

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Historische Entwicklung	1
1.2	Beschreibung des Steuerungs- und Regelungsproblems	7
1.3	Die regelungstechnische Wirkungsplan-Darstellung	9
1.4	Vorbetrachtungen zur quantitativen Behandlung gesteuerter Prozesse	13
1.4.1	Auswirkungen von Signalbegrenzungen	13
1.4.2	Linearisierung um Gleichgewichtslagen und „Kleinsignal“-Modelle	23
1.4.3	Zur Modellgenauigkeit	31
<b>2</b>	<b>Mathematische Beschreibung von Signalen und Übertragungssystemen</b>	<b>39</b>
2.1	Einführung	39
2.2	Spektraldarstellung reellwertiger Signale	41
2.2.1	Periodische Signale und ihre <i>Fourier</i> -Reihen	41
2.2.2	Nichtperiodische Signale und ihre Spektralfunktionen	43
2.2.3	Von der <i>Fourier</i> - zur einseitigen <i>Laplace</i> -Transformation	48
2.3	Eigenschaften von Übertragungssystemen	50
2.3.1	Linearität	52
2.3.2	Zeitinvarianz	53
2.3.3	Kausalität	54
2.3.4	LTI-Übertragungssysteme	55
2.4	Darstellungsformen von LTI-Systemen	55
2.4.1	Übertragungsfunktionen und Übertragungsmatrizen	55
2.4.2	Berechnung von Übertragungsmatrizen für Systeme in Deskriptor-Darstellung	57
2.4.3	Gewichtsfunktion, Übergangsfunktion und Frequenzgangdarstellungen	60
2.5	Extremalprinzipien und Bewegungsgleichungen	64
2.5.1	Vorbemerkungen	64

2.5.2	Variationsproblem und <i>Eulersche</i> Differentialgleichungen .....	65
2.5.3	Bewegungsgleichungen mechanischer Systeme .....	69
2.5.4	<i>Lagrangescher</i> und <i>Hamiltonscher</i> Formalismus, Erhaltungssätze und Phasenraum .....	82
2.5.5	Bewegungsgleichungen unter Nebenbedingungen .....	91
2.5.6	Variationsaufgaben unter Nebenbedingungen .....	99
<b>3</b>	<b>Stabilität rationaler Übertragungsfunktionen .....</b>	<b>103</b>
3.1	Einführung .....	103
3.2	Definition der Stabilität für lineare zeitinvariante SISO- Übertragungsglieder mit rationaler Übertragungsfunktion ....	108
3.3	Ermittlung des größten gemeinsamen Teilers zweier Polynome	110
3.3.1	<i>Euklidischer</i> Algorithmus und <i>Bézoutsche</i> Identität ...	110
3.3.2	Anzahl der gemeinsamen Nullstellen zweier Polynome .	112
3.3.3	Anzahl und Lage der reellen Nullstellen eines Polynoms	116
3.4	Stabilitätsuntersuchungen nach E. J. <i>Routh</i> .....	118
3.4.1	Herleitung des <i>Routhschen</i> Algorithmus .....	119
3.4.2	Erweiterung des <i>Routhschen</i> Algorithmus auf nichtreguläre Fälle .....	125
3.5	Folgerungen aus den <i>Routhschen</i> Stabilitätsuntersuchungen ..	132
3.5.1	Ergänzungshinweise zur praktischen Anwendung .....	132
3.5.2	Das Determinantenkriterium von A. <i>Hurwitz</i> , die Erkenntnisse von <i>Liènard-Chipart</i> und die Formel von <i>Orlando</i> .....	140
3.5.3	Die Stabilitätskriterien von <i>Michailow</i> , <i>Leonhard- Cremer</i> und <i>Hermite-Biehler</i> .....	149
3.6	Stabilität von Polynomen mit unbestimmten Koeffizienten ...	153
3.6.1	Stabilität von Intervallpolynomen: Kriterium von <i>Charitonov</i> .....	153
3.6.2	Stabilität von Polynomen mit parameterabhängigen Koeffizienten .....	155
<b>4</b>	<b>Grundkonzepte der linearen Regelungstheorie .....</b>	<b>169</b>
4.1	Einführung .....	169
4.2	Wohldefiniertheit und Stabilität des geregelten Systems .....	172
4.3	Charakteristisches Polynom des Standardregelkreises .....	173
4.4	Stabilitätskriterium von <i>Strecker-Nyquist</i> .....	174
4.4.1	Erinnerung an die Funktionentheorie .....	175
4.4.2	Anwendung für den SISO-Standardregelkreis .....	176
4.4.3	Nutzung des <i>Strecker-Nyquist</i> -Kriteriums in der regelungstechnischen Praxis .....	182
4.4.4	Maße für Stabilitätsreserven im SISO-Standardregelkreis	183
4.5	SISO-Standardregelkreis mit PID-Reglern .....	185
4.5.1	Berechnung aller stabilisierenden P-Regler .....	185

