

Dierk Schröder

 dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to [dandelion.com](http://dandelion.com) network.

# Elektrische Antriebe 2

Regelung von Antrieben

Mit 421 Abbildungen

Jürgen-Knorr-Bibliothek  
Spende der Siemens AG  
an den FB Elektrotechnik



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Regeltechnische Grundbegriffe und Grundregeln</b>	<b>1</b>
1.1	Gegenüberstellung Steuerung und Regelung . . . . .	1
1.2	Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Systems durch den Signalflußplan . . . . .	6
1.3	Frequenzgang . . . . .	10
1.4	Graphische Darstellungen des Frequenzganges . . . . .	13
1.4.1	Darstellung in rechtwinkligen Koordinaten (Ortskurvendarstellung)	13
1.4.2	Graphische Darstellung in der logarithmischen Darstellung (Frequenzkennlinien, Bode-Diagramm) . . . . .	14
1.5	Rechenregeln, Umwandlungsregeln, Signalflußplan . . . . .	21
1.6	Einschleifige Regelkonzepte . . . . .	24
1.6.1	Führungsübertragungsfunktion / Störübertragungsfunktion und charakteristische Gleichung des Regelkreises . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Stabilisierung von Regelkreisen</b>	<b>27</b>
2.1	Stabilität . . . . .	28
2.2	Nyquist-Stabilitäts-Kriterium . . . . .	31
2.3	Frequenzkennlinie . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Standard-Optimierungs-Verfahren</b>	<b>38</b>
3.1	Optimierung im offenen Kreis (Bode-Diagramm) . . . . .	39
3.2	Betragsoptimum (BO); Strecke ohne $I$ -Anteil . . . . .	43
3.3	Anwendungen zum Betragsoptimum . . . . .	48
3.4	Symmetrisches Optimum (SO); Strecke mit $I$ -Anteil . . . . .	53
3.5	Erweiterter Gültigkeitsbereich SO (Strecke ohne $I$ -Anteil) . . . . .	59
3.6	Auswahl des Reglers und Bestimmung der Optimierung . . . . .	64
3.7	Führungsverhalten bei einer Rampenfunktion . . . . .	66
3.8	Anhang zu Kapitel 3 . . . . .	68
3.8.1	Optimierung im geschlossenen Kreis . . . . .	68
3.8.2	Beispiel $PI$ -Regler / $PT_2$ -Strecke . . . . .	71

3.8.3	Ableitung der Reglerparameter für das symmetrische Optimum aus den Betragsanschmiegungsbedingungen . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Verallgemeinerte Optimierungsverfahren</b>	<b>83</b>
4.1	Dämpfungsoptimum, Einführung . . . . .	83
4.2	Beispiele zum Dämpfungskriterium . . . . .	88
4.2.1	$PT_1$ -Strecke mit $I$ -Regler . . . . .	88
4.2.2	$IT_1$ -Strecke mit $PI$ -Regler . . . . .	89
4.2.3	$2\cdot PT_1$ -Strecke mit $PI$ -Regler . . . . .	91
4.3	Polverteilung und Übergangsfunktionen bei Optimierung nach Doppelverhältnissen . . . . .	92
4.4	Zählerpolynom und äquivalente Sollwertglättung . . . . .	97
4.5	Erweitertes DO; Führungs-Übertragungsfunktion mit Zählerpolynom . . . . .	98
4.6	Erweitertes DO; Strecken-Übertragungsfunktion mit Zählerpolynom . . . . .	99
4.6.1	Kompensation des Zählerpolynoms . . . . .	100
4.6.2	Divisionsmethode . . . . .	100
4.6.3	Allgemeine Methode für Strecken mit Zählerpolynomen . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Regelkreisstrukturen</b>	<b>105</b>
5.1	Der vermaschte Regelkreis . . . . .	105
5.2	Kaskadenregelungen . . . . .	109
5.3	Abgewandelte Regelkreisstrukturen . . . . .	112
5.4	Zustandsregelung linearer, zeitinvarianter Regelsysteme . . . . .	113
5.4.1	Zustandsdarstellung . . . . .	113
5.4.1.1	Systembeschreibung . . . . .	113
5.4.1.2	Darstellungsformen . . . . .	115
5.4.1.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	118
5.4.1.4	Lösung der Zustandsdifferentialgleichung im Zeitbereich . . . . .	120
5.4.2	Zustandsregelung . . . . .	121
5.4.2.1	Reglerentwurf durch Polvorgabe . . . . .	121
5.4.2.2	Reglerentwurf auf endliche Einstellzeit . . . . .	123
5.4.2.3	Modale Zustandsregelung . . . . .	123
5.4.2.4	Beobachterprinzip . . . . .	124
5.4.2.5	Beobachter mit Differenzierer und Parallelmodell . . . . .	124
5.4.2.6	Der Luenberger-Beobachter . . . . .	126
5.4.2.7	Separationsprinzip . . . . .	127
5.4.2.8	Das Kalman-Filter . . . . .	129
5.4.2.9	Probleme bei der Zustandsregelung . . . . .	130

