

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATLAB Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Erste Schritte mit MATLAB .....	5
2.1.1	Der MATLAB-Desktop .....	5
2.1.2	Die MATLAB-Hilfe .....	7
2.1.3	Zuweisungen .....	8
2.1.4	Mathematische Funktionen und Operatoren .....	9
2.2	Variablen .....	9
2.2.1	Datentypen in MATLAB .....	10
2.2.2	Vektoren und Matrizen .....	10
2.2.3	Funktionen und Operatoren für Vektoren und Matrizen .....	12
2.2.4	Strukturen .....	14
2.2.5	Cell Arrays .....	15
2.2.6	Mehrdimensionale Arrays .....	16
2.2.7	Verwalten von Variablen .....	17
2.3	Ablaufsteuerung .....	19
2.3.1	Vergleichsoperatoren und logische Operatoren .....	19
2.3.2	Verzweigungsbefehle <code>if</code> und <code>switch</code> .....	21
2.3.3	Schleifenbefehle <code>for</code> und <code>while</code> .....	21
2.3.4	Abbruchbefehle <code>continue</code> , <code>break</code> und <code>return</code> .....	22
2.4	Der MATLAB-Editor .....	23
2.4.1	Der Live Editor .....	25
2.4.2	Das Comparison Tool .....	26
2.5	MATLAB-Funktionen .....	27
2.5.1	Funktionen mit variabler Parameterzahl .....	28
2.5.2	Lokale, globale und statische Variablen .....	29
2.5.3	Hilfetext in Funktionen .....	30
2.5.4	Function Handles .....	31
2.5.5	Anonymous Functions .....	32
2.5.6	P-Code und <code>clear functions</code> .....	32
2.6	Code-Optimierung in MATLAB .....	33
2.6.1	Der MATLAB-Profiler .....	33
2.6.2	Optimierung von Rechenzeit und Speicherbedarf .....	34
2.6.3	Tipps zur Fehlersuche und Fehlervermeidung .....	35

2.7	Übungsaufgaben.....	37
2.7.1	Rechengenauigkeit.....	37
2.7.2	Fibonacci-Folge.....	37
2.7.3	Funktion gerade.....	37
2.7.4	Berechnungszeiten ermitteln.....	38
<b>3</b>	<b>Eingabe und Ausgabe in MATLAB</b>	<b>39</b>
3.1	Steuerung der Bildschirmausgabe.....	39
3.2	Benutzerdialoge.....	40
3.2.1	Text in MATLAB (Strings).....	40
3.2.2	Eingabedialog.....	42
3.2.3	Formatierte Ausgabe.....	42
3.3	Import und Export von Daten.....	43
3.3.1	Standardformate.....	43
3.3.2	Formatierte Textdateien.....	44
3.3.3	Binärdateien.....	47
3.4	Betriebssystemaufruf und Dateiverwaltung.....	47
3.5	Grafische Darstellung.....	48
3.5.1	Die Figure – Grundlage einer MATLAB-Grafik.....	48
3.5.2	Achsen und Beschriftung.....	50
3.5.3	Plot-Befehle für zweidimensionale Grafiken (2D-Grafik).....	52
3.5.4	Plot-Befehle für dreidimensionale Grafiken (3D-Grafik).....	56
3.5.5	Perspektive.....	57
3.5.6	Importieren, Exportieren und Drucken von Grafiken.....	59
3.5.7	Tipps rund um die MATLAB-Figure.....	60
3.6	Grafische Benutzeroberflächen.....	63
3.6.1	Der App Designer – Layout.....	64
3.6.2	Der App Designer – Funktionalität.....	65
3.6.3	GUI-Layout und GUIDE-Editor.....	67
3.6.4	GUI-Funktionalität.....	71
3.6.5	GUI ausführen und exportieren.....	73
3.7	Übungsaufgaben.....	74
3.7.1	Harmonisches Mittel.....	74
3.7.2	Einschwingvorgang.....	74
3.7.3	Gauß-Glocke.....	74
3.7.4	Spirale und Doppelhelix.....	75
3.7.5	Funktion <code>gradevek</code> .....	76
<b>4</b>	<b>Differentialgleichungen in MATLAB</b>	<b>77</b>
4.1	Anfangswertprobleme (ODEs, DAEs und DDEs).....	77
4.1.1	Gewöhnliche Differentialgleichungen (ODEs).....	77
4.1.2	Differential-algebraische Gleichungen (DAEs).....	90
4.1.3	Differentialgleichungen mit Totzeiten (DDEs).....	93

