

# 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 .....	9
2.2.2	Vektoren und Matrizen .....	10
2.2.3	Mathematische Funktionen und Operatoren für Vektoren und Matrizen.	12
2.2.4	Strukturen .....	14
2.2.5	Cell Arrays.....	15
2.2.6	Verwalten von Variablen.....	16
2.3	Ablaufsteuerung.....	17
2.3.1	Vergleichsoperatoren und logische Operatoren .....	17
2.3.2	Verzweigungsbefehle <code>if</code> und <code>switch</code> .....	19
2.3.3	Schleifenbefehle <code>for</code> und <code>while</code> .....	19
2.3.4	Abbruchbefehle <code>continue</code> , <code>break</code> und <code>return</code> .....	20
2.4	Der MATLAB-Editor .....	21
2.5	MATLAB-Funktionen .....	23
2.5.1	Funktionen mit variabler Parameterzahl .....	24
2.5.2	Lokale, globale und statische Variablen .....	25
2.5.3	Hilfetext in Funktionen .....	26
2.5.4	Function Handles .....	27
2.5.5	Funktionen als Inline Object.....	27
2.5.6	P-Code und <code>clear functions</code> .....	28
2.6	Code-Optimierung in MATLAB.....	28
2.6.1	Der MATLAB-Profiler.....	28
2.6.2	Optimierung von Rechenzeit und Speicherbedarf .....	29
2.6.3	Tipps zur Fehlersuche .....	30
2.7	Übungsaufgaben.....	31
2.7.1	Rechengenauigkeit.....	31
2.7.2	Fibonacci-Folge .....	31

2.7.3	Funktion gerade .....	32
2.7.4	Berechnungszeiten ermitteln .....	32
<b>3</b>	<b>Eingabe und Ausgabe in MATLAB</b>	<b>33</b>
3.1	Steuerung der Bildschirmausgabe .....	33
3.2	Benutzerdialoge .....	34
3.2.1	Text in MATLAB (Strings) .....	34
3.2.2	Eingabedialog .....	35
3.2.3	Formatierte Ausgabe .....	35
3.3	Import und Export von Daten .....	36
3.3.1	Standardformate .....	36
3.3.2	Formatierte Textdateien .....	37
3.3.3	Binärdateien .....	39
3.4	Betriebssystemaufruf und Dateiverwaltung .....	40
3.5	Grafische Darstellung .....	40
3.5.1	Die Figure – Grundlage einer MATLAB-Grafik .....	41
3.5.2	Achsen und Beschriftung .....	43
3.5.3	Plot-Befehle für zweidimensionale Grafiken (2D-Grafik) .....	44
3.5.4	Plot-Befehle für dreidimensionale Grafiken (3D-Grafik) .....	48
3.5.5	Perspektive.....	49
3.5.6	Importieren, Exportieren und Drucken von Grafiken .....	51
3.6	Grafische Benutzeroberfläche (GUI).....	52
3.6.1	GUI-Layout .....	52
3.6.2	GUI-Funktionalität .....	56
3.6.3	GUI ausführen und exportieren .....	57
3.6.4	Aufbau des Application-M-File .....	58
3.7	Tipps rund um die MATLAB-Figure .....	60
3.8	Übungsaufgaben.....	63
3.8.1	Harmonisches Mittel.....	63
3.8.2	Einschwingvorgang .....	63
3.8.3	Gauß-Glocke .....	63
3.8.4	Spirale und Doppelhelix .....	64
3.8.5	Funktion geradevek.....	65
<b>4</b>	<b>Differentialgleichungen in MATLAB</b>	<b>67</b>
4.1	Anfangswertprobleme (ODEs, DAEs und DDEs) .....	67
4.1.1	Gewöhnliche Differentialgleichungen (ODEs) .....	67
4.1.2	Differential-algebraische Gleichungen (DAEs) .....	80
4.1.3	Differentialgleichungen mit Totzeiten (DDEs) .....	83
4.1.4	Implizite Differentialgleichungen .....	86
4.2	Randwertprobleme für gewöhnliche Differentialgleichungen .....	88