<b>6</b>	<b>Praktische Anwendung der Optimierungskriterien</b>	<b>131</b>
6.1	Stromregelkreis . . . . .	131
6.2	Drehzahlregelkreis . . . . .	146
<b>7</b>	<b>Fehlereinflüsse und Genauigkeit bei geregelten Systemen</b>	<b>153</b>
7.1	Ausregelbare Fehler . . . . .	153
7.2	Nicht ausregelbare Fehler . . . . .	155
7.3	Abschätzung der Auswirkung der Fehler . . . . .	158
7.3.1	Statische Fehler . . . . .	158
7.4	Erreichbare Genauigkeit analog drehzahl geregelter Antriebe . . . . .	164
7.5	Geber . . . . .	167
7.6	Verringerung von Fehlereinflüssen . . . . .	170
<b>8</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter</b>	<b>174</b>
8.1	Prinzipielle Funktion netzgeführter Stellglieder, Grundlagen . . . . .	174
8.2	Untersuchung des dynamischen Verhaltens netzgeführter Stromrichter-Stellglieder . . . . .	177
8.2.1	Analyse des Stromrichterstellgliedes bei einer Zündwinkelverstellung in Richtung Gleichrichterbetrieb . . . . .	177
8.2.2	Analyse des Stromrichterstellgliedes bei einer Zündwinkelverstellung in Richtung Wechselrichterbetrieb . . . . .	181
8.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	182
8.4	Dynamische Eigenschaften der Stellglieder mit linearer statischer Kennlinie . . . . .	186
8.5	Laufzeitnäherung für das Großsignalverhalten – Symmetrierung . . . . .	191
8.6	Großsignal-Approximationen für netzgeführte Stromrichter-Stellglieder . . . . .	196
<b>9</b>	<b>Grundlagen der Abtastung / z-Transformation</b>	<b>202</b>
9.1	Abtastvorgang . . . . .	203
9.2	z-Transformation . . . . .	205
9.3	Gesetze und Rechenmethoden der z-Transformation . . . . .	207
9.4	Transformationstabelle . . . . .	216
9.5	Übertragungsfunktionen von Abtastsystemen, Stabilität und Polstellen . . . . .	220
9.6	Übertragungsverhalten von diskreten Systemen . . . . .	227
9.7	Systeme mit mehreren nichtsynchrone Abtastern . . . . .	229
9.8	Einschleifige Abtastregelkreise . . . . .	230
9.8.1	Aufbau von digitalen Abtastregelkreisen . . . . .	230
9.8.2	Elementare zeitdiskrete Regler . . . . .	233
9.9	Optimierung des Reglers bei Abtastregelkreisen . . . . .	236
9.9.1	Realisierungsverfahren von Abtastreglern . . . . .	236

9.9.2	Parameteroptimierung des Reglers nach einem Gütekriterium . . . . .	237
9.9.3	Entwurf als Kompensationsregler . . . . .	238
9.10	Entwurf zeitdiskreter Regelkreise auf endliche Einstellzeit . . . . .	240
9.10.1	Reglerentwurf ohne Stellgrößenvorgabe . . . . .	243
9.10.2	Reglerentwurf mit Stellgrößenvorgabe . . . . .	247
9.10.3	Wahl der Abtastzeit bei dead-beat-Reglern . . . . .	249
9.10.4	Beispiel zum dead-beat-Regler . . . . .	250
<b>10</b>	<b>Untersuchung von Regelkreisen mit Stromrichtern mit der Abtasttheorie</b>	<b>253</b>
10.1	Untersuchung des Steuergerätes ohne Steilheitsbegrenzer . . . . .	254
10.2	Untersuchung des Stromrichters . . . . .	256
10.3	Das Stromrichter-Stellglied bei lückendem Strom . . . . .	260
10.4	Adaptive Stromregelung . . . . .	264
10.4.1	Allgemeine Betrachtung . . . . .	264
10.4.2	Praktische Realisierung . . . . .	269
10.4.3	Prädiktive Stromführung . . . . .	277
<b>11</b>	<b>Die Beschreibungsfunktion des Stromrichters mit natürlicher Kommutierung</b>	<b>279</b>
11.1	Allgemeine Einführung . . . . .	279
11.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	282
11.3	Die Untersuchung von Regelkreisen mit der Beschreibungsfunktion	289
11.4	Die Grenzen des Verfahrens . . . . .	293
<b>12</b>	<b>Vergleich verschiedener Approximationen für netzgeführte Stromrichter</b>	<b>295</b>
12.1	Ermittlung von $G_I(z, m)$ ; Sprungfähigkeit . . . . .	296
12.2	Berechnung der ersten Ableitung der Steuersatzeingangsspannung	298
12.3	Die Überprüfung der Stromrichterstellglied-Approximationen . . . . .	301
12.4	Synthese von Regelkreisen mit Stromrichter-Stellgliedern . . . . .	309
<b>13</b>	<b>Geregelte Gleichstrommaschine bei variablem Feld</b>	<b>314</b>
13.1	Gleichstrommaschine bei variablem Feld . . . . .	314
13.2	Erregerstromregelung . . . . .	316
13.3	Schaltungsvarianten . . . . .	318
13.4	Sammelschienenantrieb . . . . .	320
13.5	Contiflux-Regelung . . . . .	322
13.6	Spannungsabhängige Feldschwächung . . . . .	324

