

Inhalt

Autorenvorwort zur dritten Auflage	16
Häufig verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	18
a) Großbuchstaben	18
b) Kleinbuchstaben	20
c) Griechische Buchstaben	21
d) Indices	22
e) Abkürzungen (siehe auch Indices)	23
1 Einführung	28
1.1 Problemstellung und Lösungsansätze	28
1.2 Forschung und Entwicklung (FuE)	31
1.2.1 Überblick	31
1.2.2 Projekte	33
1.3 Betroffenheiten	34
1.3.1 Frequenzbewertung	34
1.3.2 Überblick	35
1.3.3 Lärm	38
1.3.4 Straßenverkehrslärm vs. Schienenverkehrslärm	39
1.3.5 Erschütterungen	41
1.4 Wirtschaftlicher Faktor, Schall-Verursacher	42
1.5 Straßenbahn versus Eisenbahn	44
1.6 Literaturhinweise	46
1.6.1 Literatur zu Kapitel 1	46
1.6.2 BMFT-Forschungsberichte (Nahverkehr)	48
1.6.3 Sonstige Literatur zum Thema Schall- und Erschütterungen an Schienenwegen	49
2 Physikalische Grundlagen – Anwendungen im Schienenverkehr	51
2.1 Einführung in die Schwingungslehre	51
2.1.1 Periodische Schwingungen	51
2.1.2 Schwingungsüberlagerung	55
2.1.3 Elemente eines Schwingungssystems	61
2.1.4 Freie gedämpfte Schwingungen	63
2.1.5 Gedämpfte erzwungene Schwingungen	66
2.1.6 Nichtperiodische und stochastische Schwingungen	69
2.1.7 Übertragungsfunktion und Modalanalyse	70
2.2 Grundlagen der Wellenlehre und Akustik	73
2.2.1 Wellenarten und Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten	74
2.2.2 Eigenschaften von Wellen	77

2.2.3	Schallfeldgrößen	78
2.2.4	Beziehungen zwischen Körper- und Luftschall	80
2.2.5	Längenbezogener Schallleistungspegel	83
2.3	Ausbreitung von Erschütterungen und Luftschall	89
2.4	Literatur zu Kapitel 2	91
3	Schall- und Schwingungspegel, Umgang mit Pegelwerten	94
3.1	Einführung	94
3.2	Schallpegelmaße	95
3.3	Mittelungspegel	97
3.4	Addition, Mittelung und Subtraktion von Pegeln	98
3.4.1	Pegeladdition und Pegelmittelung	98
3.4.2	Energetische Pegelsubtraktion	104
3.5	Schallfeld- und Schwingungsgrößen	105
3.6	Pegelberechnungen	107
3.7	Pegel in der Schall- und Schwingungsmesstechnik	111
3.8	Umrechnung von Pegelwerten	113
3.9	Addition von Pegeln – Herleitung	114
3.10	Pegelabhängigkeit von der Geschwindigkeit	115
3.11	Literatur zu Kap. 3	115
4	Schienenfahrzeuge	117
4.1	Unterscheidung der Schienenverkehrssysteme	117
4.1.1	Vorbemerkungen	117
4.1.2	Unterscheidung aus gesetzlicher/rechtlicher Sicht	117
4.1.3	Unterscheidung aus technischer/betrieblicher Sicht	119
4.2	Fahrzeug-Projektierung unter akustischen Gesichtspunkten	122
4.2.1	Vorbemerkungen	122
4.2.2	Allgemeine Randbedingungen	122
4.2.3	Akustisch relevante Teilsysteme und Bauteile	123
4.3	Akustik-Management bei der Fahrzeugbeschaffung	133
4.3.1	Einführung	133
4.3.2	Verfahrensablauf/Einzelschritte	134
4.4	Instandhaltung	139
4.5	Literatur zu Kapitel 4	140
5	Luft- und Körperschallanregung	142
5.1	Grundlagen der Schallanregung und -abstrahlung	142
5.2	Dominante Schallquellen	143
5.3	Dominante Anregungsfrequenzen	146
5.4	Schallanregung im Rad/Schiene-Kontaktbereich	148
5.4.1	Überblick	148
5.4.2	Rollgeräusche	149
5.4.3	Stoßgeräusche	164

