

---

# Matlab – Simulink – Stateflow

---

Grundlagen, Toolboxen, Beispiele

---

von

Anne Angermann, Michael Beuschel, Martin Rau,  
Ulrich Wohlfarth

---

4., überarbeitete Auflage

---

Oldenbourg Verlag München Wien

---

# 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	23
2.5.2	Lokale, globale und statische Variablen	24
2.5.3	Hilfetext in Funktionen	26
2.5.4	Function Handles	26
2.5.5	Funktionen als Inline Object	27
2.5.6	P-Code und <code>clear functions</code>	27
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 <code>gerade</code> .....	31
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 <code>geradevek</code> .....	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 .....	96
4.4.1	Feder-Masse-Schwinger .....	96
4.4.2	Elektrischer Schwingkreis .....	97
4.4.3	Springender Ball .....	98
4.4.4	Kettenlinie .....	98
<b>5</b>	<b>Regelungstechnische Funktionen – Control System Toolbox</b>	<b>99</b>
5.1	Modellierung linearer zeitinvarianter Systeme – LTI-Modelle .....	99
5.1.1	Übertragungsfunktion – Transfer Function TF .....	100
5.1.2	Nullstellen-Polstellen-Darstellung – Zero-Pole-Gain ZPK .....	102
5.1.3	Zustandsdarstellung – State-Space SS .....	105
5.1.4	Frequenzgang-Daten-Modelle – Frequency Response Data FRD .....	106
5.1.5	Zeitdiskrete Darstellung von LTI-Modellen .....	108
5.1.6	Zeitverzögerungen in LTI-Modellen .....	110
5.2	Arbeiten mit LTI-Modellen .....	112
5.2.1	Eigenschaften von LTI-Modellen .....	112
5.2.2	Schnelle Datenabfrage .....	115
5.2.3	Rangfolge der LTI-Modelle .....	116
5.2.4	Vererbung von LTI-Modell-Eigenschaften .....	117
5.2.5	Umwandlung in einen anderen LTI-Modell-Typ .....	117
5.2.6	Arithmetische Operationen .....	118
5.2.7	Auswählen, verändern und verknüpfen von LTI-Modellen .....	120
5.2.8	Spezielle LTI-Modelle .....	123
5.2.9	Umwandlung zwischen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Systemen ..	124
5.3	Analyse von LTI-Modellen .....	128
5.3.1	Allgemeine Eigenschaften .....	128
5.3.2	Modell-Dynamik .....	130
5.3.3	Systemantwort im Zeitbereich .....	138
5.3.4	Systemantwort im Frequenzbereich .....	142
5.3.5	Interaktive Modellanalyse mit dem LTI-Viewer .....	151
5.3.6	Ordnungsreduzierte Darstellung .....	154
5.3.7	Zustandsbeschreibungsformen .....	157
5.4	Reglerentwurf .....	162
5.4.1	Reglerentwurf mittels Wurzelortskurve .....	162
5.4.2	Interaktiver Reglerentwurf: Das SISO Design Tool .....	166
5.4.3	Zustandsregelung und Zustandsbeobachtung .....	167
5.4.4	Reglerentwurf mittels Polplatzierung .....	169
5.4.5	Linear-quadratisch optimale Regelung .....	173
5.5	Probleme der numerischen Darstellung .....	180
5.5.1	Fehlerbegriff .....	180
5.5.2	Kondition eines Problems .....	181
5.5.3	Numerische Instabilität .....	182
5.5.4	Bewertung der LTI-Modell-Typen nach numerischen Gesichtspunkten ..	183