4.3	Partielle Differentialgleichungen (PDEs) .....	94
4.4	Übungsaufgaben .....	98
4.4.1	Feder-Masse-Schwinger .....	98
4.4.2	Elektrischer Schwingkreis .....	98
4.4.3	Springender Ball .....	99
4.4.4	Kettenlinie .....	99
<b>5</b>	<b>Regelungstechnische Funktionen – Control System Toolbox</b>	<b>101</b>
5.1	Modellierung linearer zeitinvarianter Systeme als LTI-Modelle .....	101
5.1.1	Übertragungsfunktion – Transfer Function TF .....	102
5.1.2	Nullstellen-Polstellen-Darstellung – Zero-Pole-Gain ZPK .....	104
5.1.3	Zustandsdarstellung – State-Space SS .....	107
5.1.4	Frequenzgang-Daten-Modelle – Frequency Response Data FRD .....	108
5.1.5	Zeitdiskrete Darstellung von LTI-Modellen .....	110
5.1.6	Zeitverzögerungen in LTI-Modellen .....	112
5.2	Arbeiten mit LTI-Modellen .....	115
5.2.1	Eigenschaften von LTI-Modellen .....	115
5.2.2	Schnelle Datenabfrage .....	118
5.2.3	Rangfolge der LTI-Modelle .....	119
5.2.4	Vererbung von LTI-Modell-Eigenschaften .....	120
5.2.5	Umwandlung in einen anderen LTI-Modell-Typ .....	120
5.2.6	Arithmetische Operationen .....	121
5.2.7	Auswählen, verändern und verknüpfen von LTI-Modellen .....	123
5.2.8	Spezielle LTI-Modelle .....	126
5.2.9	Umwandlung zwischen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Systemen ..	127
5.3	Analyse von LTI-Modellen .....	131
5.3.1	Allgemeine Eigenschaften .....	131
5.3.2	Modell-Dynamik .....	133
5.3.3	Systemantwort im Zeitbereich .....	141
5.3.4	Systemantwort im Frequenzbereich .....	145
5.3.5	Interaktive Modellanalyse mit dem LTI-Viewer .....	154
5.3.6	Ordnungsreduzierte Darstellung .....	157
5.3.7	Zustandsbeschreibungsformen .....	160
5.4	Reglerentwurf .....	165
5.4.1	Reglerentwurf mittels Wurzelortskurve .....	165
5.4.2	Reglerentwurf mit dem Control and Estimation Tools Manager und dem SISO Design Tool .....	169
5.4.3	Zustandsregelung und Zustandsbeobachtung .....	171
5.4.4	Reglerentwurf mittels Polplatzierung .....	173
5.4.5	Linear-quadratisch optimale Regelung .....	177
5.5	Probleme der numerischen Darstellung .....	184
5.5.1	Fehlerbegriff .....	184
5.5.2	Kondition eines Problems .....	185
5.5.3	Numerische Instabilität .....	186

5.5.4	Bewertung der LTI-Modell-Typen nach numerischen Gesichtspunkten ..	187
5.6	Übungsaufgaben .....	187
5.6.1	Erstellen von LTI-Modellen .....	187
5.6.2	Verzögerte Übertragungsglieder .....	189
5.6.3	Verzögerte Übertragungsglieder zeitdiskretisiert .....	190
5.6.4	Typumwandlung .....	191
5.6.5	Stabilitätsanalyse .....	191
5.6.6	Regelung der stabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	193
5.6.7	Regelung der instabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	194
5.6.8	Kondition und numerische Instabilität .....	197
<b>6</b>	<b>Signalverarbeitung – Signal Processing Toolbox</b>	<b>199</b>
6.1	Interpolation, Approximation und Abtastung .....	199
6.1.1	Interpolation und Approximation .....	199
6.1.2	Änderung der Abtastrate .....	202
6.2	Spektralanalyse .....	203
6.2.1	Diskrete Fouriertransformation (DFT) .....	204
6.2.2	Averaging .....	206
6.2.3	Fensterung .....	206
6.2.4	Leistungsspektren .....	208
6.3	Korrelation .....	211
6.4	Analoge und Digitale Filter .....	215
6.4.1	Analoge Filter .....	215
6.4.2	Digitale FIR-Filter .....	217
6.4.3	Digitale IIR-Filter .....	219
6.4.4	Filterentwurf mit Prototyp-Tiefpässen .....	222
6.5	Übungsaufgaben .....	225
6.5.1	Signaltransformation im Frequenzbereich .....	225
6.5.2	Signalanalyse und digitale Filterung .....	225
6.5.3	Analoger Bandpass .....	226
6.5.4	Digitaler IIR-Bandpass .....	226
<b>7</b>	<b>Optimierung – Optimization Toolbox</b>	<b>227</b>
7.1	Inline Objects .....	228
7.2	Algorithmensteuerung .....	229
7.3	Nullstellenbestimmung .....	232
7.3.1	Skalare Funktionen .....	232
7.3.2	Vektorwertige Funktionen / Gleichungssysteme .....	236
7.4	Minimierung nichtlinearer Funktionen .....	241
7.5	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	247
7.5.1	Nichtlineare Minimierung unter Nebenbedingungen .....	247

