

---

# Inhaltsverzeichnis

Blau nummerierte Abschnitte enthalten Grundlagen, die einen Basiskurs über nichtlineare Systeme und Regelungen bilden. Schwarz nummerierte enthalten weitergehende Informationen, die über den Basiskurs hinausgehen.

<b>1</b>	<b>Grundlagen nichtlinearer Systeme</b>	<b>1</b>
1.1	Systembeschreibung und Systemverhalten	1
1.1.1	Lineare und nichtlineare Systeme	1
1.1.2	Systembeschreibung und Regelkreiskategorien	2
1.1.3	Ruhelagen nichtlinearer Systeme	4
1.1.4	Beispiel Satellit	6
1.1.5	Ruhelagen linearer Systeme	9
1.1.6	Stabilität von Ruhelagen	10
1.1.7	Stabilität bei variablem Eingangssignal	15
1.1.8	Grenzzyklen	18
1.1.9	Gleitzustände	20
1.1.10	Chaos	22
1.1.11	Zeitdiskrete Systeme	25
1.2	Lösung nichtlinearer Differenzialgleichungen	27
1.2.1	Grundlegendes und das Verfahren von Euler-Cauchy	27
1.2.2	Genauigkeit der numerischen Lösung	29
1.2.3	Das verbesserte Euler-Cauchy-Verfahren	30
1.2.4	Die Verfahren von Heun und Simpson	31
1.2.5	Die Runge-Kutta-Verfahren	33
1.2.6	Adaption der Schrittweite	35
1.2.7	Mehrschrittverfahren von Adams-Bashforth	36
1.2.8	Prädiktor-Korrektor-Verfahren von Adams-Moulton	37
1.2.9	Stabilität von Integrationsverfahren	38
1.2.10	Steife Systeme und ihre Lösung	41
<b>2</b>	<b>Grenzzyklen und Stabilitätskriterien</b>	<b>45</b>
2.1	Verfahren der harmonischen Balance	45
2.1.1	Idee des Verfahrens	45

2.1.2	Illustrationsbeispiel	49
2.1.3	Kennlinien und ihre Beschreibungsfunktionen	51
2.1.4	Stabilitätsanalyse von Grenzyklen	57
2.1.5	Beispiel Servolenksystem	60
2.2	Absolute Stabilität	64
2.2.1	Der Begriff der absoluten Stabilität	64
2.2.2	Das Popov-Kriterium und seine Anwendung	65
2.2.3	Aisermans Vermutung	71
2.2.4	Beispiel Schiffsregelung	72
2.2.5	Das Kreiskriterium	76
2.2.6	Das Zypkin-Kriterium für zeitdiskrete Systeme	80
2.3	Die Stabilitätstheorie von Ljapunov	83
2.3.1	Die Idee und die direkte Methode	83
2.3.2	Illustrationsbeispiel	88
2.3.3	Quadratische Ljapunov-Funktionen	90
2.3.4	Die direkte Methode für zeitdiskrete Systeme	92
2.3.5	Die indirekte Methode	92
2.3.6	Einzugsgebiete	94
2.3.7	Beispiel Mutualismus	97
2.3.8	Das Invarianzprinzip von LaSalle	101
2.3.9	Instabilitätskriterium	104
2.4	Passivität und Stabilität	106
2.4.1	Passive Systeme	106
2.4.2	Stabilität passiver Systeme	108
2.4.3	Passivität verbundener Systeme	111
2.4.4	Passivität linearer Systeme	113
2.4.5	Beispiel Transportsystem für Materialbahnen	118
2.4.6	Positiv reelle Übertragungsfunktionen	120
2.4.7	Äquivalenz von positiver Reellheit und Passivität	125
2.4.8	Verlustfreie Hamilton-Systeme	130
2.4.9	Beispiel Selbstbalancierendes Fahrzeug	137
2.4.10	Dissipative Hamilton-Systeme	141
2.4.11	Beispiel Fremderregte Gleichstrommaschine	143
2.4.12	Lineare Hamilton-Systeme	146
<b>3</b>	<b>Steuerbarkeit und Flachheit</b>	<b>155</b>
3.1	Steuerbarkeit	155
3.1.1	Definition der Steuerbarkeit	155
3.1.2	Globale und lokale Steuerbarkeit	162
3.1.3	Nachweis der Steuerbarkeit	164
3.1.4	Beispiel Industrieroboter	168
3.1.5	Proxime Steuerbarkeit driftfreier Systeme	172
3.1.6	Beispiel Kraftfahrzeug mit Anhänger	179
3.1.7	Omnidirektionale Steuerbarkeit	181
3.1.8	Beispiel Dampferzeuger	184