<b>14</b>	<b>Drehzahlregelung bei elastischer Verbindung zur Arbeitsmaschine</b>	<b>334</b>
14.1	Regelung der Arbeitsmaschinendrehzahl . . . . .	336
14.2	Regelung der Motordrehzahl . . . . .	341
14.3	Zustandsregelung des Zweimassenschwingers . . . . .	352
14.3.1	Zustandsdarstellung . . . . .	352
14.3.2	Zustandsregelung . . . . .	354
14.3.3	Auslegung einer Zustandsregelung nach dem Dämpfungsoptimum	357
14.4	Zustandsregelung des Zweimassenschwingers mit I-Anteil . . . .	362
14.5	Anmerkungen zur Regelung „elektromechanischer Systeme“ . .	368
<b>15</b>	<b>Die Asynchronmaschine</b>	<b>375</b>
15.1	Stator- und Läuferfluß-Orientierung — Signalfußpläne . . . . .	380
15.1.1	Signalfußplan bei Luftspaltfluß-Orientierung . . . . .	394
15.2	Regelung der Drehfeldmaschine — Entkopplung . . . . .	406
15.3	Realisierung der Entkopplung bei eingepprägter Spannung . . . .	414
15.4	Entkopplung bei Umrichtern mit eingepprägtem Strom . . . . .	419
15.5	Feldorientierte Regelung . . . . .	426
15.6	Modellbildung . . . . .	433
15.6.1	Das Strommodell . . . . .	433
15.6.2	Die $I_1 - \vartheta$ bzw. $I_1 - \Omega_L$ Modelle . . . . .	440
15.6.3	Das $U_1 - I_1$ Modell . . . . .	445
15.6.4	Das $U_1 - I_1 - \Omega_L$ Modell . . . . .	448
15.6.5	Das $U_1 - \Omega_L$ Modell . . . . .	452
15.6.6	Zusammenfassung der Modelle . . . . .	456
15.7	Modellnachführung . . . . .	457
15.7.1	Parameteradaption nach Schumacher . . . . .	459
15.8	Die Asynchronmaschine in normierter Darstellung . . . . .	465
15.9	Stromregelverfahren . . . . .	470
15.9.1	Regelstrecke, Stellglied und Reglerkonfigurationen . . . . .	470
15.9.2	Indirekte Verfahren . . . . .	474
15.9.3	Modulationsverfahren . . . . .	477
15.9.4	Direkte Verfahren . . . . .	497
15.10	Direkte Selbstregelung . . . . .	501
15.11	Dynamische Stellglied-Approximation . . . . .	504
<b>16</b>	<b>Die Synchronmaschine</b>	<b>507</b>
16.1	Synchron-Schenkelpolmaschine . . . . .	508
16.1.1	Schenkelpolmaschine bei Spannungseinprägung — Signalfußplan	508
16.1.2	Schenkelpolmaschine bei Stromeinprägung — Signalfußplan . .	519
16.2	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung . . . . .	522
16.3	Synchron-Vollpolmaschine . . . . .	525

16.4	Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung — Steuerbedingungen . . . . .	529
16.5	PM-Drehfeldmaschine . . . . .	535
16.5.1	Signalfußplan PM-Maschine . . . . .	535
16.5.2	Regelung der PM-Maschine ohne Reluktanzeinflüsse . . . . .	540
16.5.3	Rechteckförmige Stromeinprägung ohne Reluktanzeinflüsse . . . . .	544
16.5.4	Vergleich der sinus- und rechteckförmig gespeisten PM-Maschine . . . . .	548
16.5.5	Feldschwächbereich . . . . .	553
16.5.6	Die PM-Drehfeldmaschine mit Reluktanzeinflüssen . . . . .	560
16.6	Regelung der Synchronmaschine durch Entkopplung . . . . .	562
16.7	Die Vollpolmaschine mit Dämpferwicklung in feldorientierter Darstellung . . . . .	575
	<b>Variablenübersicht</b>	<b>584</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>590</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>625</b>