

Peter Zeller (Hrsg.)

Handbuch Fahrzeugakustik

Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch
Mit 633 Abbildungen und 43 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Automobil und Gesellschaft.....	1
1.2	Trends in der Automobilakustik.....	2
2	Allgemeine Grundlagen	4
2.1	Prozess Akustikentwicklung.....	4
2.1.1	Zielfindung.....	4
2.1.2	Subjektive Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften.....	5
2.1.3	Geräuschmetrik.....	6
2.1.4	Funktionsorientierung.....	8
2.2	Modelle und Begriffe.....	9
2.2.1	Modellbildung.....	9
2.2.2	Elektromechanische Analogie.....	12
2.2.3	Beispiel Einmassenschwinger.....	13
2.2.4	Elektroakustische Analogie.....	15
2.2.5	Vierpoltheorie.....	15
3	Schwingungstechnik	19
3.1	Freie Schwingungen elementarer Systeme.....	19
3.1.1	Einmassenschwinger.....	19
3.1.2	Ungefesselter Zweimassenschwinger.....	21
3.1.3	Gekoppelte Schwingsysteme.....	21
3.2	Erzwungene Schwingungen elementarer Systeme.....	23
3.2.1	Einmassenschwinger.....	23
3.2.2	Zweimassenschwinger.....	24
3.3	Passive Schwingungsauslegung.....	25
3.3.1	Elastische Lagerung.....	27
3.3.2	Isolationsbauteile.....	29
3.3.3	Schwingungsdämpfung.....	31
3.3.4	Dämpfungsbauteile.....	32
3.3.5	Systemdämpfung.....	34
3.3.6	Schwingungstilger.....	36
3.3.7	Fliehkraftpendel.....	39
3.4	Aktive Schwingungskompensation.....	41
3.4.1	Funktionsprinzip.....	41
3.4.2	Aktive Lagerung.....	43
3.4.3	Trägheitsmassenaktuator.....	44
3.5	Subjektives Schwingungsempfinden.....	46
4	Schwingungsphänomene im Kraftfahrzeug	49
4.1	Fahrbahnerregte Schwingungen.....	50
4.1.1	Vertikaldynamik.....	51
4.1.2	Stochastische Unebenheitsanregung realer Fahrbahnen.....	57
4.1.3	Beurteilung stochastischer Fahrbahn-Anregungen.....	59
4.1.4	Konflikt Fahrkomfort vs. Fahrsicherheit.....	60
4.1.5	Aktive Fahrwerke.....	61
4.1.6	Sitzschwingungen.....	62
4.1.7	Fahrzeugnicken, Einspurmodell.....	65
4.1.8	Wanken, Zweispurmodell.....	67
4.1.9	Karosseriezittern.....	68
4.1.10	Motorstuckern.....	73
4.2	Raderregte Schwingungen.....	75
4.2.1	Ungleichförmigkeitsanregung.....	75

