

Inhalt

	Vorbemerkung	1
Teil A	Einführung	
I.	Berechnung im Entwicklungsprozeß	9
	1. Einleitung	9
	2. Fahrleistung und Verbrauch	11
	3. Motormechnik	13
	4. Motorthermodynamik	18
	5. Strömungsmechanik	24
	6. Triebstrang	29
	7. Fahrwerk	32
	8. Karosserie	37
	9. Gesamtfahrzeug	40
	10. Insassen-Sicherheit und Schutz von Personen außerhalb des Fahrzeugs	48
	11. Berechnung und Entwicklungsablauf	51
II.	Einführung in die Fahrzeugdynamik	
	1. Einleitung	53
	2. Fahrzeugschwingungen	54
	2.1 Überblick der Anregungsgrößen und Schwingungsphänomene	54
	2.2 Wahrnehmung und Bewertung von Schwingungen	57
	2.3 Beispiele für Fahrzeugschwingungen	61
	3. Fahrzeugakustik	66
	3.1 Überblick der Geräuschquellen und Übertragungswege	66
	3.2 Wahrnehmung und Bewertung von Geräuschen	71
	3.3 Beispiele für Fahrzeuginnengeräusche	74
	4. Einsatz von Berechnungsverfahren	80
	4.1 Untersuchung des Gesamtfahrzeuges	80
	4.2 Untersuchung von Fahrzeug-Teilsystemen	83
	5. Zusammenfassung	85
	Schrifttum	86
III.	Simulationsmodelle diskreter Systeme	
	1. Einleitung	87
	1.1 Modellbildung, Abgrenzung kontinuierlich-diskret-finit	87
	1.2 Prinzipien zum Aufstellen der Differentialgleichungen	87
	1.3 Lösen der Differentialgleichungen	89
	2. System mit einem Freiheitsgrad	89
	2.1 Eigenschwingung	90

2.2	Erzwungene Schwingung im Frequenzbereich	93
2.2.1	Harmonische Anregung	94
2.2.2	Allgemeine harmonische Anregung	96
2.2.3	Allgemeine transiente Anregung	97
2.2.4	Laplace-Transformation	98
2.3	Behandlung im Zeitbereich	99
3.	Systeme mit zwei oder mehr Freiheitsgraden	100
3.1	Aufstellen der Differentialgleichung eines ungedämpften Systems	100
3.1.1	Eigenschwingung	100
3.1.2	Modale Entkopplung	103
3.2	Das gedämpfte System mit Anregung	104
3.2.1	Eigenschwingung	105
3.2.2	Erzwungene Schwingung im Frequenzbereich	108
3.2.3	Frequenzgangbestimmung mit Hilfe der Modaltransformation	110
3.2.4	Modale Entkopplung des schwach gedämpften Systems	114
3.2.5	Modale Entkopplung des stark gedämpften Systems	116
4.	Zusammenfassung	118
	Schrifttum	119

Teil B Modellierung kontinuierlicher Systeme.

I.	Einführung in die Finite-Element-Methode	
1.	Einleitung	123
2.	Kontinuumsmechanik	123
2.1	Die Bewegungsgleichungen	123
2.2	Werkstoffgesetze	127
2.3	Ein- und mehrdimensionale Kontinua	129
2.4	Randbedingungen	131
3.	Die Finite-Element-Methode	131
3.1	Strategie der Lösungsapproximation	131
3.2	Finite Elemente	133
3.3	Aufbau algebraischer Gleichungssysteme	134
3.4	Numerik algebraischer Gleichungssysteme	135
4.	Schlußbemerkungen	135
	Schrifttum	136
II.	MSC/NASTRAN Einführung	
1.	Einleitung	137
2.	Programm-Architektur	138
2.1	Grundkonzept	138
2.2	DMAP-Sprache	139
2.3	Numerik mit großen Matrizen	140
3.	Element-Bibliothek	141
3.1	Allgemeines	141
3.2	Feder- und Massenelemente	142