4.5.2	Berechnung aller stabilisierenden PI-Regler und PD-Regler .....	188
4.5.3	Berechnung aller stabilisierenden PID-Regler .....	194
4.6	Regelgüte eines SISO-Standardregelkreises .....	197
4.6.1	Forderungen an die stationäre Genauigkeit .....	198
4.6.2	Forderungen an das Einschwingverhalten .....	200
4.6.3	Forderungen im Frequenzbereich .....	204
4.7	Stabilität und Regelgüte bei Unbestimmtheiten der Regelstrecke .....	210
4.7.1	Strukturierte Unbestimmtheiten und Empfindlichkeitsfunktionen .....	211
4.7.2	Mathematische Erfassung unstrukturierter Unbestimmtheiten der Regelstrecke .....	213
4.7.3	Robuste Stabilität .....	218
4.7.4	Robuste Güte .....	221
4.7.5	Frequenzganggestaltung für minimalphasige Regelstrecken mit Unbestimmtheiten .....	223
4.8	Trajektoriensteuerung mit Folgeregelung .....	225
4.8.1	Regelungsstruktur mit zwei Entwurfsfreiheitsgraden ..	226
4.8.2	Trajektoriensteuerung für Deskriptorsysteme .....	229
4.8.3	Folgeregelung für gesteuerte Deskriptorsysteme .....	234
<b>5</b>	<b>Regelbarkeit aus mathematischer Sicht .....</b>	<b>239</b>
5.1	Einführung .....	239
5.2	Funktionentheoretische Eigenschaften von stabilen Übertragungsfunktionen .....	240
5.3	Algebraische Eigenschaften von stabilen Übertragungsfunktionen .....	256
5.4	Reglerentwurf mittels teilerfremder Zerlegung des Regelstreckenmodells .....	260
5.4.1	Charakterisierung aller stabilisierenden Regler .....	260
5.4.2	Gangbare Wege des algebraischen Reglerentwurfs .....	262
5.4.3	Zur Unvermeidbarkeit von instabilen Reglern .....	267
<b>6</b>	<b>Beschreibung von LTI-Systemen durch Polynommatrizen .</b>	<b>271</b>
6.1	Einführung .....	271
6.2	MIMO-LTI-Systeme in polynomialer Darstellung .....	273
6.2.1	Polynomiale Systembeschreibung und allgemeine Übertragungsmatrix .....	273
6.2.2	Linksteiler polynomialer Matrizenpaare .....	275
6.2.3	Linksteiler und Nichtsteuerbarkeit .....	279
6.2.4	Rechtsteiler polynomialer Matrizenpaare .....	286
6.2.5	Rechtsteiler und Nichtbeobachtbarkeit .....	288
6.2.6	Basisgrößen für LTI-Regelstrecken .....	291
6.3	Polynomiale MIMO-LTI-Systeme mit Rückführungen .....	301

- 6.3.1 Charakteristisches Polynom des rückgeführten  
Systems und Nullstellenzuweisung ..... 301
  - 6.3.2 Rekonstruktion nicht gemessener Systemgrößen und  
beobachterbasierte Rückführung ..... 320
  - 6.3.3 *Strecker-Nyquist*-Kriterium für den MIMO-Standard-  
regelkreis ..... 326
- 6.4 LTI-Systeme in Zustandsbeschreibung ..... 332
  - 6.4.1 Zustandssteuerbarkeit ..... 332
  - 6.4.2 Zustandsbeobachtbarkeit ..... 339
  - 6.4.3 Dekomposition des Zustandsraumes und minimale  
Realisierungen von Übertragungsmatrizen ..... 342
  - 6.4.4 Basisgrößen für zustandssteuerbare Systeme ..... 347
- 7 Zeitdiskrete LTI-Systeme und Abtastregelkreise ..... 361**
  - 7.1 Einführung ..... 361
  - 7.2 Zeitdiskrete lineare Prozessmodelle ..... 363
  - 7.3 Stabilität zeitdiskreter linearer zeitinvarianter Systeme ..... 367
  - 7.4 Zeitdiskreter Standard-Regelkreis ..... 370
  - 7.5 Abtastregelkreis ..... 372
    - 7.5.1 Abtast- und Halteglieder ..... 372
    - 7.5.2 Zeitdiskrete Beschreibung eines Abtastregelkreises .... 379
    - 7.5.3 Zeitkontinuierliche Beschreibung der  
Übertragungsglieder eines Abtastregelkreises ..... 385
  - 7.6 Parametrische Übertragungsmatrizen in geschlossenen  
Abtastregelkreisen ..... 408
- Literaturverzeichnis ..... 421**
- Index ..... 429**