	4.2.2	Anfahr- und Bremsstempel	76
4.3		Motoreregte Schwingungen	77
	4.3.1	Leerlaufschwingungen	77
	4.3.2	Lastwechselschwingungen	78
4.4		Strukturdynamik	81
	4.4.1	Globale Karosserieeigenformen	81
	4.4.2	Funktionsmodell Karosserie	83
	4.4.3	Karosserieunterzüge	84
5		Luftschall	86
5.1		Begriffe	86
5.2		Entstehung und Ausbreitung	87
	5.2.1	Primärer Luftschall	87
	5.2.2	Schallfelder	89
	5.2.3	Luftschallübertragung	91
5.3		Luftschalldämmung	93
	5.3.1	Biegeweiche isotrope Platten	94
	5.3.2	Biegesteife isotrope Platten	95
	5.3.3	Mehrschichtbauteile	97
	5.3.4	Mehrflächige Systeme	100
	5.3.5	Transmission durch Leckagen	101
5.4		Luftschallabsorption	104
	5.4.1	Poröse Absorber	105
	5.4.2	Kammer- und Membran-Absorber	107
	5.4.3	Mikroperforierte Absorber (MPA)	110
	5.4.4	Helmholtz-Resonator	111
5.5		Schallisoliersysteme im Fahrzeug	111
	5.5.1	Stirnwand	112
	5.5.2	Motorkapselung	113
	5.5.3	Unterbodenverkleidung (UBV)	115
	5.5.4	Bodengruppe	115
	5.5.5	Türen und Fenster	117
5.6		Schallausbreitung in Räumen	118
	5.6.1	Raumresonanzen	118
	5.6.2	Kohärenz von Schallfeldern	120
	5.6.3	Hörsamkeit	121
5.7		Schallausbreitung in Rohren und Kanälen	123
	5.7.1	Offenes und geschlossenes Rohrende	124
	5.7.2	T-Abzweigung mit $\lambda/4$ -Rohr	125
	5.7.3	T-Abzweigung mit Resonator	126
	5.7.4	Expansionskammer	127
	5.7.5	Absorptionsschalldämpfer	128
	5.7.6	Strömungsgeräusche	129
6		Körperschall	132
6.1		Sekundärschall	132
	6.1.1	Plattenschwingungen	132
	6.1.2	Indirekter Luftschall, Kolbenstrahler	133
	6.1.3	Plattenabstrahlung	135
6.2		Körperschallübertragung	137
	6.2.1	Maschinenakustische Gleichung	137
	6.2.2	Körperschallimmission	139
	6.2.3	Mobilitäten elementarer Bauteile	140
	6.2.4	Dämmung durch Zusatzimpedanz	142
	6.2.5	Dämmung durch elastische Lagerung	143
	6.2.6	Dämpfung, Entdröhnung	145
6.3		Lagerelemente	147

7 Psychoakustik	151
7.1 Das menschliche Hörorgan.....	151
7.2 Hörbereich.....	152
7.3 Komplexe Empfindungsgrößen.....	153
8 Fahrgeräusch	158
8.1 Antriebsgeräusch.....	158
8.2 Wind- und Rollgeräusch.....	159
8.2.1 Rollgeräusch.....	159
8.2.2 Umströmungsgeräusch.....	160
8.2.3 Wummern.....	163
8.3 Sound-Design.....	164
8.3.1 Zielsound.....	164
8.3.2 Active Noise Control.....	166
9 Motorgeräusch	171
9.1 Verbrennungsgeräusch.....	171
9.2 Gas- und Massenkräfte.....	173
9.2.1 Motorordnungen.....	173
9.2.2 Massenkräfte.....	173
9.2.3 Gaskräfte.....	175
9.3 Massenausgleich.....	177
9.4 Leistungsausgleich.....	180
9.4.1 Schwungmasse und Torsionsdämpfer.....	180
9.4.2 Zweimassenschwungrad.....	182
9.4.3 Weitere Maßnahmen zur Reduktion der Drehungleichförmigkeit.....	184
9.5 Mechanische Geräusche.....	185
9.5.1 Kurbeltrieb.....	186
9.5.2 Ventiltrieb.....	187
9.5.3 Abgas-Turbolader.....	187
9.5.4 Kettentrieb.....	187
9.5.5 Getriebegeräusche.....	189
9.6 Aggregatlagerung.....	190
9.6.1 Lagerkräfte.....	190
9.6.2 Motor- und Getriebelagerung.....	192
9.6.3 Lagerung Hinterachse.....	194
10 Ladungswechselgeräusch	198
10.1 Ansauganlage.....	198
10.1.1 Aufbau.....	198
10.1.2 Problemstellungen und Entwicklungsziele.....	199
10.1.3 Simulation.....	200
10.1.3.1 Akustische Wellenausbreitung im Ansaugtrakt.....	200
10.1.3.2 Schallabstrahlung der elastischen Strukturen.....	201
10.1.3.3 Transfermatrixmethode für das Ansaugsystem.....	202
10.1.4 Akustikmaßnahmen.....	202
10.1.4.1 Körperschalleintrag.....	203
10.1.4.2 Oberflächenabstrahlung.....	203
10.1.4.3 Mündungsschall.....	203
10.1.4.4 Sounddesign.....	204
10.1.5 Validierung.....	205
10.1.5.1 Lautsprecher-Prüfstand.....	205
10.1.5.2 Dynamische Steifigkeit.....	206
10.1.5.3 Messungen mit Motoranregungen.....	207
10.1.5.4 Fahrzeugmessungen.....	207
10.2 Abgasanlage, Schalldämpfer.....	207
10.2.1 Funktion und Aufbau.....	207

