thomas; Ronnisch, Oliver; Tegner, Henning; Wanner, Karen (2013): Neue Finanzierungsinstrumente für die ÖPNV-Infrastruktur. Untersuchung im Rahmen der Arbeiten für die ÖPNV-Zukunftskommission NRW. Untersuchung für die ÖPNV-Zukunftskommission NRW. KCW GmbH. Berlin.

Eichmann, Volker (2006): Europäischer Nahverkehr: Planung - Organisation - Finanzierung. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu) (Difu-Berichte, 2/2006), zuletzt geprüft am 24.09.2018.

EuGH, Urteil vom 21.03.2019, Aktenzeichen C-266/17 und C-267/17. In: *NWB Datenbank*.

European Commission (2004): Richtlinienentwurf zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Einrichtungen des städtischen schienengebundenen Personennahverkehrs (ESSGPNV).

European Commission (2005): Report on the results of the Consultation of Stakeholders concerning possible Technical Harmonisation Legislation addressing the Urban Rail Sector. Brüssel.

European Commission (2011): Mandate for Programming and Standardisation addressed to the European Standardisation Bodies in the Field of Urban Rail. Information zum Normungsauftrag M/486. Brüssel. Online verfügbar unter <http://www.etsi.org/images/files/ECMandates/m486.pdf>.

European Commission (2012): Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). Luxembourg (JRC Reference Reports, JRC72550).

Fehndrich, Martin (2009): Influence of impurities between train wheels and wheel damper on the effectiveness of the damper. Tram Noise. NAG/DAGA 2009. Acoustical Society of the Netherlands (NAG); Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Rotterdam (NL), 25.03.2009. Online verfügbar unter http://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000257.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2020.

Fehr, Ernst; Schmidt, Klaus M. (2006): The Economics of Fairness, Reciprocity and Altruism – Experimental Evidence and new Theories. Chapter 8. In: Serge-Christophe Kolm und Jean Mercier Ythier (Hg.): Handbook of the economics of giving, altruism and reciprocity. Volume 1: Foundations. 1st ed. Amsterdam: Elsevier (Handbooks in economics, 23), S. 615–691.

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen EWS-97.

Forschungsverbund Leiser Verkehr (2010): Kurvengeräusche. Leise Züge und Trassen. Geräusche im Schienennahverkehr. Zusammenfassung. Forschungsvorhaben „Verbundprojekt Leiser Verkehr“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. FKZ 19 U 5001.

Gerike, Regine (2016): Forschungs-Informationssystem (FIS). Mobilität und Verkehr. Die Lästigkeit des Schienenverkehrslärms - der Schienenbonus-Korrekturwert. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/?49189>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

Gerndt, Helmut (1983): Erprobung verbesserter Komponenten an einem Stadtbahnwagen mit dem Ziel der Lärminderung. Schlussbericht zum Forschungsprojekt Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden. Teilprogramm Schienennahverkehr - Teilprogramm Schienennahverkehr (FKZ TV 7860 7) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT). Rhein-Consult GmbH; DUEWAG AG (BMFT-Forschung, Bericht 14).

Gies, Jürgen; Hanke Stefanie; Darmochwal, André; Naumann, René; Pasold, Stephanie (2016): Grundsteuer/Kreisumlage und Arbeitgeberbeitrag. Gutachten im Auftrag des MDV Mitteldeutscher Verkehrsverbund GmbH. KCW GmbH; Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu). Berlin.

Grüngleis Netzwerk (2014): Handbuch Gleisbegrünung. Planung - Ausführung - Pflege. Hamburg: DVV Media - Eurailpress.

Hamburg Institut Research gGmbH (2015): Fahrscheinlos. Grundlagen- und Machbarkeitsstudie Fahrscheinloser ÖPNV in Berlin. Gutachten im Auftrag der Piratenfraktion im Abgeordnetenhaus von Berlin. Berlin.

Hartenstein, Moritz (2018): Kompakte Schienenfräse für flexible Einsätze. In: *Der Eisenbahningenieur* 69 (7), S. 32–36.