3.3	Eindimensionale Elemente	143
3.4	Zweidimensionale Elemente	143
3.5	Dreidimensionale Elemente	144
4.	Materialgesetze	145
4.1	Lineares Materialverhalten	145
4.2	Nichtlineares Materialverhalten	145
5.	Lastdefinition und Auflagerbedingungen	146
5.1	Statische Lasten	146
5.2	Dynamische Lasten	146
5.3	Auflagerbedingungen	147
6.	Verfügbare Berechnungsarten	147
6.1	Statik	147
6.2	Dynamik	148
6.3	Temperaturfeldanalyse	149
6.4	Sensitivitätsanalyse und Optimierung	149
6.5	Aeroelastische Analyse	150
6.6	DMAP-Programm	151
7.	Spezielle Techniken	151
7.1	Superelemente	151
7.2	Zyklische Symmetrie	152
7.3	Modellierung von Regelkreisen	153
8.	Demonstrationsbeispiel	154
8.1	Beschreibung des Problems	154
8.2	MSC/NASTRAN-Input	154
8.3	MSC/NASTRAN-Output	156
9.	Einsatzmöglichkeiten in der Fahrzeugtechnik	156
9.1	Allgemeiner Überblick	156
9.2	Beispiele aus der Praxis	157
9.2.1	Motorblock mit Getriebegehäuse	157
9.2.2	PKW-Karosserie	160
9.2.3	Optimierung einer Stoßstange	160
10.	Schlußbemerkungen	161
	Schrifttum	162
III.	MSC/NASTRAN - Einsatz für Eigenwertanalysen	
1.	Einleitung	163
2.	Reelle Eigenwertanalyse	164
2.1	Grundgleichung	164
2.2	MSC/NASTRAN Lösungsalgorithmen	165
2.2.1	Die Methode von Givens und Householder	165
2.2.2	Die inverse Vektoriteration	168
2.2.3	Die LANCZOS Methode	170
2.3	MSC/NASTRAN User Interface	172
2.4	Transformation auf Modale Koordinaten	174
2.4.1	Mathematik der Modaltransformation	174
2.4.2	Einsatz der Modal-Transformation in MSC/NASTRAN	176

3.	Komplexe Eigenwertanalyse	176
3.1	Grundgleichung	176
3.2	MSC/NASTRAN Lösungsalgorithmen	177
3.2.1	Die Hessenberg Methode	177
3.2.2	Die Determinanten Methode	178
3.2.3	Die komplexe inverse Vektoriteration	179
3.2.4	Komplexe LANCZOS Methode	180
3.3	MSC/NASTRAN User Interface	180
4.	Dynamische Reduktionsverfahren	181
4.1	Allgemeines	181
4.2	Die GUYAN Reduktion	181
4.3	Allgemeine Dynamische Reduktion	184
4.4	Component Mode Synthesis (CMS)	185
5.	Abschließende Bemerkungen	186
	Schrifttum	187
IV.	Analyse der Eigenfrequenzen und Eigenformen von Antriebsaggregaten	
1.	Einleitung	189
2.	Bestimmung, Identifikation und Korrelation der Eigenformen und Eigenfrequenzen	190
2.1	Methode der finiten Elemente	190
2.1.1	FE-Modelle	191
2.1.2	Berechnung und Ergebnisdarstellung	194
2.2	Experimentelle Modalanalyse	195
2.3	Korrelation der Eigenformen	196
3.	Anwendungsbeispiele zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von Triebwerken und Triebwerkskomponenten	197
3.1	Berechnung der Eigenformen und Eigenfrequenzen eines Vierzylinder-Reihenmotorblocks und Vergleich mit gemessenen Werten	197
3.1.1	FE-Analyse	198
3.1.2	Versuchsdurchführung	200
3.1.3	Korrelation der Ergebnisse	202
3.2	Verbesserung des Schwingungsverhaltens eines Antriebsaggregates mit Vierzylinder-Reihenmotor durch Einsatz einer strukturierten Aluminiumölwanne	208
3.2.1	Modellaufbau	209
3.2.2	Ergebnisse der FE-Analyse	211
	Schrifttum	214
V.	Analyse des Schwingungsverhaltens des Gesamtfahrzeuges mit Konzeptmodellen	
1.	Einleitung	215
2.	Aufbau des Gesamtfahrzeugkonzeptmodelles	216
2.1	Modellierung der elastischen Karosserie	217
2.2	Modellierung der übrigen Bestandteile	219

