

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
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>	39
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> . . . . .	103
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>Liénard-Chipart</i> und die Formel von <i>Orlando</i> . . . . .	140
3.5.3	Die Stabilitätskriterien von <i>Michailov</i> , <i>Leonhard- Cremer</i> und <i>Hermite-Biebler</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> . . . . .	169
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
5	<b>Regelbarkeit aus mathematischer Sicht</b> . . . . .	239
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
6	<b>Beschreibung von LTI-Systemen durch Polynommatrizen</b> . . . . .	271
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	<i>Strecker-Nyquist</i> -Kriterium für den MIMO-Standardregelkreis	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
<b>7</b>	<b>Zeitdiskrete LTI-Systeme und Abtastregelkreise</b>	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
<b>Literaturverzeichnis</b>		421
<b>Index</b>		429