

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Überblick</b>	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Entwicklungsprozesse für Automatisierungslösungen	4
1.2.1	Klassische Entwicklungsprozesse	4
1.2.2	Entwicklungsprozess mit Rapid Control Prototyping	7
1.3	Der Systembegriff	10
1.4	Modelle	14
1.5	Beispiele	17
1.5.1	Doppelpendel	17
1.5.2	Dreitank	18
1.6	Rechnerwerkzeuge	18
1.6.1	MATLAB/SIMULINK	20
<b>2</b>	<b>Beschreibung dynamischer Systeme</b>	23
2.1	Allgemeines	23
2.2	Lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	25
2.3	Laplace-Transformation	27
2.4	Anwendung der Laplace-Transformation	31
2.5	Frequenzgang	40
2.6	Darstellung von Frequenzgängen	44
2.7	Lineare Regelkreisglieder	46
2.7.1	P, I, D	52
2.7.2	PI, PD, PID	52
2.7.3	PT <sub>1</sub> , PT <sub>2</sub> , PT <sub>n</sub>	56
2.7.4	DT <sub>1</sub>	59
2.7.5	PT <sub>t</sub>	60
2.8	Lineare Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten	61
2.9	Z-Transformation	63
2.10	Zustandsraum	65
2.11	Darstellung dynamischer Systeme mit MATLAB	72

<b>3</b>	<b>Physikalische Modellbildung</b>	77
3.1	Kontinuierliche Modellbildung	79
3.1.1	Aufstellen von Differentialgleichungen	80
3.1.2	Wirkungsplan	85
3.1.3	Modularisierte Umsetzung in SIMULINK	89
3.2	Ereignisdiskrete Modellbildung	94
3.2.1	Eigenschaften von Beschreibungsmitteln	94
3.2.2	Graphen	96
3.2.3	Statecharts (Harel-Graphen)	100
3.2.4	Petrinetze	109
3.2.5	Weitere Beschreibungsmittel	114
3.3	Hybride Modellbildung	119
3.3.1	Getrennte Modellierung am Beispiel STATEFLOW	122
3.3.2	Erweiterungen von Beschreibungsmitteln	127
3.4	Modellabstraktionen	131
3.4.1	Diskrete Abstraktionen	132
3.4.2	Kontinuierliche Abstraktionen	133
<b>4</b>	<b>Identifikation</b>	137
4.1	Grundlagen, Ziele und Modelle	137
4.2	Nichtparametrische Identifikation	140
4.2.1	Allgemeines	140
4.2.2	Frequenzgangmessung mit determinierten Signalen	140
4.2.3	Fourier-Transformation und FFT	142
4.2.4	Frequenzgangmessung mit stochastischen Signalen	149
4.3	Parametrische Identifikation	154
4.3.1	Allgemeines	154
4.3.2	Nichtrekursive Parameterschätzung	157
4.3.3	Rekursive Parameterschätzung	161
4.3.4	Parameterschätzung am Einfachpendel	163
4.3.5	Interpretation geschätzter Parameter	168
4.3.6	Identifikation bei adaptiver Regelung	175
4.4	Anwendung parametrischer Identifikationsverfahren auf nichtparametrische und nichtlineare Prozessmodelle	179
4.4.1	Gewichtsfolgeschätzung	179
4.4.2	Identifikation nichtlinearer Prozesse	181
4.5	Abtasttheorem nach Shannon	184
4.6	Praktischer Einsatz mit einem Software-Werkzeug	195
<b>5</b>	<b>Grundzüge des Regelungs- und Steuerungsentwurfs</b>	197
5.1	Regelungstechnik vs. Steuerungstechnik	197
5.2	Grundlagen Regelkreis	199
5.2.1	Bezeichnungen	199
5.2.2	Eigenschaften	202
5.3	Entwurfverfahren für Regelungen	205

5.3.1	Entwurf der Regelkreisstruktur . . . . .	206
5.3.2	Entwurf der Reglerstruktur . . . . .	208
5.3.3	Entwurf der Reglerparameter einschleifiger Regelkreise . . . . .	208
5.3.4	Weitere Entwurfsverfahren . . . . .	222
5.4	Grundlagen Steuerkreis . . . . .	235
5.4.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	236
5.4.2	Steuerungsziel . . . . .	238
5.4.3	Steuerungsarten . . . . .	238
5.5	Entwurfsverfahren diskreter Steuerungen . . . . .	241
5.5.1	Heuristischer Entwurf . . . . .	241
5.5.2	Modellgestützte Entwurfsverfahren . . . . .	243
<b>6</b>	<b>Simulation</b> . . . . .	<b>255</b>
6.1	Modelle und Ziele der Simulation . . . . .	255
6.2	Simulation kontinuierlicher Prozesse . . . . .	257
6.2.1	Verfahren zur Simulation kontinuierlicher Prozesse . . . . .	257
6.2.2	Werkzeuge zur Simulation kontinuierlicher Prozesse . . . . .	269
6.3	Diskrete Simulation . . . . .	280
6.4	Hybride Simulation . . . . .	285
6.4.1	Problemstellung . . . . .	285
6.4.2	MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW . . . . .	288
<b>7</b>	<b>Rapid Control Prototyping</b> . . . . .	<b>295</b>
7.1	Anforderungen an ein RCP-System . . . . .	295
7.2	Echtzeitprogrammierung . . . . .	297
7.3	Entwicklungsphasen . . . . .	302
7.3.1	Systemsimulation . . . . .	302
7.3.2	Software-in-the-Loop . . . . .	303
7.3.3	Hardware-in-the-Loop . . . . .	304
7.3.4	Zusammenfassung Entwicklungsphasen . . . . .	305
7.4	Codegenerierung . . . . .	305
7.5	Hardware-/Software-Konfigurationen . . . . .	310
7.5.1	The MathWorks . . . . .	311
7.5.2	dSPACE . . . . .	311
7.5.3	National Instruments . . . . .	313
7.5.4	Visual Solutions . . . . .	314
7.5.5	MODELICA/DYMOLA . . . . .	315
7.5.6	Diverse Zielhardware . . . . .	316
7.5.7	Zusammenfassung Hardware-/Softwarekonfigurationen . . . . .	317
<b>8</b>	<b>Anhang</b> . . . . .	<b>319</b>
8.1	Mathematische Grundlagen . . . . .	319
8.1.1	Matrizenrechnung . . . . .	319
8.1.2	Operationen . . . . .	322
8.2	Beispielaufgaben mit Lösungen . . . . .	325

8.2.1	Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanksystem . .	325
8.2.2	Ereignisdiskrete und hybride Modellbildung am Dreitanksystem . . . . .	330
8.2.3	Nichtparametrische Identifikation . . . . .	340
8.2.4	Nichtrekursive Parametrische Identifikation . . . . .	343
8.2.5	Regelungsentwurf für das Dreitanksystem . . . . .	349
8.2.6	Erweiterung des Dreitanksystems um eine Ablaufsteuerung. . . . .	355
8.2.7	Numerische Integrationsverfahren zur Simulation . . . . .	362
8.2.8	Simulation objektorientierter Modelle mit DYMOLA . . . .	368
8.2.9	Rapid Control Prototyping am Beispiel Dreitanksystem	375
<b>Literatur</b>	. . . . .	<b>391</b>
<b>Index</b>	. . . . .	<b>395</b>