3.2	Flachheit	187
3.2.1	Grundidee und Definition der Flachheit	187
3.2.2	Die Lie-Bäcklund-Transformation	192
3.2.3	Beispiel VTOL-Flugzeug	194
3.2.4	Flachheit und Steuerbarkeit	198
3.2.5	Flache Ausgänge linearer Systeme	199
3.2.6	Nachweis der Flachheit	203
3.3	Nichtlineare Zustandstransformationen	207
3.3.1	Transformation und transformierte Systemgleichung	207
3.3.2	Illustrationsbeispiel	210
3.3.3	Beispiel Park-Transformation	212
3.3.4	Bestimmung der Transformationsvorschrift	219
3.3.5	Veranschaulichung anhand linearer Systeme	220
4	Regelungen für lineare Regelstrecken	223
4.1	Regler mit Antiwindup	223
4.1.1	Der Windup-Effekt	223
4.1.2	PID-Regler mit Antiwindup	225
4.1.3	Beispiel Gleichstrommotor	226
4.1.4	Antiwindup für allgemeine Reglerstrukturen	229
4.1.5	Dimensionierung des allgemeinen Antiwindup-Reglers	234
4.1.6	Stabilität	236
4.2	Zeitoptimale Regelung und Steuerung	236
4.2.1	Grundlagen und der Satz von Feldbaum	236
4.2.2	Berechnung zeitoptimaler Steuerfolgen	239
4.2.3	Beispiel $1/s^2$	240
4.2.4	Zeitoptimale Regler für Systeme niedriger Ordnung	244
4.2.5	Beispiel U-Boot	247
4.2.6	Zeitoptimale Vorsteuerung	250
4.3	Strukturvariable Regelungen ohne Gleitzustand	251
4.3.1	Grundlagen strukturvariabler Regelungen	251
4.3.2	Regler mit abschnittsweise linearer Struktur	255
4.3.3	Beispiel Containerkran	259
4.4	Sättigungsregler	264
4.4.1	Funktionsweise und Stabilität	264
4.4.2	Entwurf in mehreren Schritten	268
4.4.3	Beispiel Helikopter	270
5	Regelungen für nichtlineare Regelstrecken	273
5.1	Gain-scheduling-Regler	273
5.1.1	Funktionsweise und Entwurf	273
5.1.2	Illustrationsbeispiel	279
5.1.3	Beispiel Solarkraftwerk mit Parabolrinnenkollektor	281
5.2	Reglerentwurf mittels exakter Linearisierung	287
5.2.1	Grundidee und nichtlineare Regelungsnormalform	287

5.2.2	Nichtlinearer Regler und linearer Regelkreis . . . . .	291
5.2.3	Beispiel Magnetlager . . . . .	294
5.2.4	Regelstrecken mit interner Dynamik . . . . .	298
5.2.5	Entwurfsverfahren . . . . .	303
5.2.6	Beispiel Mondlandefähre . . . . .	305
5.2.7	Exakte Linearisierung allgemeiner Systeme . . . . .	310
5.2.8	Relativer Grad und interne Dynamik linearer Systeme . . . . .	314
5.2.9	Regelgesetz im linearen Fall . . . . .	320
5.2.10	Stabilität von interner Dynamik und Nulldynamik . . . . .	323
5.2.11	Exakte Linearisierung von MIMO-Systemen . . . . .	325
5.2.12	Der MIMO-Regelkreis in Zustandsraumdarstellung . . . . .	329
5.2.13	Beispiel Verbrennungsmotor . . . . .	334
5.3	Exakte Zustandslinearisierung . . . . .	337
5.3.1	Exakte Zustandslinearisierung von SISO-Systemen . . . . .	337
5.3.2	Beispiel Bohrturm . . . . .	343
5.3.3	Exakte Zustandslinearisierung von MIMO-Systemen . . . . .	349
5.3.4	Flachheit exakt zustandslinearisierbarer Systeme . . . . .	353
5.3.5	Beispiel Rakete . . . . .	354
5.4	Steuerung und Regelung flacher Systeme . . . . .	358
5.4.1	Grundlagen . . . . .	358
5.4.2	Steuerung von Systemen mit fiktivem flachen Ausgang . . . . .	360
5.4.3	Flachheitsbasierte Steuerung linearer Systeme . . . . .	364
5.4.4	Beispiel Triebwerkbasierte Flugzeugsteuerung . . . . .	366
5.4.5	Flachheitsbasierte Regelung nichtlinearer Systeme . . . . .	371
5.4.6	Beispiel Pneumatikmotor . . . . .	376
5.4.7	Flache Eingänge und ihre Konstruktion . . . . .	380
5.4.8	Flache Eingänge linearer Systeme . . . . .	385
5.4.9	Beispiel Ökonomisches Marktmodell . . . . .	385
5.5	Control-Ljapunov-Funktionen . . . . .	388
5.5.1	Grundlagen . . . . .	388
5.5.2	Control-Ljapunov-Funktion für lineare Systeme . . . . .	390
5.5.3	Regler für eingangslinere Systeme . . . . .	391
5.5.4	Illustrationsbeispiel . . . . .	393
5.5.5	Beispiel Kraftwerk mit Netzeinspeisung . . . . .	394
5.6	Das Backstepping-Verfahren . . . . .	400
5.6.1	Idee des Verfahrens . . . . .	400
5.6.2	Rekursives Schema für den Reglerentwurf . . . . .	405
5.6.3	Illustrationsbeispiele . . . . .	407
5.6.4	Beispiel Fluidsystem mit chaotischem Verhalten . . . . .	411
6	Regelungen für lineare und nichtlineare Regelstrecken . . . . .	417
6.1	Modellbasierte prädiktive Regelung . . . . .	417
6.1.1	Grundlagen und Funktionsweise . . . . .	417
6.1.2	Lineare modellbasierte prädiktive Regelung . . . . .	420
6.1.3	LMPR mit Beschränkungen . . . . .	425