10.2.2	Testmethoden	210
10.2.3	Komponentenbeitrag zum Abgasgeräusch	210
10.2.3.1	Krümmer	210
10.2.3.2	Katalysator	211
10.2.3.3	Dieselpartikelfilter	211
10.2.3.4	Schalldämpfer	212
10.2.3.5	Schaltbare Abgasklappe	213
10.2.3.6	Aktiver Schalldämpfer (ANC)	214
10.2.3.7	Zweiflutige Abgasanlage	215
10.2.4	Körperschallemission der Komponenten	216
10.2.4.1	Schalldämpfer	216
10.2.4.2	Katalysator	217
10.2.5	Auswirkung beim Innengeräusch	217
10.2.5.1	Prognose des Mündungsanteils	217
10.2.5.2	Einfluss Mündungsgeräusch	218
10.2.5.3	Einfluss Aufhängung	219
10.2.6	Sound Design	220
10.2.7	Berechnung der Abgasanlagenakustik	221
11	Reifen-Fahrbahngeräusch	223
11.1	Reifeneigenschaften	223
11.2	Reifeneinfluss auf das Rollgeräusch	225
11.2.1	Strukturschall durch Reifenschwingungen	226
11.2.1.1	Anregung	226
11.2.1.2	Übertragung	228
11.2.1.3	Abstrahlung	229
11.2.2	Kompressionsgeräusch	230
11.2.3	Horneffekt	230
11.2.4	Resonanzphänomene	230
11.2.5	Zielkonflikte	231
11.3	Fahrbahneinfluss auf das Rollgeräusch	232
11.4	Rollgeräusch außerhalb des Fahrzeugs	234
11.5	Rollgeräusch innerhalb des Fahrzeugs	235
11.5.1	Transferpfade ins Fahrzeug	235
11.5.2	Geräuschphänomene	236
11.5.3	Luftschwingungen im Reifeninnern	236
12	Geräusche mechatronischer Systeme	239
12.1	Elektrische Stellmotoren	239
12.2	Lüfter und Gebläse	241
12.3	Fahrzeugklimatisierung	243
12.4	Lenkungssystem	246
12.4.1	Kavitationsgeräusche	247
12.5	Bremssystem	248
12.5.1	Regelgeräusche	249
12.5.2	Rubbeln	249
12.5.3	Quietschen	249
12.6	Biegeschläffe Leitungen	250
12.7	Hybridantrieb	254
13	Störgeräusche	256
13.1	Kontaktstellengeräusche	256
13.1.1	Anregungsarten	257
13.1.2	Stick-Slip-Effekt	259
13.1.3	Anschlag-Effekt	260
13.1.4	Bewertungs- und Auslegungskriterien	262
13.2	Audio-Störgeräusche	265