5.6	Übungsaufgaben .....	183
5.6.1	Erstellen von LTI-Modellen .....	183
5.6.2	Verzögerte Übertragungsglieder .....	185
5.6.3	Verzögerte Übertragungsglieder zeitdiskretisiert .....	186
5.6.4	Typumwandlung .....	187
5.6.5	Stabilitätsanalyse .....	187
5.6.6	Regelung der stabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	189
5.6.7	Regelung der instabilen $PT_2$ -Übertragungsfunktion .....	190
5.6.8	Kondition und numerische Instabilität .....	193
<b>6</b>	<b>Signalverarbeitung – Signal Processing Toolbox</b>	<b>195</b>
6.1	Interpolation, Approximation und Abtastung .....	195
6.1.1	Interpolation und Approximation .....	195
6.1.2	Änderung der Abtastrate .....	198
6.2	Spektralanalyse .....	199
6.2.1	Diskrete Fouriertransformation (DFT) .....	200
6.2.2	Averaging .....	202
6.2.3	Fensterung .....	202
6.2.4	Leistungsspektren .....	204
6.3	Korrelation .....	207
6.4	Analoge und Digitale Filter .....	211
6.4.1	Analoge Filter .....	211
6.4.2	Digitale FIR-Filter .....	213
6.4.3	Digitale IIR-Filter .....	215
6.4.4	Filterentwurf mit Prototyp-Tiefpässen .....	218
6.5	Übungsaufgaben .....	221
6.5.1	Signaltransformation im Frequenzbereich .....	221
6.5.2	Signalanalyse und digitale Filterung .....	221
6.5.3	Analoger Bandpass .....	222
6.5.4	Digitaler IIR-Bandpass .....	222
<b>7</b>	<b>Optimierung – Optimization Toolbox</b>	<b>223</b>
7.1	Inline Objects .....	224
7.2	Algorithmensteuerung .....	225
7.3	Nullstellenbestimmung .....	228
7.3.1	Skalare Funktionen .....	228
7.3.2	Vektorwertige Funktionen / Gleichungssysteme .....	232
7.4	Minimierung nichtlinearer Funktionen .....	237
7.5	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	242
7.5.1	Nichtlineare Minimierung unter Nebenbedingungen .....	242
7.5.2	Quadratische Programmierung .....	247
7.5.3	Lineare Programmierung .....	250

7.6	Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares) .....	253
7.7	Optimierung eines Simulink-Modells .....	261
7.8	Übungsaufgaben .....	264
7.8.1	Nullstellenbestimmung .....	264
7.8.2	Lösen von Gleichungssystemen .....	264
7.8.3	Minimierung ohne Nebenbedingungen .....	264
7.8.4	Minimierung unter Nebenbedingungen .....	264
7.8.5	Ausgleichspolynom .....	265
7.8.6	Curve Fitting .....	265
7.8.7	Lineare Programmierung .....	265
<b>8</b>	<b>Simulink Grundlagen</b> .....	<b>267</b>
8.1	Starten von Simulink .....	267
8.2	Erstellen und Editieren eines Signalflussplans .....	270
8.3	Simulations- und Parametersteuerung .....	272
8.4	Signale und Datenobjekte .....	274
8.4.1	Arbeiten mit Signalen .....	274
8.4.2	Arbeiten mit Datenobjekten .....	276
8.4.3	Der <i>Model Explorer</i> .....	277
8.5	Signalerzeugung und -Ausgabe .....	278
8.5.1	Bibliothek: <i>Sources</i> – Signalerzeugung .....	278
8.5.2	Bibliothek: <i>Sinks</i> und <i>Signal Logging</i> .....	283
8.5.3	Der <i>Signal &amp; Scope Manager</i> .....	289
8.6	Mathematische Verknüpfungen und Operatoren .....	290
8.6.1	Bibliothek: <i>Math Operations</i> .....	290
8.6.2	Bibliothek: <i>Logic and Bit Operations</i> .....	293
8.7	Simulationsparameter .....	294
8.7.1	Die <i>Configuration Parameters</i> Dialogbox .....	294
8.7.2	Fehlerbehandlung und Fehlersuche .....	305
8.8	Verwaltung und Organisation eines Simulink-Modells .....	306
8.8.1	Arbeiten mit Callback-Routinen .....	307
8.8.2	Der <i>Model Browser</i> .....	309
8.8.3	Bibliotheken: <i>Signal Routing</i> und <i>Signal Attributes</i> – Signalführung und -eigenschaften .....	310
8.8.4	Drucken und Exportieren eines Simulink-Modells .....	314
8.9	Hierarchiebildung .....	314
8.9.1	Erstellen von Subsystemen / Bibliothek: <i>Ports &amp; Subsystems</i> .....	315
8.9.2	Maskierung von Subsystemen .....	319
8.9.3	<i>Model Referencing</i> .....	322
8.10	Übungsaufgaben .....	324
8.10.1	Nichtlineare Differentialgleichungen .....	324