Hartleben, Dieter (2003): Schienenschleifen als Maßnahme der Lärmvorsorge und Lärmsanierung. In: *Der Eisenbahningenieur* 54 (8), S. 22–28.

Hecht, Markus; Krüger, Friedrich (2006): Grundlagen der Schallminderung. In: Wilfried J. Bartz und Elmar Wippler (Hg.): Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Grundlagen der Schall- und

Schwingungstechnik – Praxisorientierte Anwendung von Schall- und Erschütterungsmaßnahmen. Expert-Verlag. Renningen (Kontakt & Studium, Band 565), S. 258–303.

Hensel, Eric; Zumach, Sebastian; Troge, Jan (2016): Akustische Optimierung eines Bahngetriebes. In: *Der Eisenbahningenieur* 67 (06), S. 6–11.

ICLEI Europasekretariat (2004): Zukunftsfähiger öffentlicher Nahverkehr für Europa. Gute Beispiele nachmachen. Freiburg.

INNOTec Systems GmbH (2020): Lasergestützte Radkraftdiagnose Typ „LASCA®“ zur Ermittlung von Rad-Schiene-Kräften und Bewertung von Laufflächenschäden unter Betriebsbedingungen. Eppelsheim. Online verfügbar unter <http://www.innotec-systems.de/index.php/produkte/lasca.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

INTRAPLAN Consult GmbH (2016): Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr – Version 2016. Verfahrensanleitung. Erstellt im Rahmen des FE-Projektes 70.893/2014 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. München.

Jaecker, M.; Rogall, H. (1993): Benutzervorteile für lärmarme Lastkraftwagen - das Heidelberger Modell. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 40 (6), S. 161–168.

Janicki, Jürgen; Reinhard, Horst; Rüffer, Michael (2013): Schienenfahrzeugtechnik. 3. Aufl. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH.

Johnston, Raymond (2016): Noise rules may stop night trams. Prague.TV. Prag. Online verfügbar unter <http://prague.tv/en/s72/Directory/c207-Travel/n8029-Noise-rules-may-stop-night-trams>, zuletzt aktualisiert am 28.12.2016, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

Kofmehl, André (2011): Kurvenkreischen muss nicht sein. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (01+02), S. 38–39.

Kofmehl, André (2013): Kurvengeräusche - Vermeiden durch Friction Modifier. In: Friedrich Krüger (Hg.): *Kurvengeräusche. Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen*. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Schriftenreihe für Verkehr und Technik, 97), S. 183–188.

Koller, Günther (2018): Einfluss der Gleisabklingrate auf Schallschutzmaßnahmen. In: *Der Eisenbahningenieur* 69 (6), S. 25–27.

König, R. (2016): Forschungs-Informations-System (FIS). Mobilität und Verkehr. Organisation des ÖPNV. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/23405/>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

König, R. (2017a): Forschungs-Informations-System (FIS). Mobilität und Verkehr. Europäischer Rahmen der ÖPNV-Gesetzgebung. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/14094>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

König, R. (2017b): Forschungs-Informations-System (FIS). Mobilität und Verkehr. ÖPNV-Gesetze der Bundesländer. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/218476/>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

König, R. (2017c): Forschungs-Informations-System (FIS). Mobilität und Verkehr. Verordnung (EG) 1370/2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Straße und Schiene. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/208032/>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

König, R. (2017d): Forschungs-Informations-System (FIS). Mobilität und Verkehr. Nahverkehrsplan. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/476201/>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

Krüger, Friedrich (2000): Leiser Schienennahverkehr. In: *Der Nahverkehr* 18 (5), S. 36–44.

Krüger, Friedrich (2006a): Physikalische Grundlagen. In: Wilfried J. Bartz und Elmar Wippler (Hg.): Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Grundlagen der Schall- und Schwingungstechnik - Praxisorientierte Anwendung von Schall- und Erschütterungsschutzmaßnahmen. 2. Aufl. Renningen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 565), S. 21–65.