5.4.4	Kurvengeräusche	166
5.4.5	Sonstige Geräusche	173
5.5	Impedanzen und Admittanzen	173
5.6	Literatur zu Kapitel 5	178
6	Messung von Luft- und Körperschall – Messergebnisse	180
6.1	Schallmessungen – Übersicht	180
6.2	Messgeräte	183
6.2.1	Schallpegelmesser	183
6.2.2	Zusatzgeräte	185
6.2.3	Umwelteinflüsse und allgemeine Vorgehensweise	185
6.2.4	Statistische Sicherheit	187
6.3	Messung von Außengeräuschen	189
6.3.1	Randbedingungen, Messpunkte	189
6.3.2	Messgrößen	191
6.3.3	Längenbezogener Schallleistungspegel	195
6.3.4	Zusammenhang zwischen verschiedenen Schallpegelgrößen	198
6.4	Messergebnisse Außengeräusche – Beispiele	200
6.4.1	Vorbeifahrgeräusche Stadtbahnen	200
6.4.2	Rundummessungen	204
6.5	Messung von Innengeräuschen	206
6.6	Sonstige Schallmessungen	211
6.6.1	Nachhallzeit	211
6.6.2	Schalldämmung	213
6.6.3	Intensitätsmessungen	214
6.7	Beispiel für eine Schallpegelauswertung – Außengeräusche	217
6.7.1	Vorgaben	217
6.7.2	Festlegungen für eine Analyse der Vorbeifahrgeräusche	218
6.7.3	Ergebnisse	219
6.7.4	Zusammenhang verschiedener Schallpegelgrößen	224
6.8	Ergänzende Messungen	226
6.8.1	Vorbemerkungen	226
6.8.2	Strukturuntersuchungen	227
6.8.3	Rauheit von Schiene und Rad	228
6.8.4	Ermittlung des Körperschallverhaltens von Bauteilen	230
6.8.5	Gleisabklingrate TDR	230
6.8.6	Anfahrwinkel eines Rades an der Schiene	231
6.8.7	Schallentwicklung beim Anfahren eines Fahrzeugs	232
6.9	Akustische Überwachung von Fahrzeugen und Gleisen	234
6.9.1	Überblick	234
6.9.2	Automatische Erkennung einer Vorbeifahrt	236
6.9.3	Überwachung von Rädern	237
6.10	Literatur zu Kapitel 6	238

7	Schallminderungsmaßnahmen	241
7.1	Allgemeine Grundlagen	241
7.1.1	Überblick	241
7.1.2	Primäre Maßnahmen	241
7.1.3	Sekundäre Maßnahmen	242
7.2	Grundlagen des „Schallarmen Konstruierens“	245
7.3	Betriebszustände und Anhaltwerte	248
7.3.1	Standardbetriebszustände	248
7.3.2	Sonderbetriebszustände	249
7.4	Schallminderungsmaßnahmen im Schienenverkehr	250
7.4.1	Überblick	250
7.5	Schallminderungsmaßnahmen Fahrzeug – Außengeräusche	253
7.5.1	Einführung	253
7.5.2	Anfahr- und Bremsgeräusche	253
7.5.3	Konstante Geschwindigkeit	254
7.5.4	Radbauart	255
7.5.5	Radschürzen, Radblenden	256
7.5.6	Radschallabsorber	257
7.5.7	Komponentenerprobungsträger „Leiser Güterzug“	259
7.5.8	Messergebnisse „Leiser Stadtbahnwagen“	259
7.6	Maßnahmen im Bereich Rad/Schiene	260
7.6.1	Die glatte Radlauffläche	260
7.6.2	Glatte, riffelfreie Schienenfahrfläche	262
7.6.3	Schlupfriffeln auf geraden Streckenabschnitten durch Anfahrt von Zügen	265
7.6.4	Schlupfwellen in Kurven	266
7.6.5	Minderungsmaßnahmen im Rad-/Schienenbereich	266
7.7	Schallschutzmaßnahmen am Fahrweg	267
7.7.1	Einführung	267
7.8	Schallminderungsmaßnahmen im Bereich der Ausbreitung	269
7.8.1	Schallschutzwände und -wälle	269
7.8.2	Wirkung	272
7.8.3	Passiver Schallschutz in Gebäuden	276
7.9	Schallminderungsmaßnahmen Streckenführung	276
7.9.1	Gleisbögen	276
7.9.2	Gleise auf Brücken/Viadukten und in Einschnitten	277
7.10	Besonders überwachtetes Gleis	280
7.11	Fahrzeuginnengeräusche – Schalldämmung Wagenkasten	281
7.11.1	Überblick	281
7.11.2	Einflüsse auf den Innenschallpegel	281
7.12	Einrichtungen in Tunnel-Haltestellen	284
7.13	Kurvengeräusche	287
7.13.1	Übersicht	287
7.13.2	Radsatzzwangssteuerung	290
7.13.3	Maßnahmen in einem Gleisbogen	291
7.13.4	Reibwertbeeinflussung zwischen Rad und Schiene	293