8.10.2	Gravitationspendel .....	325
<b>9</b>	<b>Lineare und nichtlineare Systeme in Simulink</b>	<b>329</b>
9.1	Bibliothek: <i>Continuous</i> – Zeitkontinuierliche Systeme .....	329
9.2	Analyse eines Simulink-Modells .....	333
9.2.1	Linearisierung .....	333
9.2.2	Bestimmung eines Gleichgewichtspunkts .....	337
9.3	Bibliothek: <i>Discontinuities</i> – Nichtlineare Systeme .....	339
9.4	Bibliothek: <i>Lookup Tables</i> – Nachschlagetabellen .....	342
9.5	Bibliothek: <i>User-Defined Functions</i> – Benutzer-definierbare Funktionen ..	344
9.5.1	Bibliotheken: <i>Model Verification</i> und <i>Model-Wide Utilities</i> – Prüfblöcke und Modell-Eigenschaften .....	347
9.6	Algebraische Schleifen .....	348
9.7	S-Funktionen .....	350
9.8	Übungsaufgaben .....	356
9.8.1	Modellierung einer Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine (GNM) .....	356
9.8.2	Modellierung einer Pulsweitenmodulation (PWM) .....	357
9.8.3	Aufnahme von Bode-Diagrammen .....	358
<b>10</b>	<b>Abtastsysteme in Simulink</b>	<b>359</b>
10.1	Allgemeines .....	359
10.2	Simulationsparameter .....	360
10.2.1	Rein zeitdiskrete Systeme .....	360
10.2.2	Hybride Systeme (gemischt zeitdiskret und zeitkontinuierlich) .....	361
10.3	Bibliothek: <i>Discrete</i> – Zeitdiskrete Systeme .....	361
10.4	Gemischte Abtastzeiten und hybride Systeme .....	364
10.4.1	Gemischte Abtastzeiten .....	364
10.4.2	Hybride Systeme .....	365
10.5	Übungsaufgaben .....	366
10.5.1	Zeitdiskreter Stromregler für GNM .....	366
10.5.2	Zeitdiskreter Anti-Windup-Drehzahlregler für GNM .....	367
<b>11</b>	<b>Regelkreise in Simulink</b>	<b>369</b>
11.1	Die Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine GNM .....	369
11.1.1	Initialisierung der Maschinendaten .....	370
11.1.2	Simulink-Modell .....	371
11.2	Untersuchung der Systemeigenschaften .....	373
11.2.1	Untersuchung mit Simulink .....	373

11.2.2	Untersuchung des linearisierten Modells mit MATLAB und der Control System Toolbox .....	374
11.2.3	Interaktive Untersuchung eines Modells mit dem Simulink Control Design-Blockset .....	376
11.3	Kaskadenregelung .....	379
11.3.1	Stromregelung .....	379
11.3.2	Drehzahlregelung .....	381
11.4	Zustandsbeobachter .....	384
11.4.1	Luenberger-Beobachter .....	385
11.4.2	Störgrößen-Beobachter .....	387
11.5	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	389
11.6	Initialisierungsdateien .....	393
11.6.1	Gleichstrom-Nebenschluss-Maschine .....	393
11.6.2	Stromregelung .....	393
11.6.3	Drehzahlregelung .....	394
11.6.4	Grundeinstellung Zustandsbeobachter .....	394
11.6.5	Zustandsbeobachtung mit Luenberger-Beobachter .....	395
11.6.6	Zustandsbeobachtung mit Störgrößen-Beobachter .....	395
11.6.7	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter .....	396
11.6.8	Zustandsregelung mit Luenberger-Beobachter .....	396
11.6.9	Zustandsregelung mit Störgrößen-Beobachter .....	397
11.7	Übungsaufgaben .....	398
11.7.1	Zustandsdarstellung GNM .....	398
11.7.2	Systemanalyse .....	398
11.7.3	Entwurf eines Kalman-Filters .....	399
11.7.4	Entwurf eines LQ-optimierten Zustandsreglers .....	399
<b>12</b>	<b>Stateflow</b> .....	<b>401</b>
12.1	Elemente von Stateflow .....	402
12.1.1	Grafische Elemente eines Charts .....	404
12.1.2	Chart-Eigenschaften und Trigger-Methoden .....	413
12.1.3	Nichtgrafische Elemente eines Charts .....	415
12.2	Strukturierung und Hierarchiebildung .....	420
12.2.1	Superstates .....	420
12.2.2	Boxes .....	425
12.2.3	Subcharts .....	426
12.2.4	Grafische Funktionen .....	428
12.2.5	Truth Tables .....	430
12.2.6	Embedded MATLAB Functions .....	433
12.3	Action Language .....	435
12.3.1	Numerische Operatoren .....	436
12.3.2	Logische Operatoren .....	436
12.3.3	Unäre Operatoren und Zuweisungsaktionen .....	436

---

12.3.4	Datentyp Umwandlungen .....	437
12.3.5	Aufruf von MATLAB-Funktionen und Zugriff auf den Workspace .....	438
12.3.6	Variablen und Events in Action Language .....	440
12.3.7	Temporallogik Operatoren .....	441
12.4	Anwendungsbeispiel: Getränkeautomat .....	442
12.5	Anwendungsbeispiel: Steuerung eines Heizgebläses .....	445
12.6	Übungsaufgaben .....	447
12.6.1	Mikrowellenherd .....	447
12.6.2	Zweipunkt-Regelung .....	448
<b>Symbolverzeichnis</b>		<b>449</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>453</b>
<b>Index</b>		<b>457</b>