7.5.2	Quadratische Programmierung .....	253
7.5.3	Lineare Programmierung .....	255
7.6	Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares) .....	259
7.7	Optimierung eines Simulink-Modells .....	266
7.8	Übungsaufgaben .....	269
7.8.1	Nullstellenbestimmung .....	269
7.8.2	Lösen von Gleichungssystemen .....	269
7.8.3	Minimierung ohne Nebenbedingungen .....	269
7.8.4	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	270
7.8.5	Ausgleichspolynom .....	270
7.8.6	Curve Fitting .....	270
7.8.7	Lineare Programmierung .....	270
<b>8</b>	<b>Simulink Grundlagen</b> .....	<b>273</b>
8.1	Starten von Simulink .....	273
8.2	Erstellen und Editieren eines Signalfussplans .....	276
8.3	Simulations- und Parametersteuerung .....	278
8.4	Signale und Datenobjekte .....	280
8.4.1	Arbeiten mit Signalen .....	280
8.4.2	Arbeiten mit Datenobjekten .....	281
8.4.3	Der <i>Model Explorer</i> .....	283
8.5	Signalerzeugung und -ausgabe .....	284
8.5.1	Bibliothek: <i>Sources</i> – Signalerzeugung .....	284
8.5.2	Bibliothek: <i>Sinks</i> und <i>Signal Logging</i> .....	289
8.5.3	Der <i>Signal &amp; Scope Manager</i> .....	297
8.6	Mathematische Verknüpfungen und Operatoren .....	298
8.6.1	Bibliothek: <i>Math Operations</i> .....	298
8.6.2	Bibliothek: <i>Logic and Bit Operations</i> .....	301
8.7	Simulationsparameter .....	302
8.7.1	Die <i>Configuration Parameters</i> Dialogbox .....	302
8.7.2	Fehlerbehandlung und Simulink Debugger .....	314
8.8	Verwaltung und Organisation eines Simulink-Modells .....	316
8.8.1	Arbeiten mit Callback-Routinen .....	316
8.8.2	Der <i>Model Browser</i> .....	319
8.8.3	Bibliotheken: <i>Signal Routing</i> und <i>Signal Attributes</i> – Signalführung und -eigenschaften .....	320
8.8.4	Drucken und Exportieren eines Simulink-Modells .....	324
8.9	Subsysteme und <i>Model Referencing</i> .....	325
8.9.1	Erstellen von Subsystemen / Bibliothek: <i>Ports &amp; Subsystems</i> .....	325
8.9.2	Maskierung von Subsystemen .....	330
8.9.3	Erstellen einer eigenen Blockbibliothek .....	333

8.9.4	<i>Model Referencing</i> .....	334
8.10	Übungsaufgaben .....	337
8.10.1	Nichtlineare Differentialgleichungen .....	337
8.10.2	Gravitationspendel .....	338
<b>9</b>	<b>Lineare und nichtlineare Systeme in Simulink</b>	<b>341</b>
9.1	Bibliothek: <i>Continuous</i> – Zeitkontinuierliche Systeme .....	341
9.2	Analyse eines Simulink-Modells .....	346
9.2.1	Linearisierung mit der <code>linmod</code> -Befehlsfamilie .....	346
9.2.2	Bestimmung eines Gleichgewichtspunkts .....	351
9.2.3	Linearisierung mit dem <i>Simulink Control Design</i> .....	352
9.3	Bibliothek: <i>Discontinuities</i> – Nichtlineare Systeme .....	355
9.4	Bibliothek: <i>Lookup Tables</i> – Nachschlagetabellen .....	358
9.5	Bibliothek: <i>User-Defined Functions</i> – Benutzer-definierbare Funktionen ..	360
9.5.1	Bibliotheken: <i>Model Verification</i> und <i>Model-Wide Utilities</i> – Prüfblöcke und Modell-Eigenschaften .....	363
9.6	Algebraische Schleifen .....	365
9.7	S-Funktionen .....	366
9.8	Übungsaufgaben .....	373
9.8.1	Modellierung einer Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine (GNM) .....	373
9.8.2	Modellierung einer Pulsweitenmodulation (PWM) .....	374
9.8.3	Aufnahme von Bode-Diagrammen .....	375
<b>10</b>	<b>Abtastsysteme in Simulink</b>	<b>377</b>
10.1	Allgemeines .....	377
10.2	Bibliothek: <i>Discrete</i> – Zeitdiskrete Systeme .....	378
10.3	Simulationsparameter .....	380
10.3.1	Rein zeitdiskrete Systeme .....	381
10.3.2	Hybride Systeme (gemischt zeitdiskret und zeitkontinuierlich) .....	382
10.4	Der <i>Model Discretizer</i> .....	384
10.5	Übungsaufgaben .....	387
10.5.1	Zeitdiskreter Stromregler für GNM .....	387
10.5.2	Zeitdiskreter Anti-Windup-Drehzahlregler für GNM .....	387
<b>11</b>	<b>Regelkreise in Simulink</b>	<b>391</b>
11.1	Die Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine GNM .....	391
11.1.1	Initialisierung der Maschinendaten .....	392
11.1.2	Simulink-Modell .....	393
11.2	Untersuchung der Systemeigenschaften .....	395