4.1.4	Implizite Differentialgleichungen .....	96
4.2	Randwertprobleme für gewöhnliche Differentialgleichungen .....	98
4.3	Partielle Differentialgleichungen (PDEs) .....	104
4.4	Übungsaufgaben .....	107
4.4.1	Feder-Masse-Schwinger .....	107
4.4.2	Elektrischer Schwingkreis .....	107
4.4.3	Springender Ball .....	108
4.4.4	Kettenlinie .....	109
<b>5</b>	<b>Regelungstechnische Funktionen – Control System Toolbox</b>	<b>111</b>
5.1	Modellierung linearer zeitinvarianter Systeme als LTI-Modelle .....	111
5.1.1	Übertragungsfunktion – Transfer Function TF .....	112
5.1.2	Nullstellen-Polstellen-Darstellung – Zero-Pole-Gain ZPK .....	114
5.1.3	Zustandsdarstellung – State-Space SS .....	117
5.1.4	Frequenzgang-Daten-Modelle – Frequency Response Data FRD .....	118
5.1.5	Zeitdiskrete Darstellung von LTI-Modellen .....	120
5.1.6	Zeitverzögerungen in LTI-Modellen .....	122
5.2	Arbeiten mit LTI-Modellen .....	125
5.2.1	Eigenschaften von LTI-Modellen .....	125
5.2.2	Schnelle Datenabfrage .....	128
5.2.3	Rangfolge der LTI-Modelle .....	129
5.2.4	Vererbung von LTI-Modell-Eigenschaften .....	130
5.2.5	Umwandlung in einen anderen LTI-Modell-Typ .....	130
5.2.6	Arithmetische Operationen .....	131
5.2.7	Auswählen, verändern und verknüpfen von LTI-Modellen .....	133
5.2.8	Spezielle LTI-Modelle .....	136
5.2.9	Umwandlung zwischen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Systemen .....	137
5.3	Analyse von LTI-Modellen .....	141
5.3.1	Allgemeine Eigenschaften .....	141
5.3.2	Modell-Dynamik .....	143
5.3.3	Systemantwort im Zeitbereich .....	151
5.3.4	Systemantwort im Frequenzbereich .....	155
5.3.5	Interaktive Modellanalyse: Linear System Analyzer .....	164
5.3.6	Ordnungsreduzierte Darstellung .....	167
5.3.7	Zustandsbeschreibungsformen .....	170
5.4	Reglerentwurf .....	175
5.4.1	Reglerentwurf mittels Wurzelortskurve .....	175
5.4.2	Reglerentwurf mit dem Control System Designer .....	179
5.4.3	Zustandsregelung und Zustandsbeobachtung .....	181
5.4.4	Reglerentwurf mittels Polplatzierung .....	183
5.4.5	Linear-quadratisch optimale Regelung .....	187
5.5	Probleme der numerischen Darstellung .....	194

5.5.1	Fehlerbegriff .....	194
5.5.2	Kondition eines Problems .....	195
5.5.3	Numerische Instabilität .....	196
5.5.4	Bewertung der LTI-Modell-Typen nach numerischen Gesichtspunkten ..	197
5.6	Übungsaufgaben .....	197
5.6.1	Erstellen von LTI-Modellen .....	197
5.6.2	Verzögerte Übertragungsglieder .....	199
5.6.3	Verzögerte Übertragungsglieder zeitdiskretisiert .....	200
5.6.4	Typumwandlung .....	201
5.6.5	Stabilitätsanalyse .....	201
5.6.6	Regelung der stabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	203
5.6.7	Regelung der instabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	204
5.6.8	Kondition und numerische Instabilität .....	207
<b>6</b>	<b>Signalverarbeitung – Signal Processing Toolbox</b>	<b>209</b>
6.1	Aufbereitung der Daten im Zeitbereich .....	209
6.1.1	Interpolation und Approximation .....	209
6.1.2	Änderung der Abtastrate .....	212
6.1.3	Weitere Werkzeuge .....	214
6.2	Spektralanalyse .....	215
6.2.1	Diskrete Fouriertransformation (DFT) .....	215
6.2.2	Averaging .....	217
6.2.3	Fensterung .....	217
6.2.4	Leistungsspektren .....	220
6.3	Korrelation .....	222
6.4	Analoge und Digitale Filter .....	227
6.4.1	Analoge Filter .....	227
6.4.2	Digitale FIR-Filter .....	229
6.4.3	Digitale IIR-Filter .....	231
6.4.4	Filterentwurf mit Prototyp-Tiefpässen .....	234
6.5	Übungsaufgaben .....	237
6.5.1	Interpolation .....	237
6.5.2	Spektralanalyse .....	237
6.5.3	Signaltransformation im Frequenzbereich .....	238
6.5.4	Lecksuche mittels Korrelation .....	238
6.5.5	Signalanalyse und digitale Filterung .....	239
6.5.6	Analoger Bandpass .....	239
6.5.7	Digitaler IIR-Bandpass .....	239
<b>7</b>	<b>Optimierung – Optimization Toolbox</b>	<b>241</b>
7.1	Anonymous Functions .....	242
7.2	Algorithmensteuerung .....	243

