
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Historische Entwicklung	1
1.2	Beschreibung des Steuerungs- und Regelungsproblems	8
1.3	Die regelungstechnische Wirkungsplan-Darstellung	10
1.4	Vorbetrachtungen zur quantitativen Behandlung gesteuerter Prozesse	14
1.4.1	Auswirkungen von Signalbegrenzungen	14
1.4.2	Linearisierung um Gleichgewichtslagen und „Kleinsignal“-Modelle	24
1.4.3	Zur Modellgenauigkeit	32
2	Mathematische Beschreibung von Signalen und Übertragungssystemen	39
2.1	Einführung	39
2.2	Spektraldarstellung reellwertiger Signale	41
2.2.1	Periodische Signale und ihre <i>Fourier</i> -Reihen	42
2.2.2	Nichtperiodische Signale und ihre Spektralfunktionen	44
2.2.3	Von der <i>Fourier</i> - zur einseitigen <i>Laplace</i> -Transformation	48
2.3	Eigenschaften von Übertragungssystemen	55
2.3.1	Linearität	57
2.3.2	Zeitinvarianz	58
2.3.3	Kausalität	58
2.3.4	LTI-Übertragungssysteme	59
2.4	Darstellungsformen von LTI-Systemen	60
2.4.1	Übertragungsfunktionen und Übertragungsmatrizen	60
2.4.2	SISO-LTI-Übertragungsglieder nach DIN IEC 60050	62
2.4.3	Übertragungsfunktion des Totzeitgliedes	63
2.4.4	Berechnung von Übertragungsmatrizen für Systeme in Deskriptor-Darstellung	73
2.4.5	Eigenschaften rationaler Übertragungsfunktionen	78

2.4.6	Zustandsdarstellungen streng properer Übertragungsfunktionen	83
2.4.7	Frequenzgangdarstellungen, Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	87
2.5	Modellbildung für mechanische Schwingungssysteme	91
2.5.1	Massenpunkte-System als Modell	91
2.5.2	Gleichgewichtsbedingungen der Statik	94
2.5.3	<i>D'Alembertsches</i> Prinzip und Bewegungsgleichungen der Kinetik	97
2.5.4	Kanonische Bewegungsgleichungen und <i>Hamilton-Jacobische</i> Differentialgleichung	106
3	Stabilität rationaler Übertragungsfunktionen	113
3.1	Einführung	113
3.2	Definition der Stabilität für lineare zeitinvariante SISO-Übertragungsglieder mit rationaler Übertragungsfunktion....	118
3.3	Ermittlung des größten gemeinsamen Teilers zweier Polynome	121
3.3.1	<i>Euklidischer</i> Algorithmus und <i>Bézoutsche</i> Identität ...	121
3.3.2	Anzahl der gemeinsamen Nullstellen zweier Polynome .	123
3.3.3	Anzahl und Lage der reellen Nullstellen eines Polynoms	126
3.4	Stabilitätsuntersuchungen nach E. J. <i>Routh</i>	128
3.4.1	Herleitung des <i>Routhschen</i> Algorithmus	129
3.4.2	Erweiterung des <i>Routhschen</i> Algorithmus auf nichtreguläre Fälle.....	136
3.5	Folgerungen aus den <i>Routhschen</i> Stabilitätsuntersuchungen ..	143
3.5.1	Ergänzungshinweise zur praktischen Anwendung	143
3.5.2	Das Determinantenkriterium von A. <i>Hurwitz</i> , die Erkenntnisse von <i>Liènard-Chipart</i> und die Formel von <i>Orlando</i>	151
3.5.3	Die Stabilitätskriterien von <i>Michailov</i> , <i>Leonhard-Cremer</i> und <i>Hermite-Biehler</i>	160
3.6	Stabilität von Polynomen mit unbestimmten Koeffizienten ...	164
