

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung in MATLAB®	1
1.1 Der Desktop, ein Überblick	2
1.2 Online-Hilfe	4
1.3 Einige Bemerkungen zur Arbeitsweise von MATLAB	6
1.4 MATLAB-Grundlagen	7
1.4.1 Skalare Operationen und Variablenverwaltung	7
1.4.2 Mathematische Funktionen	10
1.4.3 Vektoren und Matrizen	12
1.4.4 Lineare Gleichungssysteme	22
1.4.5 Datenstrukturen, mehrdimensionale Matrizen, Structure und Cell Arrays	25
1.4.6 Vergleichsoperatoren und logische Operatoren	27
1.4.7 Schleifen und Verzweigungen	29
1.4.8 Daten-Ein- und -Ausgabe	32
1.4.9 Verzeichnispriorität	33
1.5 Programmerstellung, MATLAB Script und Function	34
1.5.1 MATLAB Editor	35
1.5.2 MATLAB Script	36
1.5.3 MATLAB Function	39
1.5.4 Code-Beschleunigung, der Profiler	46
1.6 Grafik	48
1.6.1 Grafikfenster (Figure), Erstellung und Verwaltung	50
1.6.2 2D-Grafik	51
1.6.3 3D-Grafik	64
1.7 Animation von 2D- und 3D-Modellen	71
1.7.1 Modellerstellung	71
1.7.2 Animations-Grafik	71
1.7.3 2D-Animation einfacher Linien-Modelle	74
1.7.4 Animation mit geometrischen 3D-Modellen	77
1.8 Computeralgebra unter MATLAB, die Symbolic Math Toolbox	86
1.8.1 Online-Hilfe	87
1.8.2 Symbolische Objekte	87
1.8.3 Vereinbarung symbolischer Variablen und Ausdrücke (Objekte)	88
1.8.4 Substitution symbolischer Größen, der subs Befehl	90
1.8.5 Beispiele aus der Analysis	90
1.8.6 Algebraische Gleichungssysteme, der solve Befehl	91
1.8.7 Gewöhnliche Differenzialgleichungen, der dsolve Befehl	93
1.8.8 Beispiel aus der linearen Algebra	96
1.8.9 Übergang zur Numerik	98

2 Modellbildung	99
2.1 Bemerkungen zur Schreibweise	100
2.2 Strukturen der Bewegungsgleichungen	101
2.3 Grundlagen	101
2.3.1 Kinematik starrer Körper	101
2.3.2 Kinematik von Mehrkörpersystemen	108
2.3.3 Kinetik, Impuls- und Drallsatz	113
2.4 Newton-Euler-Methode	116
2.4.1 Rechnerorientierte Vorgehensweise	120
2.5 Lagrange'sche Gleichung 2. Art	123
2.6 Linearisierung nichtlinearer Bewegungsgleichungen	127
2.7 Anwendung der Modellerstellung	129
3 Lineare Schwingungsmodelle	137
3.1 Bewegungsgleichungen	138
3.2 Eigenschwingungen und freie Schwingungen	140
3.2.1 Das Eigenwertproblem in MATLAB, allgemeine Betrachtung	140
3.2.2 Numerische Behandlung der Eigenwertprobleme	142
3.3 Erzwungene Schwingungen	154
3.3.1 Konstante Erregung	155
3.3.2 Harmonisch angeregte mechanische Systeme	156
4 Simulation unter Simulink®	167
4.1 Zur Funktionsweise	167
4.1.1 Block-Struktur	167
4.1.2 Simulationsablauf	168
4.2 Die Integrationsverfahren	169
4.2.1 Methoden und Bezeichnungen	171
4.2.2 Steifigkeit der Differenzialgleichung	175
4.2.3 Bemerkungen zur Wahl der Verfahren	176
4.3 Simulink-Grundlagen	177
4.3.1 Die Modell-Library	177
4.3.2 Der Simulink-Editor, ein erstes Modell	178
4.3.3 Einstellung des Integrators und des Datentransfers	180
4.3.4 Datentransfer über den Workspace	181
4.3.5 Simulationsaufruf aus der MATLAB Umgebung	181
4.3.6 Hilfsmittel zur Modellerstellung und Datenauswertung	183
4.4 Simulink-Modellierung eines einfachen Projekts	196
4.4.1 1/4-Fahrzeugmodell mit Reibungsdämpfer und die Bewegungsgleichungen	196
4.4.2 Aufbereitung der Bewegungsgleichungen	197
4.4.3 Das Fahrbahnprofil	200
4.4.4 Parametrisierung des Zustandsmodells im State Space Block	204
4.4.5 Modellierung der Reibelemente	205
4.4.6 Die Startroutine für die MATLAB-Umgebung	208
4.4.7 Simulink-Modelle und Simulationsergebnisse	209