Krüger, Friedrich (2006b): Schall- und Schwingungsanregung beim Schienenverkehr. In: Wilfried J. Bartz und Elmar Wippler (Hg.): Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Grundlagen der Schall- und Schwingungstechnik - Praxisorientierte Anwendung von Schall- und Erschütterungsschutzmaßnahmen. 2. Aufl. Renningen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 565), S. 177–197.

Krüger, Friedrich (2008): Schall- und Rauheitsmessungen bei der KVB AG zur Feststellung der akustischen Wirkung von Schleifen und Fräsen der Schienen. Bericht 2008/Colas Rail 8063-001 im Auftrag von Colas Rail Agence Travaux Spéciaux. Unter Mitarbeit von Klaus Martini und Detlef Amende. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA); STUVAtec GmbH. Köln.

Krüger, Friedrich (2016): Schallschutz bei Schienenbahnen. Einführung, Überblick, Grundlagen. Technische Akademie Esslingen, 26.10.2016.

Krüger, Friedrich; Becker, Heinz; Kasten, Peter; Prüm, Peter; Krüger, Roland (1994): Kurvenquietschen im Schienennahverkehr. Schall 03 – Pilotstudie. Ermittlung von Korrekturwerten zur Berücksichtigung des pegelerhöhenden Kurvenquietschens in der Schall 03 beim Durchfahren enger Gleisbögen im Schienennahverkehr. Schlussbericht Forschungsbericht FE-Nr. 70 413/93. Hg. v. Bundesminister für Verkehr. STUVA e. V.

Krüger, Friedrich; Fürst, Peter; Schubert, Rainer (1993/2005): Geräuschminderung an Tatra-Straßenbahnen. Informationsschrift zum Forschungsvorhaben Nr. 105 05 151 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Neubearbeitung September 2005. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. - STUVA. Köln.

Krüger, Friedrich; Witte, G. (2005): Unterschiede im akustischen Verhalten von Schwellengleisen - Geräuschuntersuchungen an Gleisen mit Holz- und Betonschwellen bei der Hamburger U-Bahn - Auswertungen im Frequenzbereich. In: *Der Nahverkehr* (5), S. 34–43.

Land Berlin (2019): Nahverkehrsplan Berlin 2019 - 2023. Stand 27. Februar 2019. Berlin.

Landeshauptstadt Dresden (2015): Vorabinformation zur beabsichtigten Direktvergabe eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags der Landeshauptstadt Dresden über die Linienbündel Straßenbahn Dresden und Bus Stadt Dresden als Gesamtleistung an die Dresdner Verkehrsbetriebe AG. Dresden.

Landeshauptstadt Stuttgart (2016): Direktvergabe der Verkehrsleistungen an die Stuttgarter Straßenbahnen AG. Beschlußvorlage. GR Drs 720/2017 vom 21.09.2016. Stuttgart.

LuFV: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Eisenbahninfrastrukturunternehmen der Deutschen Bahn AG (inkl. Erster Nachtrag gültig ab dem 1. Januar 2010).

Lenz, Christofer; Jürschik, Corina (2018): Wie der EuGH entscheiden sollte - Direktvergabe: Richtige Antworten auf die Vorlage des OLG Düsseldorf. In: *Der Nahverkehr* 36 (03), S. 44–47.

Lenz, Udo (2016): Schall und Erschütterungen bei Bahnen nach BOStrab. Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen. Berlin: Erich Schmidt (Verkehr und Technik, 98).

Lichtberger, Bernhard (2003): Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg: Tetzlaff.

Liepert, Manfred; Lang, Johannes; Möhler, Ulrich; Schreckenberger, Dirk; Benz, Sarah; Gillé, Michael et al. (2019): Modell zur Gesamtlärbewertung. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zur Forschungskennzahl 3715 55 1030, FB000020. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 60/2019).

Lutzenberger, Stefan; Nickisch, Stefan; Wloka, Philipp (2013): Strategische Wartung von Schienenfahrzeugen mit Monitoring. Am Beispiel der Polygonisierung von Rädern bei der VAG Nürnberg. In: *Der Nahverkehr* 31 (9), S. 10–17.

