

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Automobil und Gesellschaft	1
1.2	Trends in der Automobilakustik	2
2	Methodische Grundlagen	5
2.1	Prozess Akustikentwicklung	5
2.1.1	Vibroakustische Fahrzeugeigenschaften	5
2.1.2	Zielfindung	5
2.1.3	Subjektive Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften	6
2.1.4	Geräuschmetrik	7
2.1.5	Funktionsorientierung	9
2.2	Vibroakustische Modelle	11
2.2.1	Modellbildung	11
2.2.2	Elektromechanische Analogie	13
2.2.3	Beispiel Einmassenschwinger	14
2.2.4	Elektroakustische Analogie	17
2.2.5	Lineare Analyse im Frequenzbereich, Vierpoltheorie	17
2.2.6	Nichtlineare Analyse im Zeitbereich, Simulation	20
3	Elementare Schwingungssysteme	22
3.1	Freie Schwingungen	22
3.1.1	Einmassenschwinger	22
3.1.2	Ungefesselter Zweimassenschwinger	24
3.1.3	Gekoppelte Schwingssysteme	25
3.2	Erzwungene Schwingungen	26
3.2.1	Einmassenschwinger	26
3.2.2	Zweimassenschwinger	28
3.3	Selbsterregte Schwingungen	30
3.3.1	Ruckgleiten	30
3.3.2	Ratterschwingungen	33
4	Schwingungsminderung	36
4.1	Schwingungsisoliation	37
4.1.1	Einfach Elastische Lagerung	37
4.1.2	Doppelt Elastische Lagerung	39
4.2	Schwingungsdämpfung	40
4.2.1	Rheologische Materialmodelle	40
4.2.2	Makroskopische Reibmodelle	42
4.2.3	Reibungsdämpfung	43
4.2.4	Elastische Dämpferanbindung	44
4.2.5	Skyhook-Dämpfung	45
4.3	Bauteile zur Schwingungsisoliation	46
4.3.1	Elastische Federelemente	46
4.3.2	Viskoelastische Lagerelemente	48
4.3.3	Schwingungsdämpfer	51

4.4	Passive Schwingungskompensation	53
4.4.1	Schwingungstilger	53
4.4.2	Fliehkraftpendel	56
4.5	Aktive Schwingungskompensation	58
4.5.1	Funktionsprinzip	58
4.5.2	LMS-Algorithmus	60
4.5.3	Aktive Lagerung	61
4.5.4	Trägheitsmassenaktor	62
4.6	Subjektives Schwingungsempfinden	64
5	Schwingungsphänomene im Kraftfahrzeug	68
5.1	Fahrbahnerregte Schwingungen	69
5.1.1	Vertikaldynamik	70
5.1.2	Sprungförmige Unebenheitsanregung, Stößigkeit	73
5.1.3	Harmonische Unebenheitsanregung	75
5.1.4	Stochastische Unebenheitsanregung	78
5.1.5	Konflikt Fahrkomfort vs. Fahrsicherheit	82
5.1.6	Aktive Fahrwerke	84
5.1.7	Sitzschwingungen	86
5.1.8	Nicken, Einspurmodell	89
5.1.9	Wanken, Zweispurmodell	91
5.1.10	Karosseriezittern	92
5.1.11	Motorstuckern	97
5.2	Raderregte Schwingungen	100
5.2.1	Ungleichförmigkeitsanregung	100
5.2.2	Anfahr- und Bremsstempeln	101
5.3	Motoreerregte Schwingungen	102
5.3.1	Leerlaufschwingungen	102
5.3.2	Start-Stop-Schwingungen	103
5.3.2.1	Konventioneller Niedrigdrehzahlstart	104
5.3.2.2	Hochdrehzahlstart/Hybridstart	104
5.3.2.3	Direktstart	105
5.3.2.4	Motorstop	106
5.3.3	Lastwechselschwingungen	107
5.3.3.1	Ruckeln	107
5.3.3.2	Rupfen	109
5.3.3.3	Lastschlag, Klacken, Klackern	110
5.4	Karosserieschwingungen/Strukturdynamik	110
5.4.1	Statische Steifigkeit	110
5.4.2	Dynamische Steifigkeit	111
5.4.3	Funktionsmodell Karosserie	113
5.4.4	Karosserieunterzüge	114
6	Luftschall	116
6.1	Begriffe	116
6.2	Primärer Luftschall	117
6.3	Elementare Schallfelder	119
6.3.1	Ebene Schallwelle	119
6.3.2	Kugelstrahler	120
6.3.3	Strahlergruppe	122