3.6.1	Stabilität von Intervallpolynomen: Kriterium von <i>Charitonov</i>	164
3.6.2	Stabilität von Polynomen mit parameterabhängigen Koeffizienten.....	166
4	Grundkonzepte der linearen Regelungstheorie	179
4.1	Einführung	179
4.2	Wohldefiniertheit und Stabilität des geregelten Systems	182
4.2.1	Charakteristisches Polynom des Regelkreises (CLCP) .	183
4.3	Stabilitätskriterium von <i>Strecker-Nyquist</i>	184
4.3.1	Erinnerung an die Funktionentheorie	185
4.3.2	Anwendung für den SISO-Standardregelkreis	186

4.3.3	Nutzung des <i>Strecker-Nyquist</i> -Kriteriums in der regelungstechnischen Praxis	192
4.4	Berücksichtigung von Totzeiten im SISO-Standardregelkreis ..	199
4.4.1	Ganze transzendente Funktion statt eines CLCP	199
4.4.2	Ermittlung der Nullstellen der charakteristischen Funktion	204
4.4.3	Stabilitätsprüfung totzeitbehafteter Systeme	208
4.5	SISO-Standardregelkreis mit PID-Reglern	211
4.5.1	Berechnung aller stabilisierenden P-Regler	212
4.5.2	Berechnung aller stabilisierenden PI-Regler und PD-Regler	214
4.5.3	Berechnung aller stabilisierenden PID-Regler	220
4.6	Regelgüte eines SISO-Standardregelkreises	224
4.6.1	Forderungen an die stationäre Genauigkeit	224
4.6.2	Forderungen an das Einschwingverhalten	226
4.6.3	Forderungen im Frequenzbereich	231
4.7	Stabilität und Regelgüte bei Unbestimmtheiten der Regelstrecke	237
4.7.1	Strukturierte Unbestimmtheiten und Empfindlichkeitsfunktionen	237
4.7.2	Mathematische Erfassung unstrukturierter Unbestimmtheiten der Regelstrecke	240
4.7.3	Robuste Stabilität	244
4.7.4	Robuste Güte	247
4.7.5	Frequenzgang-Gestaltung für minimalphasige Regelstrecken mit Unbestimmtheiten	249
4.8	Trajektoriensteuerung und Folgeregung	251
4.8.1	Regelungsstruktur mit zwei Entwurfsfreiheiten	252
4.8.2	Trajektoriensteuerung für Deskriptorsysteme	256
4.8.3	Folgeregung für gesteuerte Deskriptorsysteme	261
5	Regelbarkeit aus mathematischer Sicht	267
5.1	Einführung	267
5.2	Funktionentheoretische Eigenschaften von stabilen Übertragungsfunktionen	268
5.3	Algebraische Eigenschaften von stabilen Übertragungsfunktionen	285
5.4	Algebraische Methoden zur Synthese von Reglern	289
5.4.1	Charakterisierung aller stabilisierenden Regler	289
5.4.2	Gangbare Wege des algebraischen Reglerentwurfs	291
5.4.3	Robuste Stabilität und Nullstellenempfindlichkeit	298
5.4.4	Zur Unvermeidbarkeit von instabilen Reglern	303

6	Beschreibung von LTI-Systemen durch Polynommatrizen	309
6.1	Einführung	309
6.2	Polynomiale Systembeschreibung und allgemeine Übertragungsmatrix	310
6.3	<i>Hermite</i> scher Linksteiler polynomialer Matrizenpaare	316
6.4	<i>Hermite</i> scher Linksteiler, Kürzbarkeit und Eingangs-Entkopplungs-Nullstellen	326
6.5	<i>Hermite</i> scher Rechtsteiler polynomialer Matrizenpaare	332
6.6	<i>Hermite</i> scher Rechtsteiler, Eingangsbeobachtbarkeit, Beobachtbarkeit und Signalrekonstruktion	334
7	Entwurf von Steuerungen und Reglern für MIMO-Systeme	343