3.	Anwendungsmöglichkeiten	221
4.	Validierung	222
5.	Anwendungsbeispiele	226
	5.1 Simulation von Gesamtfahrzeugschwingungen	226
	5.2 Einfluß von Verbindungssteifigkeiten auf Karosserie- eigenschaften	230
6.	Zusammenfassung und Ausblick	232
	Schrifttum	234
VI.	Analyse im Frequenz- und Zeitbereich mit der FE-Methode . .	
1.	Einleitung	235
2.	Grundlagen der Dynamik-Analysen mit MSC/NASTRAN . .	235
	2.1 Arten von Dynamik-Analysen	235
	2.2 Direkte versus modale Formulierung	235
	2.3 Direkte Formulierung	236
	2.4 Modale Formulierung	237
	2.5 Reelle Eigenwertanalyse	237
	2.6 Modaler Ansatz	238
	2.7 Lösung der Gleichung im Modalraum	239
	2.8 Gekoppelte und entkoppelte Dynamik-Gleichungen . .	241
	2.9 Transformation in den physikalischen Raum	242
	2.10 Physikalische Beiträge aus den Eigenformen	243
3.	Anwendungsbeispiele	245
	3.1 Modellbeschreibung	245
	3.2 Anregungsarten	248
	3.3 Auswertung nach der Methode der Bestimmung der "Physikalischen Beiträge aus den Eigenformen"	248
	3.4 Andere Auswertungen und Darstellungen von Ergebnissen	257
4.	Schlußfolgerung	265
	Schrifttum	266
VII.	Geräusch- und Schwingungsanalyse an der Rohkarosse	
1.	Karosseriebezogene Geräusch- und Schwingungsphänomene des Fahrzeuges	267
2.	Konstruktive Gesichtspunkte	268
3.	Rechnerische Analyse	270
	3.1 Nachgiebigkeitsuntersuchungen an Anlenkpunkten	270
	3.2 Gesamtkarosserieschwingungen	274
	3.3 Innengeräuschberechnung	277
VIII.	Schalldruckberechnung im PKW-Innenraum	
1.	Einleitung	279
2.	Berechnungsverfahren	279
3.	Finite Element Modellierung	284
4.	Ablauf einer Schalldruckberechnung	286
5.	Ergebnisse der Rechnungen und Vergleich mit Messungen .	287
	5.1 Offene Rohkarosserie in Ausbaustufe (a)	288
	5.2 Geschlossene Rohkarosserie in Ausbaustufe (b)	289

	5.3 Geschlossene Rohkarosserie in Ausbaustufe (c)	294
	5.4 Geschlossene Rohkarosserie in Ausbaustufe (d)	297
	5.5 Geschlossene Rohkarosserie in Ausbaustufe (e)	299
	6. Zusammenfassung und Bewertung	302
	Schrifttum	304
IX.	Die experimentelle Modalanalyse, ein Mittel zum Verifizieren von strukturdynamischen Rechenmodellen	
	1. Einleitung	305
	2. Bezeichnungen	306
	3. Bewegungsgleichungen	307
	4. Experimentelle Bestimmung der modalen Kennwerte von elastomechanischen Systemen	313
	4.1 Phasenresonanzverfahren	316
	4.1.1 Schritt 1: Identifizierung der Eigenfrequenzen	319
	4.1.2 Schritt 2: Isolierung der Eigenschwingungsformen	321
	4.1.3 Schritt 3: Bestimmung der modalen Dämpfung und generalisierten Massen	322
	4.2 Phasentrennungsverfahren	326
	4.2.1 Curve-Fitting-Verfahren	326
	4.2.1.1 Experimentelle Vorgehensweise	327
	4.2.1.2 Datenauswertung	329
	5. Zusammenfassung	335
	Schrifttum	336
X.	Formoptimierung von Bauteilen für verbessertes Schwingungsverhalten	
	1. Einleitung	341
	2. Theorie der Formoptimierung für die Eigenfrequenz als Zielfunktion	343
	3. Berechnung der Formänderung	344
	4. Beispiele der Frequenzoptimierung	345
	4.1 Eine einseitig eingespannte Platte	346
	4.2 Ein prismatischer beidseitig eingespannter Balken	348
	5. Zusammenfassung	351
	Schrifttum	352
XI.	Die Boundary Element Methode (BEM)	
	1. Einleitung	353
	1.1 Finite Berechnungsverfahren	353
	1.2 Die BEM: das Prinzip	354
	1.3 Die historische Entwicklung der BEM	354
	2. Die BEM in der linearen Elastostatik	356
	2.1 Grundgleichungen und Randbedingungen	356
	2.2 Die direkte BEM-Formulierung	358
	2.3 Die Singularitäten	359
	2.4 Algebraisierung der BEM-Gleichung	360
	2.5 Die (numerische) Integration	361

2.5.1 Die regulären Integrale	361
2.5.2 Die schwach singulären Integrale	361
2.5.3 Die stark singulären Integrale	362
2.5.4 Die "fast"-singulären Integrale	362
2.6 Lösungstechniken	362
2.7 Konvergenz, Genauigkeit	363
3. BETSY/DBETSY - die BEM-Software	365
3.1 Die Programmfamilie BETSY	365
3.2 Das DV-System DBETSY	366
4. Anwendungsbeispiele	368
4.1 Nockenwelle mit Querbohrung	368
4.2 Geschränkte Kurbelwellenkröpfung	370
5. Die BEM in der linearen Elastodynamik	371
5.1 Transiente Probleme	371
5.2 Periodische Probleme	373
6. Weitere Anwendungsgebiete der BEM (eine Auswahl)	374
6.1 Wärmeleitung	374
6.2 Schallabstrahlung	375
6.3 Kirchhoff-Platten	375
6.4 Bruchmechanik	375
6.5 Nichtlineares Material	375
6.6 Strömungsmechanik	376
6.7 Anwendungsnahе Problemfelder	376
Schrifttum	377