6.4	Luftschalldämmung	123
6.4.1	Luftschalltransmission	123
6.4.2	Schalldämmmaße	125
6.4.3	Biegeweiche isotrope Platten	126
6.4.4	Biegesteife isotrope Platten	127
6.4.5	Mehrschichtbauteile	129
6.4.6	Mehrflächige Systeme	132
6.4.7	Transmission durch Leckagen	133
6.5	Luftschallabsorption	136
6.5.1	Poröse Absorber	137
6.5.2	Kammer- und Membran-Absorber	140
6.5.3	Mikroperforierte Absorber (MPA)	142
6.5.4	Helmholtz-Resonator	143
6.6	Schallisoliersysteme im Fahrzeug	144
6.6.1	Motorkapselung	145
6.6.2	Stirnwand, Schalleintrag in den Innenraum	146
6.6.3	Unterbodenverkleidung (UBV)	148
6.6.4	Bodengruppe	148
6.6.5	Türen und Fenster	150
6.7	Schallausbreitung in Räumen	152
6.7.1	Raumresonanzen	152
6.7.2	Modalfeld	154
6.7.3	Diffuses Schallfeld	155
6.7.4	Kohärenz von Schallfeldern	156
6.7.5	Hörsamkeit	157
6.8	Schallausbreitung in Rohren und Kanälen	159
6.8.1	Offenes und geschlossenes Rohrende	160
6.8.2	T-Abzweigung mit $\lambda/4$ -Rohr	161
6.8.3	T-Abzweigung mit Resonator	162
6.8.4	Expansionskammer	162
6.8.5	Reflexionsschalldämpfer	163
6.8.6	Absorptionsschalldämpfer	164
6.8.7	Strömungsgeräusche	165
7	Körperschall	168
7.1	Plattenschwingungen	168
7.1.1	Freie Plattenschwingungen	168
7.1.2	Plattenschwingungen bei Betriebsanregung	172
7.1.3	Mobilitäten elementarer Bauteile	173
7.2	Indirekter Luftschall	175
7.2.1	Flächenstrahler, Rayleighintegral	175
7.2.2	Kolbenstrahler	176
7.2.3	Modale Abstrahlung	178
7.2.4	Plattenabstrahlung	179
7.3	Körperschallübertragung	181
7.3.1	Maschinenakustische Gleichung	181
7.3.2	Körperschallimmission	183
7.3.3	Dämmung durch Zusatzimpedanz	185
7.3.4	Dämmung durch elastische Lagerung	186
7.3.5	Dämpfung, Entdröhnung	188

8 Psychoakustik	191
8.1 Das menschliche Hörorgan	191
8.2 Hörbereich	192
8.3 Komplexe Empfindungsgrößen	193
8.4 Sprachverständlichkeit	198
8.5 Psychometrische Messungen	198
9 Fahrgeräusch	201
9.1 Antriebsgeräusch	201
9.2 Wind- und Rollgeräusch	202
9.2.1 Rollgeräusch	202
9.2.2 Umströmungsgeräusch	204
9.2.3 Wummern	206
9.3 Sound-Design	207
9.3.1 Zielound	207
9.3.2 Aktive Schallbeeinflussung	209
9.4 Hybridantrieb	214
10 Motorgeräusch	217
10.1 Verbrennungsgeräusch	218
10.2 Gas- und Massenkräfte	219
10.2.1 Motorordnungen	219
10.2.2 Massenkräfte	220
10.2.3 Gaskräfte	222
10.2.4 Tangentialkräfte	224
10.3 Massenausgleich	227
10.4 Leistungsausgleich	229
10.4.1 Drehungleichförmigkeit (DU)	229
10.4.2 Isolation der DU	231
10.4.2.1 Schwungmasse und Torsionsdämpfer	231
10.4.2.2 Zweimassenschwungrad	233
10.4.3 Kompensation der DU	235
10.4.4 Dämpfung der DU durch Schlupf	236
10.5 Mechanische Geräusche	237
10.5.1 Kurbeltrieb	237
10.5.2 Ventiltrieb	239
10.5.3 Abgas-Turbolader	239
10.5.4 Kettentrieb	239
10.5.5 Getriebegeräusche	241
10.6 Lagerung Aggregat/Triebstrang	243
10.6.1 Körperschallpfade	243
10.6.2 Anforderungen und Lagerungskonzepte	244
10.6.3 Bewegungsgleichungen	245
10.6.4 Anregung durch Tangentialkräfte	246
10.6.5 Anregung freier Massenkräfte und -momente	248
10.6.6 Lagerung Hinterachse	249
11 Ladungswechselgeräusch	253
11.1 Ansauganlage	253
11.1.1 Aufbau	253
11.1.2 Problemstellungen und Entwicklungsziele	254

