

EXPERIMENTELLE ANALYSE
DER DYNAMIK
VON REGELSYSTEMEN
(IDENTIFIKATION I)

VON

ROLF ISERMANN

PRIVATDOZENT AN DER UNIVERSITÄT STUTT GART



BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT • MANNHEIM/WIEN/ZÜRICH

HOCHSCHÜLTASCHENBÜCHER-VERLAG

Inhalt

1. Einleitung	15
2. Die mathematischen Beziehungen zwischen der Ein- und Ausgangsgröße eines linearen Übertragungsgliedes	22
2.1. Die FOURIER-Transformation.	22
2.2. Die LAPLACE-Transformation.	25
2.3. Determinierte Signale.	26
2.3.1. Das Faltungsintegral.	27
2.3.2. Der Frequenzgang.	29
2.4. Stochastische Signale.	30
2.4.1. Auto- und Kreuzkorrelationsfunktion .	31
2.4.2. Wirk- und Kreuzleistungsdichte.	35
 A DIREKTE MESSVERFAHREN FÜR REGELSYSTEME MIT KLEINEN STÖRUNGEN.	 41
3. Meß- und Auswerteverfahren für nichtperiodische Testsignale.	42
3.1. Einfach zu erzeugende Testsignale.	47
3.2. Auswertung durch direkte FOURIER-Transfor- mation.	49
3.2.1 Die FOURIER-Transformierten nicht- periodischer Testsignale.	51
3.2.1.1. Einfache Impulse.	51
3.2.1.2. Doppel-Impulse.	58
3.2.1.3. Sprung- und Rampenfunktion	60
3.2.2. Näherungsverfahren zur Berechnung des Frequenzganges.	62
3.2.3. Einfluß kleiner Störungen auf die Be- rechnung des Frequenzganges.	72

3.2.3.1.	Beispiele	72
3.2.3.2.	Abschätzung des Frequenz- gangfehlers.	77
3.2.4.	Günstige Testsignalfolgen mit nicht- periodischen Testsignalen (optimale Testsignale).	86
3.3.	Auswertung durch Approximation mit vorgege- bener Frequenzgang-Struktur unter Verwendung gemessener Kennwerte der Antwort funktion	94
3.3.1.	Kennwerte von Übergangsfunktionen proportionalwirkender Verzögerungs- glieder mit reellen Polen.	95
3.3.1.1.	Kennwerte von Verzögerungs- gliedern erster Ordnung	95
3.3.1.2.	Kennwerte von aperiodischen Verzögerungsgliedern höherer Ordnung.	98
3.3.2.	Kennwerte von Übergangsfunktionen integralwirkender Glieder.	104
3.3.3.	Approximation durch Verzögerungs- glied erster Ordnung und Totzeit	106
3.3.4.	Approximation durch Verzögerungs- glied n -ter Ordnung mit gleichen Zeit- konstanten.	107
3.3.5.	Approximation durch Verzögerungs- glied zweiter Ordnung mit ungleichen Zeitkonstanten.	110
3.3.6.	Approximation durch Verzögerungs- glied n -ter Ordnung mit gestaffelten Zeitkonstanten.	111
3.3.7.	Approximation durch Verzögerungs- glieder n -ter Ordnung mit verschiede- nen Zeitkonstanten.	113