Lutzenberger, Stefan; Spiegler, Peter; Ninnemann, Henry (2008): Automatische Zustandsüberwachung von Straßenbahnradern und Optimierung der Wartungskosten. Bahntechnik-Fachtagung am 14. und 15. Februar 2008, Berlin. In: *Bahntechnik aktuell* (14), S. 51–68.

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (2018): Lärmaktionspläne. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mensch-umwelt/laermschutz/laermkarten-und-aktionsplaene/laermaktionsplaene/>, zuletzt geprüft am 06.09.2019.

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau (2018): Städtebauliche-Lärmfibel 2018. Hinweise für die Bauleitplanung. Völlig überarbeitete Neuauflage der Städtebaulichen Lärmfibel 1991. Stuttgart.

Mitusch, Kay; Gipp, Christoph; Brenck, Andreas; Hecht, Markus; Götz, Gernoth; Liebing, Sascha et al. (2017): Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms. Endbericht zum Forschungsprojekt FKZ 3712 54 100 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 19/2017).

Moser, Peter; Stock, Richard (2018): Flexible Schienenfrästechnologien für den innerstädtischen Bereich. In: *Der Eisenbahningenieur* 69 (7), S. 38–41.

Müller, Gerhard; Möser, Michael (1994): Kap. 17 – Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr. Dritte, erweiterte und überarbeitete Auflage. In: *Taschenbuch der Technischen Akustik*, S. 83 ff.

Myck, Thomas (2015): Die Lärmsituation in Deutschland nach der Umgebungslärmrichtlinie. Soundscape – Akustische Gestaltung von Umgebungen nach neuen Standards. DEGA-Symposium. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Berlin, 02.10.2015.

Polyplan GmbH (2006): Forschungsvorhaben Kurvenquietschen - Maßnahmen zur Minderung der Kurvengeräusche an Rad und Schiene. Ermittlung von Materialkennwerten von Polyurethanen. Forschungsverbund Leiser Verkehr.

Prima Ideenwettbewerb (2013): Schienenkopfbenetzung – das Schienenkreischen erfolgreich besiegt! Bremen. Online verfügbar unter <http://www.prima-wettbewerb.de/bogestra-sieger-2013/>, zuletzt geprüft am 10.10.2018.

Ramboll Deutschland GmbH (2016): Mobilität der Zukunft in Schleswig-Holstein. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Technologie des Landes Schleswig-Holstein. Hamburg.

Rheinbahn AG (2020): HSG City im Einsatz bei der Rheinbahn AG in Düsseldorf. Düsseldorf, 15.09.2020. E-Mail an STUVA e. V.

Robel Bahnbaumaschinen GmbH (2020): Bildbeispiele für den Einsatz von Handschleifmaschinen. Freilassing, 16.09.2020. E-Mail an STUVA e. V.

Rodriguez, Natalie (2010): Advanced maintenance concepts to be included in design of new systems. Urban Track Project, Deliverable 2.9. Karlsruhe.

Rupp, Thomas (2013): Wasserbenetzungsanlage in Karlsruhe. In: Friedrich Krüger (Hg.): Kurvengeräusche. Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Schriftenreihe für Verkehr und Technik, 97), S. 117–120.

Schnaas, Jürgen; Karl, Bernd (2015): Avenio T1 - die neue Straßenbahn für München. In: *Der Nahverkehr* (11), S. 23–29.

Schulz, Eckhard (Hg.) (2008): Moderne Straßenbahnen 2008. Fahrzeugtechnik, Infrastruktur, Akustik, Bahntechnik. Fachtagung Bahntechnik. Berlin, 14./15.02.2008. IFV Bahntechnik e. V. 1. Aufl. Berlin: Verl. des IFV Bahntechnik (Bahntechnik aktuell Proceedings, 14).

Sekisui Chemical GmbH; Koocoo Technology & Consulting GmbH (2020): Nutzungsrechte für Bildmaterial der Schienenstegabschirmung (SSA) Calmoon der Sekisui Chemical GmbH. Wien, 17.09.2020. E-Mail an STUVA e. V.

Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (Berlin) (2008): Lärminderungsplanung für Berlin. Materialien zum Aktionsplan. Berlin. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/laerm/laermminderungsplanung/download/laermaktionsplan/materialien/bericht_lokale_bahnen.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (Berlin) (2013): Umweltatlas Berlin. Strategische Lärmkarten (Ausgabe 2013). Straßenverkehr. Berlin. Online verfügbar unter http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/da705_04.htm#Tab5, zuletzt geprüft am 02.04.2020.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (Berlin) (2017): Umweltatlas Berlin. Strategische Lärmkarten (Ausgabe 2017). Straßenbahn-/U-Bahnverkehr. Berlin. Online verfügbar unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db705_05.htm, zuletzt geprüft am 02.04.2020.

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (Berlin) (o. J.): Berlin wird leiser. Weitere Stimmen zur Lärmaktionsplanung. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/leises-berlin/informationen/zum-hintergrund/artikel.697703.php>, zuletzt geprüft am 24.04.2020.

Stadtwerke München GmbH; Polyplan GmbH (2009): Kurvengeräusche. Arbeitspaket Maßnahmen an Rad und Schiene. Teilprojekt Entwicklung einer Radbedämpfung. Schlussbericht. Forschungsvorhaben „Verbundprojekt Leiser Verkehr“ im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. FKZ 19 U 5001B. Unter Mitarbeit von BÜFA Polyurethane GmbH & Co. KG, TU Berlin, Fachgebiet der Technischen Akustik, SFE GmbH und I.B.U. Ing.-Büro Uderstädt + Partner.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2004): Entwicklung einer Prüfstrecke für die Geräuschttypprüfung von Schienenfahrzeugen des Nahverkehrs. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. FKZ (UFOPLAN) 203 54 115/02. Köln.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2007a): Handlungsempfehlungen zur Lärminderung im innerstädtischen Schienenpersonennahverkehr. Berichtsteil. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 204 54 150 im Rahmen des Umweltforschungsplans 2004 (UFOPLAN 2004). Köln.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2007b): Handlungsempfehlungen zur Lärminderung im innerstädtischen Schienenpersonennahverkehr. Anhang zum Schlussbericht. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 204 54 150 im Rahmen des Umweltforschungsplans 2004 (UFOPLAN 2004). Köln.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2009a): Kurvengeräusche. Entwicklung von anwendungsreifen und wirksamen Maßnahmen zur Reduzierung von Kurvenquietschen an Rad und Schiene. Teilvorhaben STUVA: Phänomenologische Beschreibung von Kurvengeräuschen. Abschlussbericht. Forschungsvorhaben „Verbundprojekt Leiser Verkehr“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. FKZ 19 U 5001H. Köln.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2009b): Kurvengeräusche. Entwicklung von anwendungsreifen und wirksamen Maßnahmen zur Reduzierung von Kurvenquietschen an Rad und Schiene. Teilvorhaben STUVA: Phänomenologische Beschreibung von Kurvengeräuschen. Langzeituntersuchungen in Gleisbögen – Wirkung von Dämpfungselementen. Anhang A

zum Abschlussbericht. Forschungsvorhaben „Verbundprojekt Leiser Verkehr“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. FKZ 19 U 5001H. Köln.

STUVA – Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.; STUVAtec GmbH (2010): Untersuchungen zur schall- und erschütterungstechnischen Wirkung von Gleisen in Straßenverkehrsbahnen sowie zu deren Dauerhaltbarkeit unter Belastung durch LKW und Busse. Teil 2: Akustik. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 70.816/2008 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Köln.

Umweltbundesamt (2017a): Die Stadt für Morgen. UBA-Forum 2017. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/uba-forum-mobil-nachhaltig-dokumentation>, zuletzt geprüft am 31.01.2020.

Umweltbundesamt (2017b): Minderung des Lärms von Straßenbahnen im urbanen Raum. Leistungsbeschreibung zum Projekt mit Forschungskennzahl (FKZ) 3717 54 102 0. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2018a): Lärmaktionsplanung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/umgebungs-laermrichtlinie/laermaktionsplanung>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

Umweltbundesamt (2018b): Lärmkarten. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/umgebungs-laermrichtlinie/laermkarten>, zuletzt geprüft am 24.09.2018.