---

7.3	Nullstellenbestimmung .....	246
7.3.1	Skalare Funktionen .....	246
7.3.2	Vektorwertige Funktionen / Gleichungssysteme .....	250
7.4	Minimierung nichtlinearer Funktionen .....	255
7.5	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	261
7.5.1	Nichtlineare Minimierung unter Nebenbedingungen .....	262
7.5.2	Quadratische Programmierung .....	268
7.5.3	Lineare Programmierung .....	270
7.6	Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares) .....	274
7.7	Optimierung eines Simulink-Modells .....	281
7.8	Übungsaufgaben .....	284
7.8.1	Nullstellenbestimmung .....	284
7.8.2	Lösen von Gleichungssystemen .....	284
7.8.3	Minimierung ohne Nebenbedingungen .....	284
7.8.4	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	284
7.8.5	Ausgleichspolynom .....	285
7.8.6	Curve Fitting .....	285
7.8.7	Lineare Programmierung .....	285
<b>8</b>	<b>Simulink Grundlagen</b> .....	<b>287</b>
8.1	Starten von Simulink .....	288
8.2	Erstellen und Editieren eines Signalflussplans .....	293
8.3	Simulations- und Parametersteuerung .....	296
8.3.1	Interaktive Steuerung .....	296
8.3.2	Programmatische Steuerung .....	296
8.4	Signale und Datenobjekte .....	298
8.4.1	Arbeiten mit Signalen .....	298
8.4.2	Arbeiten mit Datenobjekten .....	301
8.4.3	Der <i>Model Explorer</i> .....	302
8.5	Signalerzeugung und -ausgabe .....	304
8.5.1	Bibliothek: <i>Sources</i> – Signalerzeugung .....	304
8.5.2	<i>Sinks</i> – Signalausgabe .....	311
8.5.3	<i>Signal Logging</i> .....	317
8.5.4	Der <i>Simulation Data Inspector</i> .....	320
8.5.5	Der <i>Signal &amp; Scope Manager</i> .....	322
8.6	Mathematische Verknüpfungen und Operatoren .....	323
8.6.1	Bibliothek: <i>Math Operations</i> .....	323
8.6.2	Bibliothek: <i>Logic and Bit Operations</i> .....	326
8.7	Simulationsparameter .....	327
8.7.1	Die <i>Model Configuration Parameters</i> Dialogbox .....	328
8.7.2	Numerische Integration von Differentialgleichungen .....	342

8.7.3	<i>Diagnostic Viewer</i> und <i>Simulink Debugger</i> .....	345
8.8	Verwaltung und Organisation eines Simulink-Modells .....	346
8.8.1	Arbeiten mit Callbacks .....	347
8.8.2	Der <i>Model Browser</i> .....	350
8.8.3	Bibliotheken: <i>Signal Routing</i> und <i>Signal Attributes</i> – Signalführung und -eigenschaften .....	350
8.8.4	Drucken und Exportieren eines Simulink-Modells .....	355
8.9	Subsysteme und <i>Model Referencing</i> .....	356
8.9.1	Erstellen von Subsystemen / Bibliothek: <i>Ports &amp; Subsystems</i> .....	356
8.9.2	Maskierung von Subsystemen und Blöcken .....	362
8.9.3	Erstellen einer eigenen Blockbibliothek .....	366
8.9.4	<i>Model Referencing</i> .....	368
8.10	Übungsaufgaben .....	371
8.10.1	Nichtlineare Differentialgleichungen .....	371
8.10.2	Gravitationspendel .....	372
<b>9</b>	<b>Lineare und nichtlineare Systeme in Simulink</b>	<b>375</b>
9.1	Bibliothek: <i>Continuous</i> – Zeitkontinuierliche Systeme .....	375
9.2	Analyse von Simulationsergebnissen .....	381
9.2.1	Linearisierung mit der <i>linmod</i> -Befehlsfamilie .....	381
9.2.2	Bestimmung eines Gleichgewichtspunkts .....	387
9.2.3	Linearisierung mit dem Simulink Control Design .....	388
9.3	Bibliothek: <i>Discontinuities</i> – Nichtlineare Systeme .....	390
9.4	Bibliothek: <i>Lookup Tables</i> – Nachschlagetabellen .....	394
9.5	Bibliothek: <i>User-Defined Functions</i> – Benutzer-definierbare Funktionen ..	396
9.5.1	Bibliotheken: <i>Model Verification</i> und <i>Model-Wide Utilities</i> – Prüfblöcke und Modell-Eigenschaften .....	403
9.6	Algebraische Schleifen .....	404
9.7	S-Funktionen .....	406
9.8	Übungsaufgaben .....	413
9.8.1	Modellierung einer Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine (GNM) .....	413
9.8.2	Modellierung einer Pulsweitenmodulation (PWM) .....	415
9.8.3	Aufnahme von Bode-Diagrammen .....	416
<b>10</b>	<b>Abtastsysteme in Simulink</b>	<b>419</b>
10.1	Allgemeines .....	419
10.2	Bibliothek: <i>Discrete</i> – Zeitdiskrete Systeme .....	420
10.3	Simulationsparameter .....	423
10.3.1	Rein zeitdiskrete Systeme .....	424
10.3.2	Hybride Systeme (gemischt zeitdiskret und zeitkontinuierlich) .....	425