4.5	Algebraische Schleifen in dynamischen Modellen	214
4.5.1	Algebraische Schleifen	214
4.5.2	System mit algebraischer Schleife	215
4.6	Vektorielle Betrachtungsweise und Modellierung	218
4.6.1	Simulationsergebnisse, selbsterregte Schwingungen und Mitnahme-Effekte	219
4.6.2	Nichtlineare Gleichungen höherer Ordnung	220
4.7	Modellierung mit Hilfe einer S-Function	223
4.7.1	M-File S-Function	224
4.7.2	C Mex-File S-Function	231
5	Simulation unter MATLAB®	235
5.1	Struktur der Differenzialgleichungen	235
5.1.1	Beispiele für explizite Formulierungen	238
5.2	Der grundsätzliche Aufbau eines Simulationsprogramms	247
5.2.1	Möglichkeiten zum Integratoraufruf unter MATLAB	248
5.3	Integration von Systemen in Standardform	251
5.3.1	Unwuchtiger Motor auf elastischem Fundamentblock	252
5.4	Differenzial-algebraische Gleichungen	259
5.4.1	Mathematische Hintergründe	259
5.4.2	Möglichkeiten unter MATLAB und Simulink	261
5.4.3	Mechanische Bewegungsgleichungen mit algebraischen Bindungsgleichungen	262
5.4.4	Überführung in gewöhnliche Differenzialgleichungen	270
5.4.5	Übergang auf Minimalkoordinaten	276
5.5	Implizite Differenzialgleichungen	282
5.6	Integration gewöhnlicher Differenzialgleichungen mit Unstetigkeiten	284
5.6.1	Beispiele für Unstetigkeiten in den Bewegungsgleichungen	285
5.6.2	Formulierung von Schaltfunktionen	287
5.6.3	Lokalisierung der Schaltpunkte	288
5.6.4	Beispiele zur Zwei-Punkt-Schaltlogik	290
5.6.5	Dreipunkt-Schaltlogik am Beispiel eines Zwei-Massen-Schwingers mit Reibung	299
5.7	Randwertprobleme gewöhnlicher Differenzialgleichungen	312
5.7.1	Grundlagen	312
5.7.2	Standardprobleme am Beispiel der Kettenlinie und des Basketballwurfs	314
5.7.3	Mehrpunkt-Randwertprobleme	322
5.7.4	Periodische Schwingungen nichtlinearer Systeme	326
6	Modellierung und Simulation mit dem Stateflow® Tool	335
6.1	Stateflow-Objekte	335
6.1.1	Das Chart	336
6.1.2	Zustand und Zustand-Label	337
6.1.3	Transitionen	338
6.1.4	Default Transition	340
6.1.5	Verbindungspunkte	340
6.1.6	Der Model Explorer	340
6.1.7	Erweiterte Strukturen	341