Umweltbundesamt (2019a): Verkehrslärm. Zielwerte der Lärmbekämpfung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm#textpart-2>, zuletzt aktualisiert am 23.10.2019, zuletzt geprüft am 28.08.2020.

Umweltbundesamt (2019b): Umgebungslärmrichtlinie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/umgebungs-laermrichtlinie>, zuletzt aktualisiert am 14.03.2019, zuletzt geprüft am 28.08.2019.

Umweltbundesamt (2020): Gesundheitsrisiken durch Umgebungslärm. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-umgebungs-laerm>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2020, zuletzt geprüft am 28.08.2020.

Umweltministerkonferenz (2001): 57. Umweltministerkonferenz am 29./30.11.2001 in Bremen. Ergebnisniederschrift. Bremen.

Üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG (2020): Überlaufherzstück am Abstellgleis des Endpunktes „Alte Heide“. Hannover, 28.09.2020. E-Mail an STUVA e. V.

van Leuven, André (2009): Squeal noise mitigation in urban rail surface transport. Tram Noise. NAG/DAGA 2009. Acoustical Society of the Netherlands (NAG); Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Rotterdam (NL), 25.03.2009. Online verfügbar unter http://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000128.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2008): Hinweise zum Immissionsschutz. Ein Rechtsleitfaden für Unternehmen. Köln (VDV-Mitteilung, 9042).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2011a): Geräusche in Gleisbögen des schienengebundenen ÖPNV - Handlungsempfehlungen zu ihrer Verminderung. Köln (VDV-Schriften, 611).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2011b): Geräusche von Schienenfahrzeugen des Öffentlichen Personen-Nahverkehrs (ÖPNV). Köln (VDV-Schriften, 154).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2019): Oberbau-Arten und Oberbau-Formen bei Nahverkehrsbahnen. Ausgabe 10/2019. Köln (VDV-Schriften, 604).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.; VDV Industrieforum e. V. (2014): Stadtbahnssysteme. Grundlagen – Technik – Betrieb – Finanzierung. Hamburg: DVV Media Group GmbH - Eurailpress.

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.; VDV-Förderkreis e. V. (2010): Nachhaltiger Nahverkehr. Beiträge des ÖPNV zum Umwelt- und Klimaschutz. 2 Bände. Düsseldorf: Alba Fachverlag (2).

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.; VDV-Förderkreis e. V. (Hg.) (2007): Fahrwege der Bahnen im Nah- und Regionalverkehr in Deutschland. Düsseldorf: Alba Fachverlag.

Wei, Yunfan (2014): Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST).

Werner, M. (1991): Schall 03 – Entstehungsgeschichte und Dokumentation. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 38 (5), S. 128–131.

A Anhang

A.1 Ergebnisse der Nutzen-Kosten-Analyse

A.1.1 Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1

Tabelle 32: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	1,5	~ 300	~ 40	4,8	65
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 100	1,95	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 100	1,95	160
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	16,5	~ 1.900	~ 200	0,51	615
21	Radabsorber am Radreifen	1,5	~ 300	~ 400	0,46	680
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	16,5	~ 1.900	~ 300	0,38	820
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	16,5	~ 1.900	~ 600	0,2	1.585
15	Absorptionskörper im Gleis	1,5	~ 300	~ 1.200	0,16	1.930
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	1,5	~ 300	~ 2.300	0,08	3.775
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 3.500	0,05	6.875

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	~ 4.700	0,03	10.350
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	4,5	~ 800	~ 6.400	0,03	11.445
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 300	~ 17.500	0,01	28.300
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 300	~ 18.200	0,01	29.380
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 19.100	0,01	30.395

Tabelle 33: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	4,5	~ 800	~ 60	13,07	25
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,95	160
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich (bei einer Weiche)	7,5	~ 1.200	~ 750	1,57	200
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	1,5	~ 300	~ 3.800	0,08	4.045
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	1,5	~ 300	~ 5.000	0,06	5.390

