

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung in MATLAB®</b>	<b>1</b>
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

<b>2</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>99</b>
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
<b>3</b>	<b>Lineare Schwingungsmodelle</b>	<b>137</b>
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
<b>4</b>	<b>Simulation unter Simulink®</b>	<b>167</b>
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
<b>5</b>	<b>Simulation unter MATLAB®</b>	<b>235</b>
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
<b>6</b>	<b>Modellierung und Simulation mit dem Stateflow® Tool</b>	<b>335</b>
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
<b>7</b>	<b>Physikalische Modelle unter Simulink®</b>	<b>353</b>
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
<b>8</b>	<b>Projekte</b>	<b>391</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>453</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>457</b>