7.1	Einführung	343
7.2	Basisgrößen in LTI-Regelstrecken	344
7.2.1	Systemsteuerung und Berechnung der Systemsignale mittels Basisgrößen	344
7.2.2	Gesamtheit aller Basisgrößen	354
7.2.3	Konstruktion steuerungstechnisch zweckmäßiger Basisgrößen	356
7.3	Nullstellenplatzierung mittels Rückführungen	367
7.3.1	Mathematisches Grundkonzept	367
7.3.2	Nullstellenplatzierung mittels statischer Rückführungen	369
7.3.3	Nullstellenplatzierung mittels Rückführungen bei einem skalaren Steuereingang	371
7.3.4	Nullstellenplatzierung mittels statischer Rückführungen bei einem mehrkomponentigen Steuereingang	380
7.4	Rekonstruktion nicht gemessener Systemgrößen und beobachterbasierte Rückführung	383
7.5	Reglerentwurf für MIMO-Regelstrecken	390
7.5.1	Gesamtheit aller Regler und stabilisierende Regler	391
7.5.2	Propere Übertragungsmatrizen in geregelten MIMO-Systemen	392
7.5.3	Charakteristisches Polynom und <i>Strecker-Nyquist</i> -Kriterium für MIMO-Regelkreise	397
7.5.4	Reglerentwurf durch Lösung eines linearen algebraischen Gleichungssystems	404
7.6	Zusammenfassung	410
8	Zustandsraummethoden	413
8.1	Einführung	413
8.2	Nichtkürzbarkeit von Zustandsmodellen	418
8.3	Zustandsbeobachtbarkeit und -rekonstruktion	423
8.4	Basisgrößen und Steuerungsentwurf für Zustandsmodelle	429

8.4.1	Zustandsmodelle mit einem skalaren Steuereingang ...	430
8.4.2	Zustandsmodelle mit einem mehrkomponentigen Steuereingang	434
8.5	Reglerentwurf für Zustandsmodelle	442
8.5.1	Reglerentwurf bei einem skalaren Steuereingang	443
8.5.2	Reglerentwurf bei mehrkomponentigen Steuereingängen	452
8.5.3	Berechnung von Proportionalreglern mit Hilfe eines linearen algebraischen Gleichungssystems (LAG-Entwurf)	453
8.5.4	Synthese von ACK-Reglern	461
8.5.5	Konstruktion von robusten Proportionalreglern	470
8.5.6	Entwurf von Proportionalreglern durch Minimierung eines integralen Gütemaßes	481
8.5.7	Entwurf von dynamischen Reglern	490
9	Zeitdiskrete LTI-Systeme und Abtastregelkreise	493
9.1	Einführung	493
9.2	Steuerung und Regelung zeitdiskreter LTI-Regelstrecken	495
9.2.1	Zeitdiskrete lineare Prozessmodelle	495
9.2.2	Stabilität zeitdiskreter LTI-Systeme	500
9.2.3	Zeitdiskrete Steuerung und Regelung	503
9.3	Abtastregelkreise	505
9.3.1	Abtast- und Halteglieder	506
9.3.2	Zeitdiskrete Beschreibung eines Abtastregelkreises	512
9.3.3	Zeitkontinuierliche Beschreibung der Übertragungsglieder eines Abtastregelkreises	519
9.4	Parametrische Übertragungsmatrizen in geschlossenen Abtastregelkreisen	542
10	Fallstudie zur Anwendung der linearen Regelungs- und Steuerungstheorie	553
10.1	Einführung	553
10.2	Modellbildung	555
10.3	Basisgrößen, Trajektorienplanung und Steuerungsentwurf	560
10.4	Zustandsraum-Methodik als Alternative	571
10.5	Reglerentwurf	573
10.6	Simulation des gesteuerten und geregelten Systems	575
	Literaturverzeichnis	579
	Index	589