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 26.000	0,05	6.875
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	~ 21.200	0,04	8.450
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	1,5	~ 300	~ 9.700	0,03	10.460
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 300	~ 26.300	0,01	28.300
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 300	~ 27.300	0,01	29.375
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.940
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.940

Tabelle 34: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 1 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
1a	Gleisbogenradius < 50 m	16,5	~ 1.900	~ 150	12,85	25
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 1.500	~ 150	10,02	30
21	Radabsorber am Radreifen	13,5	~ 1.800	~ 650	2,75	115
19	Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	13,5	~ 1.700	~ 2.100	0,83	375
18	Spurkranzschmierung	3	~ 600	~ 1.900	0,29	1.060
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	4,5	~ 800	~ 3.500	0,22	1.400
14	Schienenkopfflankenschmierung	1,5	~ 300	~ 1.900	0,15	1.995
12	Schienenkopf-Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	13,5	~ 1.700	~ 13.300	0,13	2.390
13	Schienenkopf-Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	13,5	~ 1.700	~ 13.300	0,13	2.390
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 26.000	0,05	6.875
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	21.200	0,04	8.450
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	4,5	~ 800	~ 26.300	0,03	10.470
6	Schienenstegabschirmung	4,5	~ 800	~ 27.300	0,03	10.865
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.950

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.950

A.1.2 Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2

Tabelle 35: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	1,5	~ 100	~ 60	1,63	190
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 100	~ 150	0,66	475
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 100	~ 150	0,66	475
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	16,5	~ 400	~ 3.800	0,09	3.330
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 200	~ 21.200	0,09	36.080
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	16,5	~ 400	~ 5.000	0,07	4.440
15	Absorptionskörper im Gleis	1,5	~ 100	~ 1.800	0,05	5.680
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	16,5	~ 400	~ 9.700	0,04	8.610
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	1,5	~ 100	~ 3.500	0,03	11.105
21	Radabsorber am Radreifen	1,5	~ 100	~ 650	0,02	1.990
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 300	~ 26.000	0,01	27.825
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	4,5	~ 200	~ 28.700	0,01	39.900
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 100	~ 26.300	0	83.285

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 100	~ 27.300	0	86.455
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 100	~ 28.700	0	91.090

Tabelle 36: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	4,5	~ 200	~ 60	3,74	85
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 100	~ 150	0,66	470
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 100	~ 150	0,66	470
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich (bei einer Weiche)	7,5	~ 300	~ 750	0,39	805
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	1,5	~ 100	~ 3.800	0,03	11.900
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	1,5	~ 100	~ 5.000	0,02	15.865
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 300	~ 26.000	0,01	27.825
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 200	~ 21.200	0,01	29.460

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	1,5	~ 100	~ 9.700	0,01	30.790
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 100	~ 26.300	0	83.285
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 100	~ 27.300	0	86.460
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 100	~ 28.700	0	91.090
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 100	~ 28.700	0	91.090

Tabelle 37: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 2 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
1a	Gleisbogenradius < 50 m	16,5	~ 400	~ 150	2,36	135
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 300	~ 150	2,18	145
21	Radabsorber am Radreifen	13,5	~ 300	~ 650	0,54	575
19	Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	13,5	~ 300	~ 2.000	0,16	1.885
18	Spurkranzschmierung	3	~ 200	~ 1.900	0,09	3.405
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	4,5	~ 200	~ 3.500	0,06	4.865
14	Schienenkopfflankenschmierung	1,5	~ 100	~ 1.900	0,05	5.930
12	Schienenkopf-Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	13,5	~ 300	~ 13.300	0,03	12.070
13	Schienenkopf-Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	13,5	~ 300	~ 13.300	0,03	12.070
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 300	~ 26.000	0,01	27.825
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 200	~ 21.200	0,01	29.460
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	4,5	~ 200	~ 26.300	0,01	36.490
6	Schienenstegabschirmung	4,5	~ 200	~ 27.300	0,01	37.880
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 100	~ 28.700	0	91.055