7.13.5	Rad-/Schiene-Materialpaarung	295
7.13.6	Absorber und Dämpfung	296
7.13.7	Schienendämpfungselemente	298
7.13.8	Asymmetrische Schienenprofile	299
7.13.9	Beobachtungen zum Auftreten von Quietschgeräuschen	300
7.13.10	Schallschutzmaßnahmen für Anwohner	301
7.13.11	Geschwindigkeitsabhängigkeit – Vorbeifahrpegel versus Stundenpegel ..	303
7.13.12	Schallarme Fahrzeuge – konstruktive Vorgaben	304
7.14	Beispiel für eine Rekonstruktion von Straßenbahnfahrzeugen	305
7.15	Fazit	307
7.15.1	Vorbemerkungen	307
7.15.2	Fahrzeug	307
7.15.3	Ausbreitung	311
7.15.4	Maßnahmen speziell bei Eisenbahnen und deren Wirkung	311
7.15.5	Maßnahmen gegen Kurvengeräusche	312
7.15.6	Maßnahmen gegen Rollgeräusche	315
7.16	Literatur zu Kapitel 7	317
7.16.1	Ergänzende Literatur zum Thema Schallminderung	321
8	Prognose- und Bewertungsverfahren für Luftschall	322
8.1	Überblick	322
8.2	Verkehrslärmschutzverordnung	323
8.2.1	Anwendungsbereich	323
8.2.2	Vergleich Eisenbahn – Straßenbahn	324
8.2.3	Basis für die Angaben in der 16. BImSchV	327
8.3	Einflüsse auf dem Ausbreitungsweg und Bahnhöfe	329
8.4	Durchführung einer schalltechnischen Untersuchung nach 16. BImSchV .	329
8.4.1	Überblick	329
8.4.2	Wesentliche Änderung	330
8.4.3	Erheblicher baulicher Eingriff	330
8.4.4	Vorgehensweise	330
8.4.5	Untersuchungsgebiet	332
8.4.6	Beurteilung	333
8.5	Literatur zu Kapitel 8	335
8.5.1	Weitergehende Literatur zum Thema	335
9	Rechtsschutz der Anwohner vor Lärm des Schienenverkehrs	337
9.1	Einleitung	337
9.1.1	Thematische Abgrenzungen	337
9.1.2	Beeinträchtigung der Bevölkerung durch Schienenverkehrslärm	338
9.1.3	Zielwerte des Schutzes vor Lärm	340
9.2	Grundsätzliche Strategien zum Schutz vor Schienenverkehrslärm in Deutschland	342
9.2.1	Grundsätzliche Minderungskonzepte	342