14 Außengeräusch	267
14.1 Standgeräusch.....	267
14.2 Fahrgeräusche.....	268
14.2.1 Reifen/Fahrbahngeräusch.....	269
14.2.2 Antriebsgeräusch.....	271
14.2.3 Vorbeifahrt nach ISO 362.....	272
14.3 Akustische Wahrnehmbarkeit.....	273
14.3.1 Einleitung.....	273
14.3.2 Relevante Verkehrssituationen.....	274
14.3.3 Psychoakustische Grundlagen.....	274
14.3.4 Experimentelle Ermittlung der akustischen Wahrnehmbarkeit.....	275
14.3.5 Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit.....	276
14.3.6 Beeinflussung durch andere Faktoren.....	278
14.3.6.1 Gangwahl.....	278
14.3.6.2 Ablenkung.....	278
14.3.6.3 Binaurale Faktoren.....	279
15 Berechnung und Simulation	280
15.1 Mehrkörpersimulation (MKS).....	280
15.2 Struktur-Optimierung.....	281
15.3 Akustik-Berechnung (FEM).....	283
15.3.1 Modale Gleichungen.....	284
15.3.2 Äquivalente abgestrahlte Schalleistung.....	285
15.4 Boundary Element Methode (BEM).....	286
15.5 Statistische Energieanalyse (SEA).....	288
15.6 Aeroakustik-Berechnung (CAA).....	290
15.6.1 Navier-Stokes-Gleichungen.....	291
15.6.2 Lattice-Boltzmann-Methode.....	292
15.7 Substrukturtechnik.....	293
15.7.1 Methodische Grundlagen.....	293
15.7.2 EMPC-Methode.....	295
15.7.3 Identifikation von Betriebsanregungen.....	296
16 Messverfahren	299
16.1 Binaurale Messtechnik.....	299
16.2 Ortung von Schallquellen.....	300
16.2.1 Intensitätssonde.....	300
16.2.2 Akustische Nahfeldholografie.....	301
16.2.3 Akustische Fernfeldholografie.....	302
16.3 Akustische Systemidentifikation.....	304
16.3.1 Übertragungsfunktionen.....	304
16.3.2 Impulshammermethode.....	304
16.4 Transferpfadanalyse (TPA).....	306
16.4.1 Rechnerische Luftschall-TPA.....	307
16.4.2 experimentelle Körperschall-TPA.....	309
16.4.3 Experimentelle Luftschall-TPA.....	309
16.5 Modalanalyse und -synthese.....	310
16.5.1 Modalzerlegung.....	310
16.5.2 Experimentelle Modalanalyse.....	311
16.6 Betriebsschwingungsanalyse.....	313
16.6.1 Laser-Scanning-Vibrometrie.....	313
16.6.2 Speckle-Interferometrie.....	314
17 Vibroakustische Messtechnik	316
17.1 Einsatzbereiche.....	316
17.1.1 Technisches Umfeld.....	316
17.1.2 Messabläufe.....	317

17.2	Vibroakustische Sensoren.....	318
17.2.1	Beschleunigungssensor	319
17.2.2	Messmikrofon	320
17.2.3	Laservibrometer	321
17.3	Signalverarbeitung.....	322
17.3.1	Kalibrierung	322
17.3.2	Signalkonditionierung	322
17.3.3	Drehzahlerfassung.....	323
17.3.4	Ergänzende Messgrößen	324
17.4	Analyse-Methoden	325
17.4.1	Frequenzanalysen	325
17.4.2	Ordnungsanalysen	327
17.4.3	Ordnungsfilterung im Motorenbau.....	327
17.4.4	Grad-Kurbelwinkel-Analyse	328
17.4.5	Drehschwingungsanalyse	329
17.4.6	Hauptkomponentenanalyse	329
17.4.7	Mehrdimensionale Ergebnisdarstellung	331
17.5	Audio-Synthese, Auralisierung	331
17.5.1	Geräusch-Synthese.....	332
18	Vibroakustische Prüftechnik	335
18.1	Dynamischer Motorprüfstand.....	335
18.2	Freifeldraum	335
18.3	Hallraum	336
18.4	Fenster-Prüfstand.....	339
19	Anlagen	341
20	Sachwortverzeichnis	342