3.4.	Auswertung durch Approximation mit beliebigem rationalen Frequenzgang.	115
3.4.1.	Methode der mehrfachen Integration	115
3.4.2.	Methode der mehrfachen Momente	118
3.5.	Auswertung durch Entfaltung.	120
4.	Meß- und Auswerteverfahren für periodische Testsignale.	123
4.1.	Frequenzgangmessung mit sinusförmigen Testsignalen.	124
4.1.1.	Direkte Auswertung der registrierten Ein- und Ausgangsschwingungen	124
4.1.2.	Auswertung durch Kompensationsgerät	124
4.1.3.	Auswertung mittels Abtastgerät	125
4.2.	Frequenzgangmessung mit rechteck- und trapezförmigen Testsignalen.	127
4.3.	Frequenzgangmessung mit Mehrfrequenz-Testsignalen.	131
4.4.	Einfluß kleiner Störungen auf die Frequenzgangmessung.	135
4.5.	Günstige Testsignalfolge mit periodischen Testsignalen.	140
4.6.	Zusammenstellung der günstigen Testsignale	144
B	DIREKTE MESSVERFAHREN FÜR REGELSYSTEME MIT GROSSEN STÖRUNGEN.	147
5.	Korrelations-Meßverfahren für periodische Testsignale	147
5.1.	Messung der Korrelationsfunktionen.	148
5.1.1.	Das Meßverfahren.	148
5.1.2.	Einfluß von Störungen.	151
5.2.	Meßverfahren mit orthogonaler Korrelation	152
5.2.1.	Das Meßverfahren.	152
5.2.2.	Einfluß von Störungen.	155

6.	Korrelations-Meßverfahren für stochastische Testsignale	165
6.1.	Weißes Rauschen als Testsignal	166
6.1.1.	Fehler durch endliche Integrationszeit.	168
6.1.2.	Fehler durch endliche Bandbreite des Testsignals.	171
6.1.3.	Fehler durch Drift	172
6.2.	Natürliches Rauschen als Testsignal	173
6.3.	Binäres Rauschen als Testsignal	174
6.4.	Periodisch binäre Signalfolgen als Testsignal (PZBF).	177
6.4.1.	Fehler durch endliche Integrationszeit.	182
6.4.2.	Fehler durch endliche Bandbreite des Testsignals.	182
6.4.3.	Zur Wahl der Parameter der PZBF ...	182
6.5.	Anwendung der Korrelations-Meßverfahren am geschlossenen Regelkreis.	184
6.6.	Vergleich der Genauigkeiten und Mindestmeßzei- ten bei Auswertung durch Korrelation und FOURIER-Transformation.	185
6.6.1.	Fehlerabschätzung bei der Auswertung mittels FOURIERanalyse.	186
6.6.2.	Fehlerabschätzung bei der Auswertung mittels Korrelation.	187
6.6.3.	Vergleich der Meßfehler.	189
6.6.4.	Leistungsdichten der Testsignale ...	190
6.6.5.	Vergleich der erreichbaren Genauigkei- ten bei verschiedenen Testsignalen ...	191
6.6.6.	Vergleich der Mindestmeßzeiten bei verschiedenen Testsignalen.	194

C ADAPTIVE MESSVERFAHREN

7.	Adaptive Meßverfahren für Regelsysteme mit klei- nen zusätzlichen Störungen.	203
----	---	-----

7.1. Adaptive Meßverfahren ohne künstliches Testsignal	203
7.1.1. Adaptive Modelle in Parallelschaltung	205
7.1.2. Adaptive Modelle in Serienschaltung	212
7.2. Adaptive Meßverfahren mit künstl. Testsignal	215
8. Adaptive Meßverfahren für Regelsysteme mit großen zusätzlichen Störungen	221

D ANHANG

9. Zur Berechnung eines rationalen Frequenzganges aus diskreten Frequenzgangwerten	225
9.1. Gegenseitige Abhängigkeit der Frequenzgangkoordinaten	226
9.2. Graphische Verfahren	227
9.3. Analytische Verfahren	228
9.3.1. Approximationsverfahren mit vorzuziehender Struktur	229
9.3.2. Approximationsverfahren mit Strukturermittlung	231
10. Über die erforderliche Genauigkeit der Frequenzgänge von Regelstrecken	233
10.1. Fehler im Frequenzgang einer Regelstrecke	233
10.2. Erforderliche Genauigkeit in Abhängigkeit von der Reglereinstellung an der Stabilitätsgrenze	235
10.3. Erforderliche Genauigkeit in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Regelgröße	238
10.4. Erforderliche Genauigkeit in Abhängigkeit von der Reglereinstellung im Betrieb	252
10.5. Schlußfolgerungen	254
Schrifttum	261
Sachverzeichnis	273