11.1.3	Simulation	255
11.1.3.1	Akustische Wellenausbreitung im Ansaugtrakt	255
11.1.3.2	Schallabstrahlung der elastischen Strukturen	256
11.1.3.3	Transfermatrixmethode für das Ansaugsystem	257
11.1.4	Akustikmaßnahmen	257
11.1.4.1	Körperschalleintrag	258
11.1.4.2	Oberflächenabstrahlung	258
11.1.4.3	Mündungsschall	258
11.1.4.4	Sounddesign	259
11.1.5	Validierung	260
11.1.5.1	Lautsprecher-Prüfstand	260
11.1.5.2	Dynamische Steifigkeit	261
11.1.5.3	Messungen mit Motoranregungen	262
11.1.5.4	Fahrzeugmessungen	262
11.2	Abgasanlage, Schalldämpfer	262
11.2.1	Funktion und Aufbau	262
11.2.2	Testmethoden	265
11.2.3	Komponentenbeitrag zum Abgasgeräusch	266
11.2.3.1	Krümmter	266
11.2.3.2	Katalysator	266
11.2.3.3	Dieselpartikelfilter	266
11.2.3.4	Schalldämpfer	267
11.2.3.5	Schaltbare Abgasklappe	268
11.2.3.6	Aktiver Schalldämpfer (ANC)	269
11.2.3.7	Zweiflutige Abgasanlage	270
11.2.4	Körperschallemission der Komponenten	271
11.2.4.1	Schalldämpfer	271
11.2.4.2	Katalysator	272
11.2.5	Auswirkung beim Innengeräusch	272
11.2.5.1	Prognose des Mündungsanteils	273
11.2.5.2	Einfluss Mündungsgeräusch	273
11.2.5.3	Einfluss Aufhängung	274
11.2.6	Sound Design	275
11.2.7	Berechnung der Abgasanlagenakustik	276
12	Reifen-Fahrbahngeräusch	279
12.1	Reifeneigenschaften	279
12.2	Reifeneinfluss auf das Rollgeräusch	281
12.2.1	Strukturschall durch Reifenschwingungen	282
12.2.1.1	Anregung	282
12.2.1.2	Übertragung	284
12.2.1.3	Abstrahlung	285
12.2.2	Kompressionsgeräusch	286
12.2.3	Horneffekt	286
12.2.4	Resonanzphänomene	286
12.2.5	Zielkonflikte	287
12.3	Fahrbahneinfluss auf das Rollgeräusch	288
12.4	Rollgeräusch außerhalb des Fahrzeugs	290
12.5	Rollgeräusch innerhalb des Fahrzeugs	291