9.2.2	Instrumentarien des Schutzes	343
9.2.3	Zuständigkeiten	344
9.3	Ordnungsrechtliche Vorschriften zum Schutz der Bevölkerung vor Schienenverkehrslärm	344
9.3.1	Verwaltungsrecht	345
9.3.2	Verfassungs- und Privatrecht	346
9.4	Vorschriften für die Geräuschemissionen von Schienenfahrzeugen	347
9.4.1	Anwendungsbereich	348
9.4.2	Messverfahren	349
9.4.3	Geräuschgrenzwerte und Vorbeifahrgeräusch	349
9.4.4	Anfahrgeräusch	350
9.4.5	Standgeräusch	351
9.5	Geräuschmindernde Vorschriften für die Fahrwege	351
9.6	Vorgaben für die Geräuschemissionen in Nahverkehrsplänen	352
9.7	Vorschriften für die Geräuschimmissionen neuer bzw. wesentlich geänderter Schienenwege	353
9.7.1	Grundsätzliches	353
9.7.2	Die Umweltverträglichkeitsprüfung	353
9.7.3	Prüfung auf Lärmvorsorgeansprüche nach 16. BImSchV	354
9.8	Schutz vor Schienenverkehrslärm im Rahmen der Bauleitplanung: Problemfeld Heranrückende Wohnbebauung	362
9.9	Betriebsbeschränkungen	363
9.9.1	Das Schienenlärmschutzgesetz von 2017	364
9.9.2	Die Europäischen Betriebsbeschränkungen ab 2024	364
9.10	Lärmsanierung an Schienenwegen	365
9.10.1	Das nationale Lärmsanierungsprogramm	366
9.10.2	Die EU-Richtlinie zum Umgebungslärm	368
9.10.3	Das nationale Umrüstprogramm für Güterwagen	371
9.11	Bewertung der Schutzregelungen	374
9.11.1	Deutliche Verbesserungen der Schutzregelungen	374
9.11.2	Lücken und Mängel im gegenwärtigen Regelwerk	375
9.11.3	Vorschläge für einen verbesserten Schutz vor Straßen- und Schienenverkehrslärm	378
9.12	Fazit	379
9.13	Literatur	380
10	Oberbau im Schienenverkehr	386
10.1	Anforderungen an den Oberbau	386
10.2	Begriffsbestimmungen	387
10.3	Bestandteile des Oberbaus	387
10.3.1	Überblick	387
10.3.2	Schienen	388
10.3.3	(Schienen-) Kammerfüllelement	389
10.3.4	Schwellen	390
10.3.5	Spurstangen	391

10.3.6	Schienenbefestigung	392
10.3.7	Gleis und Weichen	393
10.3.8	Flachrille/Tiefrille	394
10.3.9	Schienenauzugsvorrichtung und -entwässerungskasten	395
10.4	Oberbau-Arten	396
10.4.1	Offener Oberbau	396
10.4.2	Geschlossener Oberbau	397
10.4.3	Oberbau mit planmäßiger Vegetation	397
10.5	Oberbau-Formen	398
10.6	Akustisch wirksame Instandhaltungsmaßnahmen	400
10.7	Literatur zu Kapitel 10	402
11	Erschütterungsanregung	403
11.1	Schwingungsanregung – Überblick	403
11.2	Schwingungsanregung – Schienenverkehr	404
11.2.1	Grundlagen	404
11.2.2	Spezielle Fragestellungen zur Anregung und Ausbreitung bei der Eisenbahn	409
11.3	Erregerspektren – Schwinggeschwindigkeit	414
11.4	Ermittlung von Erregerkraftspektren	416
11.5	Literatur zu Kapitel 11	421
12	Messung von Erschütterungen und Sekundärschall	422
12.1	Schwingungs- und Sekundärschallmessungen – Überblick	422
12.2	Erschütterungsmessungen	422
12.2.1	Aufnehmer, Messsystem	422
12.2.2	Messpunkte	424
12.2.3	Ankopplung	427
12.2.4	Triggerung	429
12.3	Auswertung von Schwingungsmessungen	430
12.3.1	Überblick	430
12.3.2	Ermittlung von Beurteilungsgrößen	431
12.3.3	Grundlage für Prognosen	435
12.3.4	Bewertung von schwingungsmindernden Maßnahmen	437
12.3.5	Messungen zur Ermittlung von Einflussgrößen	438
12.4	Sekundärschallmessungen	440
12.4.1	Messung	440
12.4.2	Auswertung	441
12.5	Bodenkennwerte	441
12.6	Literatur zu Kapitel 12	443
13	Schwingungsminderung im Schienenverkehr	446
13.1	Einführung	446
13.2	Minderung der Anregung – Überblick	448