6.1.4	Beispiel Entwässerungssystem	427
6.1.5	Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung	431
6.1.6	Beispiel Eindampfanlage	437
6.2	Strukturvariable Regelungen mit Gleitzustand	440
6.2.1	Funktionsweise und Eigenschaften	440
6.2.2	Entwurf für lineare Regelstrecken	443
6.2.3	Dynamik im Gleitzustand	445
6.2.4	Nachweis der Robustheit	446
6.2.5	Beispiel DC-DC-Wandler	447
6.2.6	Entwurf für nichtlineare Regelstrecken	452
6.2.7	Beispiel Optischer Schalter	453
6.3	Passivitätsbasierte Regelung	457
6.3.1	Regelung passiver Systeme mittels Kennfeldern	457
6.3.2	Beispiel Dämpfung seismischer Gebäudeschwingungen	459
6.3.3	Passivierung nichtpassiver linearer Systeme	467
6.3.4	Passivierung nichtpassiver eingangslinärer Systeme	473
6.3.5	Passivitätsbasierte Regelung mit IDA	474
6.3.6	Beispiel Papiermaschine	479
6.4	Fuzzy-Control	483
6.4.1	Einführung	483
6.4.2	Fuzzifizierung	484
6.4.3	Inferenz	487
6.4.4	Defuzzifizierung	493
6.4.5	Fuzzy-Systeme und Fuzzy-Regler	494
6.4.6	Beispiel Abstandsregelung für Automobile	497
<b>7</b>	<b>Beobachter für nichtlineare Systeme</b>	<b>503</b>
7.1	Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme	503
7.1.1	Definition der Beobachtbarkeit	503
7.1.2	Beobachtbarkeit autonomer Systeme	506
7.1.3	Beispiel Synchrongenerator	509
7.1.4	Beobachtbarkeit allgemeiner nichtlinearer Systeme	511
7.1.5	Nichtlineare Beobachtbarkeitsnormalform	513
7.1.6	Beobachtbarkeit eingangslinärer Systeme	516
7.2	Luenberger-Beobachter für nichtlineare Regelkreise	519
7.3	Beobachterentwurf mittels Linearisierung	521
7.3.1	Funktionsweise und Entwurf	521
7.3.2	Regelkreis mit Beobachter	524
7.3.3	Beispiel Bioreaktor	526
7.4	Das erweiterte Kalman-Filter	530
7.4.1	Kalman-Filter für lineare Systeme	530
7.4.2	Das EKF für nichtlineare Systeme	531
7.4.3	Beispiel Flugzeugtriebwerk	534
7.5	High-gain-Beobachter	537
7.5.1	Einführung und Funktionsweise	537

---

7.5.2	High-gain-Beobachter in allgemeiner Form .....	542
7.5.3	Beispiel Chemischer Reaktor .....	544
7.5.4	Der Fall einganglinearer Systeme .....	548
<b>8</b>	<b>Wörterbuch .....</b>	<b>553</b>
8.1	Deutsch → Englisch .....	553
8.2	Englisch → Deutsch .....	566
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>581</b>
<b>A</b>	<b>Daten zum Beispiel Containerkran.....</b>	<b>581</b>
<b>B</b>	<b>Mathematische Zeichen und Funktionen .....</b>	<b>583</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>587</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>603</b>