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 100	~ 28.700	0	91.055

A.1.3 Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3

Tabelle 38: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Rollgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	1,5	~ 300	~ 60	4,87	65
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	16,5	~ 2.000	~ 3.800	0,54	580
21	Radabsorber am Radreifen	1,5	~ 300	~ 650	0,46	675
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	16,5	~ 2.000	~ 5.000	0,4	775
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	16,5	~ 2.000	~ 9.700	0,21	1.505
15	Absorptionskörper im Gleis	1,5	~ 300	~ 1.800	0,16	1.920
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	1,5	~ 300	~ 3.500	0,08	3.740
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 26.000	0,05	6.760
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	~ 21.200	0,03	10.230
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	4,5	~ 800	~ 28.700	0,03	11.310
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 300	~ 26.300	0,01	28.065
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 300	~ 27.300	0,01	29.135

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.685

Tabelle 39: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Stoßgeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
9	Schräger Isolierstoß (bei 40 Stück pro km)	4,5	~ 800	~ 60	13,22	25
1a	Gleisbogenradius < 50 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	1,5	~ 300	~ 150	1,96	160
10	Bewegliche Herzstücke im Weichenbereich (bei einer Weiche)	7,5	~ 1.200	~ 750	1,60	195
2	Schleifen der Schienenfahrfläche	1,5	~ 300	~ 3.800	0,08	4.010
4	Fräsen, Hobeln der der Schienenfahrfläche	1,5	~ 300	~ 5.000	0,06	5.345
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 26.000	0,05	6.760
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	~ 21.200	0,04	8.350
3	Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)	1,5	~ 300	~ 9.700	0,03	10.370
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	1,5	~ 300	~ 26.300	0,01	28.065
6	Schienenstegabschirmung	1,5	~ 300	~ 27.300	0,01	29.135

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.650
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.650

Tabelle 40: Beispiel Nutzen-Kosten-Rechnung Ergebnis Szenario 3 - Kurvengeräusche

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
1a	Gleisbogenradius < 50 m	16,5	~ 2.000	~ 150	13,53	25
1b	Gleisbogenradius 50 m < 200 m	10,5	~ 1.500	~ 150	10,27	30
21	Radabsorber am Radreifen	13,5	~ 1.800	~ 650	2,85	110
19	Benetzung Schienenfahrfläche vom Fahrzeug aus	13,5	~ 1.800	~ 2.000	0,86	360
18	Spurkranzschmierung	3	~ 600	~ 1.900	0,3	1.050
11	Auftragsschweißen in Gleisbögen	4,5	~ 800	~ 3.500	0,23	1.380
14	Schienenkopfflankenschmierung	1,5	~ 300	~ 1.900	0,16	1.980
12	Schienenkopf-Fahrflächenschmierung (Konditionierung)	13,5	~ 1.800	~ 13.300	0,14	2.300
13	Schienenkopf-Fahrflächenbenetzung (künstlicher Regen)	13,5	~ 1.800	~ 13.300	0,14	2.300
16	Schallschutzwände - hoch	7,5	~ 1.200	~ 26.000	0,05	6.760
17	Schallschutzwände - niedrig	4,5	~ 800	~ 22.000	0,04	8.350
5	Schienenstegdämpfer (SSD)	4,5	~ 800	~ 26.300	0,03	10.345
6	Schienenstegabschirmung	4,5	~ 800	~ 27.300	0,03	10.740
7	Begrünte Bahnkörper, tief liegende Vegetationsebene, Schiene frei	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.700

Nr. der Maßnahme (vgl. Abschnitt 6.1)	Maßnahme	Schallminderung im Mittel in Dezibel	Nutzen [€]	Jährliche Kosten [€]	NKI bei 311 Einwohnenden	Ab wie viel Einwohnenden lohnt sich die Maßnahme
8	Begrünte Bahnkörper, hoch liegende Vegetationsebene, Schiene eingedeckt	1,5	~ 300	~ 28.700	0,01	30.700