Teil C Modellierung diskreter Systeme

I. Vergleich verschiedener MKS-Programme und Anwendungsbeispiele

1. Einleitung	383
2. MKS- und Simulationssysteme	383
2.1 Prinzipien der Mechanik, Differentialalgebraische Gleichungssysteme	384
2.2 MKS- und Simulationsprogramme	388
2.3 Vergleich verschiedener Programme	389
2.4 Konzept eines idealen MKS- und Simulationsprogrammes	390
3. Anwendungsbeispiele	398
3.1 Klassische Anwendungsfelder	398
3.2 Neuere Fragestellungen	399
3.3 Belastungsanalyse	400
3.3.1 Modellhandling	402
3.3.2 Lenkradwobbeln (Shimmy)	405
4. Schlußbemerkungen	408
Schrifttum	409

II. ADAMS-Grundlagen mit Anwendungen

1. Einleitung	411
1.1 Der Beitrag	411

1.2 Allgemeines	411
2. ADAMS aus der Sicht des Anwenders	414
2.1 Ein erstes Beispiel	414
2.2 Die wichtigsten ADAMS-Elemente	416
2.2.1 PARTs und MARKERs	416
2.2.2 JOINTs, JPRIMs und MOTIONs	418
2.2.3 SFORCEs, FIELDS, BEAMs und BUSHINGs	419
2.2.4 Was man sonst noch braucht oder brauchen kann	422
2.2.5 User written subroutines	423
2.3 Modelltypen und Berechnungsarten	426
2.3.1 Kinematische und dynamische Modelle	426
2.3.2 Statik, Quasistatik, Kinematik, Dynamik	426
2.3.3 Die Modellentwicklung	428
2.4 Module, Files, Pre- und Postprozessoren	428
2.4.1 ADAMS	428
2.4.2 ADAMSPP, ADAMS/POST	429
2.4.3 ADAMS/VIEW, ADAMS/ANTRO, DMP	429
2.4.4 ADAMS/MODAL	431
2.4.5 APS	431
3. Über die Mathematik in ADAMS	432
3.1 Modell-Element	432
3.2 Fundamentale Lösungsmethoden	434
3.3 Analyse-Methoden	435
3.4 Abschlußkommentar	436
4. Anwendungsbeispiele	437
Schrifttum	439
III. DMKS90 - ein universelles Simulationsprogramm der Dynamik von Mehrkörpersystemen mit Anwendungen in der Fahrzeugdynamik	
1. Allgemeines	441
2. Methodischer Hintergrund	441
2.1 Phänomenologie von Mehrkörpersystemen	443
2.2 Der Lagrange-Formalismus für holonome Starrkörpersysteme	444
2.3 MKS mit kinematischer Baumstruktur	446
2.4 MKS mit zusätzlichen Bindungen	448
2.5 Linearisierte Bewegungsgleichung	449
3. Softwarestruktur	449
4. Benutzeroberfläche	451
5. Beispiele	452
Schrifttum	457
IV. MATRIXx Grundlagen und Anwendung	
1. Allgemeines zum Programmpaket MATRIXx	459
2. Regelkreisuntersuchung und Reglerentwurf	460
3. Graphische Modellierung und Simulation	461
4. Signalverarbeitung und Systemidentifikation	462

5.	Anwendungsbeispiel	465
	Schrifttum	472
V.	Analyse der Drehschwingungen im Antriebsstrang mit DRESP. .	
1.	Einleitung	473
2.	Wozu Simulation?	473
3.	Modelle zur Drehschwingungssimulation	477
4.	Aufbau und Lösungsverfahren der Differentialgleichungen in DRESP	481
5.	Erläuterung des Arbeitsablaufs an einem Beispiel	488
	5.1 Modellaufbau	489
	5.2 Simulationsergebnisse	495
	5.2.1 Darstellung der Ergebnisse	496
	5.2.2 Auswertung der Ergebnisse	498
6.	Beispielrechnung zum Einsatz eines Zweimassenschwungrades	503
	6.1 Untersuchung des Antriebsstrangs im Originalzustand .	504
	6.2 Der Einsatz eines Zweimassenschwungrades	507
	6.3 Untersuchung der Gaswechselreaktionen	509
	Zusammenfassung und Ausblick	512