13.3	Elastische Lagerungen im Oberbau	452
13.3.1	Einführung	452
13.3.2	Minderungsmaßnahmen – aktive / passive	454
13.3.3	Wirkprinzipien	455
13.3.4	Grundkonzepte und Ausführungsvarianten	457
13.4	Beispiele und Ausführungsvarianten	458
13.4.1	Einführung	458
13.4.2	Elastische Schienenlagerungen	458
13.4.3	Elastische Schwellenlager	462
13.4.4	Schotteroberbau mit Unterschottermatten	463
13.4.5	Masse-Feder-Systeme mit Elastomerlagern	465
13.4.6	Masse-Feder-Systeme mit Stahlfedern	470
13.5	Klassifizierung der Wirksamkeit	474
13.6	Mess- und Rechenverfahren, Prognosen	476
13.7	Wirksamkeit und Messergebnisse	477
13.8	Masse-Feder-Systeme mit elastischer Flächenlagerung – Berechnung der Minderung	479
13.8.1	Prinzip	479
13.8.2	Theoretische Betrachtung	480
13.8.3	Gleiskinematik	481
13.8.4	Gleisdynamik- Einfügdungsämm-Maß	486
13.9	Einbauten im Boden	495
13.10	Elastische Lagerung von Gebäuden	496
13.10.1	Allgemeines	496
13.10.2	Auslegung der elastischen Gebäudelager	496
13.11	Elastische Materialien, Baudurchführung, Sanierung, Gebäudeabfederung – Beispiele	497
13.11.1	Verwendete Materialien für elastische Elemente	497
13.11.2	Masse-Feder-Systeme im Straßenbereich – Herstellung und Bauausführung	499
13.11.3	Gleis-Umbaumöglichkeiten zur erschütterungstechnischen Sanierung ..	501
13.11.4	Elastische Gebäudelagerung	503
13.12	Literatur zu Kapitel 13	510
	Literatur zu Kapitel 13	511
14	Prognoseverfahren für Erschütterungen und Sekundärschall	512
14.1	Einleitung	512
14.2	Systemidentifikation	516
14.2.1	Direktes Problem	517
14.2.2	Entwurfsproblem	517
14.2.3	Eingangsproblem	518
14.2.4	Identifikationsproblem	518
14.3	Beschreibung einzelner Prognose-Verfahren	523
14.3.1	Überblick	523
14.3.2	Statistische Verfahren – Einzahlberücksichtigung	525

14.3.3	Spektrale Prognose-Verfahren	533
14.3.4	Modelluntersuchungen	550
14.3.5	Ersatzerreger	553
14.3.6	Sekundärschall	554
14.3.7	Vergleichende Betrachtung der Verfahren	560
14.4	Zusammenhang verschiedener Immissionsgrößen	561
14.4.1	Zusammenhang zwischen Erschütterungen und Sekundärschall	561
14.4.2	Abschätzung des $KB_{FTi,z}$ – Wertes von alternativen Bewertungsgrößen ..	563
14.5	Literatur zu Kapitel 14	565
15	Rechtsprechung zum Schienenverkehrslärm, Erschütterungen und Sekundärschall mit Hinweisen zur Planfeststellung	568
15.1	Planfeststellung	568
15.2	Einleitung zum Schienenverkehrslärm	570
15.3	Exemplarische Verwaltungsrechtsprechung durch ausgewählte Entscheidungen des BVerwG zum Schienenverkehrslärm	575
15.3.1	Besonders überwachtes Gleis (büG), Verhältnismäßigkeitsprüfung, Verhältnismäßigkeitsschwelle, Sprungkosten	575
15.3.2	Neubau oder Änderung eines Schienenwegs?	576
15.3.3	Methodik, Prognosen, Betriebsprogramm, Schall 03 1990	577
15.3.4	Betrachtung der Kosten je Schutzfall, Schutzabschnitte, Betriebsprogramm	579
15.3.5	Verkehrsprognosen, Bedarfsplan, plangegebene Vorbelastung	580
15.3.6	Grundrechte: Recht auf körperliche Unversehrtheit, Eigentumsgarantie, Inhalts- und Schrankenbestimmungen durch Gesetz	583
15.4	Einleitung zu Erschütterungen und sekundärem Luftschall	584
15.4.1	Exkurs zu den Regelungen der DIN 4150 [15.16]:	586
15.4.2	Exkurs zu Schutzmaßnahmen [15.17]:	587
15.5	Exemplarische Verwaltungsrechtsprechung durch ausgewählte Entscheidungen des BVerwG zu Erschütterungen und sekundärem Luftschall	587
15.5.1	DIN4150, Teil 2, Anhaltswerte, sekundärer Luftschall, 24. BImSchV, „Immissionsrichtwerte“	587
15.5.2	Ausbauvorhaben, Streckenertüchtigung, relevante Zunahme? Anhaltswerte DIN 4150 Teil 2, Entscheidungsvorbehalt bei Prognoseunsicherheit, Erheblichkeitsschwelle	590
15.5.3	Betriebsbedingte Erschütterungen, Kostengesichtspunkte, Schutzmaßnahmen, Entscheidungsvorbehalt	591
15.5.4	Betriebsbedingte Erschütterungen, plangegebene Vorbelastung, Zumutbarkeitsschwelle für Erschütterungsbelastungen	593
15.6	Literatur und Rechtsprechung zu Kapitel 15	594
16	Prüftechnik	595
16.1	Einführung	595
16.2	Schallemissionen – Typprüfungen Fahrzeugeinheiten	596
16.3	Schallemissionen – Oberbaueinfluss	599