6.2	Fahrzeugmodell mit Reibungsdämpfer	342
6.2.1	Bewegungsgleichungen und Schaltbedingungen	342
6.2.2	Simulink-Modell mit Chart	343
6.3	Springender Ball, ein strukturvariables Modell	348
7	Physikalische Modelle unter Simulink®	353
7.1	Modellieren mit Simscape	354
7.1.1	Netzwerkerstellung mit der Foundation Library, ein Beispiel	355
7.1.2	Simscape Sprache, Grundlagen	358
7.2	SimMechanics der ersten Generation	361
7.2.1	Funktionsweise	362
7.2.2	Untersuchungsmethoden	363
7.2.3	Erstes SimMechanics-Modell	363
7.2.4	Schwingungen eines Roboter-Modells	367
7.2.5	Arbeitsweise des Joint Stiction Actuators	372
7.2.6	Visualisierung und Animation der Maschine	376
7.2.7	Einige mathematische Aspekte	377
7.2.8	Anwendungen und Ausblick	380
7.3	SimMechanics der zweiten Generation	381
7.3.1	Einige Komponenten aus der Block-Library	382
7.3.2	Modellierung des Roboters mit hydraulischem Stellzylinder	387
7.3.3	Reibmodell aus Simscape	390
8	Projekte	391
8.1	Permanentmagnet gelagerter Rotor	391
8.1.1	Systembeschreibung	392
8.1.2	Rotor- und Magnetmodellierung	393
8.1.3	Die aktive Stabilisierung, Reglerstrukturen	394
8.1.4	Das kontinuierliche Modell	395
8.1.5	Reglerentwürfe	396
8.1.6	Parametrierung und Reglerkoeffizienten	399
8.1.7	Simulink-Modelle	399
8.1.8	Simulationsergebnisse	400
8.2	Störgrößenkompensation harmonischer und konstanter Störungen	402
8.2.1	Grundlagen zur Strecke und zum Beobachterentwurf	403
8.2.2	Parameterfile und Simulink-Modell	405
8.2.3	Beobachter über S-Funktion	406
8.2.4	Analytische Ermittlung der Lösungen	406
8.2.5	Ergebnisse	410
8.3	Schwingungstilger mit viskoelastischem Anschlag	412
8.3.1	Das stationäre System ohne Anschlag	413
8.3.2	Entwurf des Simulink-Modells	415
8.3.3	Schwingungsantwort mit einem Sinus-Sweep des Systems ohne/mit Anschlag	420
8.4	Axialkolbenverdichter einer Pkw-Klimaanlage	422
8.4.1	Das Modell	422

8.4.2	Der Hebelmechanismus	423
8.4.3	Bewegungsgleichungen nach Lagrange	424
8.4.4	Das M-File, erste Ergebnisse	427
8.4.5	Modellbasierter Entwurf mit SimMechanics, 1. Generation	427
8.4.6	Vergleich der Ergebnisse bezüglich der Gelenkkräfte	429
8.4.7	Stationäre Lage, die Trimming-Methode	430
8.4.8	Der Verdichter als SimMechanics-Modell, 1. Generation	431
8.5	Dreifachpendel,	432
8.5.1	Lagrange'sche Gleichung 2. Art	434
8.5.2	Newton-Euler-Formalismus	435
8.5.3	Übergang zur Numerik und Integration	438
8.5.4	Animationsmodell	439
8.5.5	Schwingungsverhalten	441
8.5.6	Vorwärtsdynamik mit SimMechanics	443
8.5.7	Inverse Dynamik	446
8.6	Hubschwingungen eines Viertelfahrzeugs mit nichtlinearem Stoßdämpfer	447
8.7	Dynamik des Levitron-Kreisels	449
8.8	Balancierender Roboter	450
8.8.1	Motivation	451
8.8.2	Modellvoraussetzungen und Annahmen	451
8.8.3	Herleitung der Bewegungsgleichungen	452
	Literaturverzeichnis	453
	Stichwortverzeichnis	457