12.5.1	Transferpfade ins Fahrzeug	291
12.5.2	Geräuschphänomene	292
12.5.3	Luftschwingungen im Reifeninnern	292
13	Stör- und Betätigungsgeräusche	294
13.1	Mechatronische Geräusche	294
13.1.1	Elektrische Stellmotoren	295
13.1.2	Lüfter und Gebläse	297
13.1.3	Fahrzeugklimatisierung	299
13.1.4	Lenkungssystem	302
13.1.4.1	Kavitationsgeräusche	303
13.1.5	Bremssystem	304
13.1.5.1	Regelgeräusche	305
13.1.5.2	Rubbeln	305
13.1.5.3	Quietschen	306
13.1.6	Biegeschlaffe Leitungen	307
13.2	Kontaktstellengeräusche	310
13.2.1	Anregungsarten	311
13.2.2	Stück-Slip-Effekt	313
13.2.3	Anschlag-Effekt	314
13.2.4	Bewertungs- und Auslegungskriterien	316
13.3	Audio-Störgeräusche	319
13.4	Türbetätigungsgeräusch	320
14	Außengeräusch	323
14.1	Standgeräusch	323
14.2	Fahrgeräusche	324
14.2.1	Reifen/Fahrbahngeräusch	325
14.2.2	Antriebsgeräusch	327
14.2.3	Vorbeifahrt nach ISO 362	328
14.3	Akustische Wahrnehmbarkeit	329
14.3.1	Einleitung	329
14.3.2	Relevante Verkehrssituationen	330
14.3.3	Psychoakustische Grundlagen	330
14.3.4	Experimentelle Ermittlung der akustischen Wahrnehmbarkeit	331
14.3.5	Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit	333
14.3.6	Beeinflussung durch andere Faktoren	334
14.3.6.1	Gangwahl	334
14.3.6.2	Ablenkung	334
14.3.6.3	Binaurale Faktoren	335
15	Berechnung und Simulation	336
15.1	Mehrkörpersimulation (MKS)	336
15.2	Struktur-Optimierung	337
15.3	Akustik-Berechnung (FEM)	339
15.3.1	Modale Gleichungen	340
15.3.2	Äquivalente abgestrahlte Schalleistung	341
15.4	Boundary Element Methode (BEM)	342
15.5	Statistische Energieanalyse (SEA)	344
15.6	Aeroakustik-Berechnung (CAA)	347

15.6.1	Navier-Stokes-Gleichungen	348
15.6.2	Lattice-Boltzmann-Methode	348
15.7	Substrukturtechnik	349
15.7.1	Methodische Grundlagen	349
15.7.2	EMPC-Methode	351
15.7.3	Identifikation von Betriebsanregungen	353
16	Messverfahren	356
16.1	Binaurale Messtechnik	356
16.2	Ortung von Schallquellen	357
16.2.1	Intensitätssonde	357
16.2.2	Akustische Nahfeldholografie	358
16.2.3	Akustische Fernfeldholografie	359
16.3	Akustische Systemidentifikation	361
16.3.1	Übertragungsfunktionen	361
16.3.2	Impulshammermethode	361
16.4	Transferpfadanalyse (TPA)	363
16.4.1	Rechnerische Luftschall-TPA	364
16.4.2	Experimentelle Körperschall-TPA	366
16.4.3	Experimentelle Luftschall-TPA	366
16.5	Modalanalyse und -synthese	367
16.5.1	Modalzerlegung	367
16.5.2	Experimentelle Modalanalyse	368
16.6	Betriebsschwingungsanalyse	371
16.6.1	Laser-Scanning-Vibrometrie	371
16.6.2	Speckle-Interferometrie	371
17	Vibroakustische Messtechnik	373
17.1	Einsatzbereiche	373
17.1.1	Technisches Umfeld	373
17.1.2	Messabläufe	374
17.2	Vibroakustische Sensoren	375
17.2.1	Beschleunigungssensor	376
17.2.2	Messmikrofon	377
17.2.3	Laservibrometer	378
17.3	Signalverarbeitung	379
17.3.1	Kalibrierung	379
17.3.2	Signalkonditionierung	379
17.3.3	Drehzahlerfassung	380
17.3.4	Ergänzende Messgrößen	381
17.4	Analyse-Methoden	382
17.4.1	Frequenzanalysen	382
17.4.2	Ordnungsanalysen	384
17.4.3	Ordnungsfilterung im Motorenbau	385
17.4.4	Grad-Kurbelwinkel-Analyse	386
17.4.5	Drehschwingungsanalyse	386
17.4.6	Hauptkomponentenanalyse	387
17.4.7	Mehrdimensionale Ergebnisdarstellung	388
17.5	Audio-Synthese, Auralisierung	389
17.5.1	Geräusch-Synthese	390

18 Vibroakustische Prüftechnik	393
18.1 Dynamischer Motorprüfstand	393
18.2 Freifeldraum	393
18.3 Hallraum	394
18.4 Fenster-Prüfstand	397
19 Anlagen	399
19.1 Vierpol-Darstellung des Fahrzeug-Viertelmodells in Matlab	399
19.2 Simulink-Darstellung des Fahrzeug-Viertelmodells	400
Sachwortverzeichnis	401