16.4	Erschütterungsemissionen – Einfügedämmung	601
16.5	In-situ Messungen	602
16.5.1	Fahrzeuganregung	602
16.5.2	Simulation der dyn. Radsatzkräfte	604
16.5.3	Admittanzmessungen Tunnel	606
16.6	Steifigkeitsermittlung von elastischen Schienenlagern	608
16.6.1	Ermittlung im Labor	608
16.6.2	Steifigkeits-Ermittlung bei einer Festen Fahrbahn	610
16.6.3	Steifigkeits-Ermittlung bei einem Rillenschienengleis	611
16.6.4	Eigenschwingungen – Radsatz-Gleis	612
16.7	Literatur zu Kapitel 16	614
16.7.1	Zitierte Literatur	614
16.7.2	Ergänzende Literatur	615
17	Fahrkomfort	616
17.1	Einführung	616
17.2	Wertezeiffer (WZ)-Verfahren	618
17.3	Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – VDI 2057	620
17.4	Fahrkomfort für Fahrgäste – ENV 12299 (ERRI C 116-Rp 3)	620
17.4.1	Durchführung der Messungen und Auswertungen	621
17.4.2	Ergebnisse	622
17.5	Zusammenhang zwischen den drei Komfortwerten	623
17.6	Abhängigkeiten	624
17.6.1	Abhängigkeit von der Fahrbahnart / dem Fahrbahnzustand	624
17.6.2	Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	626
17.6.3	Komfortwerte im normalen Betrieb	626
17.7	Literatur zu Kapitel 17	628
Anhang	629
A	Begriffe	629
B	Normen und Richtlinien	653
B.1	Vorbemerkungen	653
B.2	DIN-Normen	653
B.3	DIN (EN)-Normen	656
B.4	ISO (DIN)-Normen	658
B.5	VDI-Richtlinien	658
B.6	IEC-Richtlinien	660
B.7	EU-Normen und Richtlinien	660
B.8	Vorschriften der Deutschen Bahn AG	661
B.9	Sonstige Vorschriften	662
C	Datensammlung	664
C.1	Allgemeine Daten und Beispiele für Messergebnisse	664
C.2	Messergebnisse – Erschütterungen und Admittanzen	674
C.3	Schalldruckpegel-Terzspektren – Beispiele	688
C.4	Vertikale Eigenfrequenzen – Beispiele	690

C.5	Formeln zur rechnerischen Abschätzung der Einfügedämmung	692
C.6	Steifigkeit elastischer Schienenlager	698
C.7	Schallausbreitung – Fahrwegeinfluss	703
C.8	Psychoakustische Größen	708
C.9	Körperschallspektren – Gleise im Tunnel	709
C.10	Prognose von Erschütterungen und Sekundärschall	713
C.11	Zusammenhang zwischen verschiedenen Messwerten – Beispiele	718
C.12	Wellenausbreitung im Boden und Kräfte von Ersatzerregern	722
C.13	Simulation – Stoßanregung Schiene	723
C.14	Gesamtschall	727
C.15	Literatur zu Anhang C	730
Register		732
Abbildungsverzeichnis		748
Tabellenverzeichnis		769