11.2.1	Untersuchung mit Simulink .....	395
11.2.2	Untersuchung des linearisierten Modells mit MATLAB und der Control System Toolbox .....	396
11.2.3	Interaktive Untersuchung eines Modells mit dem Simulink Control Design-Blockset .....	398
11.3	Kaskadenregelung .....	401
11.3.1	Stromregelung .....	401
11.3.2	Drehzahlregelung .....	403
11.4	Zustandsbeobachter .....	406
11.4.1	Luenberger-Beobachter .....	407
11.4.2	Störgrößen-Beobachter .....	409
11.5	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	411
11.6	Initialisierungsdateien .....	415
11.6.1	Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine .....	415
11.6.2	Stromregelung .....	415
11.6.3	Drehzahlregelung .....	416
11.6.4	Grundeinstellung Zustandsbeobachter .....	416
11.6.5	Zustandsbeobachtung mit Luenberger-Beobachter .....	417
11.6.6	Zustandsbeobachtung mit Störgrößen-Beobachter .....	417
11.6.7	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	418
11.6.8	Zustandsregelung mit Luenberger-Beobachter .....	418
11.6.9	Zustandsregelung mit Störgrößen-Beobachter .....	419
11.7	Übungsaufgaben .....	420
11.7.1	Zustandsdarstellung GNM .....	420
11.7.2	Systemanalyse .....	420
11.7.3	Entwurf eines Kalman-Filters .....	421
11.7.4	Entwurf eines LQ-optimierten Zustandsreglers .....	421
<b>12</b>	<b>Stateflow</b> .....	<b>423</b>
12.1	Elemente von Stateflow .....	424
12.1.1	Grafische Elemente eines Charts .....	426
12.1.2	Chart-Eigenschaften und Trigger-Methoden .....	435
12.1.3	Nichtgrafische Elemente eines Charts .....	437
12.2	Strukturierung und Hierarchiebildung .....	442
12.2.1	Superstates .....	442
12.2.2	Subcharts .....	447
12.2.3	Grafische Funktionen .....	448
12.2.4	Truth Tables .....	450
12.2.5	Embedded MATLAB Functions .....	454
12.3	Action Language .....	455
12.3.1	Numerische Operatoren .....	456
12.3.2	Logische Operatoren .....	456
12.3.3	Unäre Operatoren und Zuweisungsaktionen .....	457

---

12.3.4	Detektion von Wertänderungen .....	458
12.3.5	Datentyp-Umwandlungen .....	458
12.3.6	Aufruf von MATLAB-Funktionen und Zugriff auf den Workspace .....	459
12.3.7	Variablen und Events in Action Language .....	461
12.3.8	Temporallogik-Operatoren .....	463
12.4	Anwendungsbeispiel: Getränkeautomat .....	463
12.5	Anwendungsbeispiel: Steuerung eines Heizgebläses .....	466
12.6	Übungsaufgaben .....	468
12.6.1	Mikrowellenherd .....	468
12.6.2	Zweipunkt-Regelung .....	469
<b>Symbolverzeichnis</b>		<b>471</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>475</b>
<b>Index</b>		<b>479</b>