10.4	Der <i>Model Discretizer</i> .....	428
10.5	Übungsaufgaben .....	430
10.5.1	Zeitdiskreter Stromregler für GNM .....	430
10.5.2	Zeitdiskreter Anti-Windup-Drehzahlregler für GNM .....	431
<b>11</b>	<b>Regelkreise in Simulink</b>	<b>435</b>
11.1	Die Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine GNM .....	435
11.1.1	Initialisierung der Maschinendaten .....	436
11.1.2	Simulink-Modell .....	437
11.2	Untersuchung der Systemeigenschaften .....	439
11.2.1	Untersuchung mit Simulink .....	439
11.2.2	Untersuchung des linearisierten Modells mit MATLAB und der Control System Toolbox .....	440
11.2.3	Interaktive Untersuchung eines Modells mit dem Simulink Linear Analysis Tool .....	442
11.3	Kaskadenregelung .....	445
11.3.1	Stromregelung .....	445
11.3.2	Drehzahlregelung .....	447
11.4	Zustandsbeobachter .....	450
11.4.1	Luenberger-Beobachter .....	452
11.4.2	Störgrößen-Beobachter .....	453
11.5	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	455
11.6	Initialisierungsdateien .....	459
11.6.1	Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine .....	459
11.6.2	Stromregelung .....	459
11.6.3	Drehzahlregelung .....	460
11.6.4	Grundeinstellung Zustandsbeobachter .....	460
11.6.5	Zustandsbeobachtung mit Luenberger-Beobachter .....	461
11.6.6	Zustandsbeobachtung mit Störgrößen-Beobachter .....	461
11.6.7	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	462
11.6.8	Zustandsregelung mit Luenberger-Beobachter .....	462
11.6.9	Zustandsregelung mit Störgrößen-Beobachter .....	463
11.7	Übungsaufgaben .....	464
11.7.1	Zustandsdarstellung GNM .....	464
11.7.2	Systemanalyse .....	464
11.7.3	Entwurf eines Kalman-Filters .....	465
11.7.4	Entwurf eines LQ-optimierten Zustandsreglers .....	465
<b>12</b>	<b>Stateflow</b>	<b>467</b>
12.1	Elemente von Stateflow .....	468
12.1.1	Grafische Elemente eines Charts .....	471
12.1.2	Chart-Eigenschaften und Trigger-Methoden .....	480

12.1.3	Nichtgrafische Elemente eines Charts .....	482
12.2	Strukturierung und Hierarchiebildung .....	487
12.2.1	Superstates .....	487
12.2.2	Subcharts .....	492
12.2.3	Grafische Funktionen .....	494
12.2.4	Truth Tables .....	496
12.2.5	MATLAB Functions in Stateflow Charts .....	500
12.2.6	Simulink Functions in Stateflow .....	501
12.2.7	State Transition Tables .....	502
12.3	Action Language .....	503
12.3.1	Numerische Operatoren .....	504
12.3.2	Logische Operatoren .....	504
12.3.3	Unäre Operatoren und Zuweisungsaktionen .....	505
12.3.4	Detektion von Wertänderungen .....	505
12.3.5	Datentyp-Umwandlungen .....	506
12.3.6	Aufruf von MATLAB-Funktionen und Zugriff auf den Workspace .....	507
12.3.7	Variablen und Events in Action Language .....	508
12.3.8	Temporallogik-Operatoren .....	510
12.4	Anwendungsbeispiel: Getränkeautomat .....	512
12.5	Anwendungsbeispiel: Steuerung eines Heizgebläses .....	514
12.6	Anwendungsbeispiel: Springender Ball .....	516
12.7	Übungsaufgaben .....	518
12.7.1	Mikrowellenherd .....	518
12.7.2	Zweipunkt-Regelung .....	519
	<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>521</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>525</b>
	<b>Index</b> .....	<b>529</b>