

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	11
<b>Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen</b> .....	14
<b>Teil I</b>	
<b>Einführung und Grundlagen</b> .....	17
<b>1. Die Entwicklung der Positionierantriebe</b> .....	17
1.1 Geschichtlicher Überblick .....	17
1.2 Sonderbauformen von Schrittmotoren .....	23
1.3 Typenübersicht .....	25
<b>2. Einführung und Begriffsbestimmungen</b> .....	28
2.1 Drehfeld und Schrittfeld in Synchronmotoren .....	28
2.2 Statische Drehmomente .....	32
2.3 Einzelschritt-Fortschaltung .....	36
2.4 Kennlinien bei variabler Schrittfrequenz .....	38
<b>3. Die Erzeugung des Schrittfeldes</b> .....	44
3.1 Der Aufbau der Ständerwicklung .....	44
3.2 Das Luftspaltfeld eines Ständerstranges .....	46
3.3 Die räumliche Phasenlage der Strangpotentiale .....	48
3.4 Die räumliche Phasenlage der Haltemomente .....	49
3.5 Halbschrittbetrieb .....	56
3.6 Bestromungstabellen .....	57
3.7 Bipolare und unipolare Ausführung der Ständerwicklung .....	61
3.8 Mikrostepbetrieb .....	63
<b>4. Schaltungstechnik der Ständerelektronik</b> .....	66
4.1 Prinzipieller Aufbau der elektronischen Leistungsschalter .....	66
4.2 Die Steuerung der elektrischen Betriebsgrößen .....	68
4.3 Steuerbefehle der Leistungsschalter .....	70
4.4 Kommutierungsschaltungen .....	70
4.5 Integrierte Schrittmotorenansteuerungen .....	80
<b>5. Schrittwinkelfehler</b> .....	83
5.1 Definition der Positionsabweichung und des Schrittwinkelfehlers .....	84

5.2 Einfluß der äußeren Belastung .....	87
5.3 Schrittwinkelfehler durch Unsymmetrien in Größe und Phasenlage der Strangmomente .....	89
5.4 Schrittwinkelfehler eines zweisträngigen PM-Motors bei Vollschrittbetrieb (2 aus 2) .....	91
5.5 Schrittwinkelfehler eines zweisträngigen PM-Motors bei Vollschrittbetrieb (1 aus 2) .....	94
5.6 Schrittwinkelfehler eines zweisträngigen PM-Motors bei Halbschrittbetrieb .....	96
5.7 Schrittwinkelfehler durch Rastmomente .....	97
5.8 Abhängigkeit des Schrittwinkelfehlers von der Statorbestromung .....	111
<b>6. Dimensionierung des magnetischen Kreises und Be- rechnung des statischen Drehmomentes .....</b>	<b>104</b>
6.1 Diskrete magnetische Ersatzschaltbilder .....	105
6.2 Beschreibung permanentmagnetischer Materialien .....	106
6.3 Die Elemente des magnetischen Ersatzschaltbildes ....	108
6.4 Berechnung der integralen Feldgrößen .....	109
6.5 Berechnung der stationären Momente mit Hilfe der magnetischen Koenergie .....	111
6.6 Berechnung des Haltemomentes aus der Koenergie .....	113
6.7 Berechnung des Haltemomentes aus der Flußverkettung .	116

## Teil II

<b>Ausführungsformen von Schrittmotoren .....</b>	<b>119</b>
<b>7. Mehrsträngige permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren .....</b>	<b>119</b>
7.1 Konstruktiver Aufbau .....	120
7.2 Schrittwinkel $\alpha$ und Ausführbarkeitsbedingungen .....	123
7.3 Flußverkettungsgleichungen .....	125
7.4 Klauenpolschrittmotoren .....	127
<b>8. Einsträngige permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren .....</b>	<b>132</b>
8.1 Funktionsweise .....	132
8.2 Dimensionierung des Einstrangmotors .....	136
8.3 Konstruktive Ausführung .....	138
8.4 Momentenerzeugung und Flußverkettung .....	139

<b>9. Reluktanzschrittmotoren</b> .....	142
9.1 Einständer-Reluktanzmotoren nach dem Schwingfeld- prinzip .....	144
9.2 Schrittwinkel $\alpha$ und Ausführbarkeitsbedingungen .....	147
9.3 Optimale Ständer- und Läufernutzung .....	152
9.4 Magnetisches Ersatzschaltbild .....	154
9.5 Flußverkettung bei Reihenschaltung der Ständer- wicklung .....	156
9.6 Flußverkettung bei Gegenschaltung der Ständerwicklung	159
9.7 Betriebsarten von Reluktanzmotoren .....	161
9.8 Mehrständer-Reluktanzmotoren .....	165
<b>10. Hybridschrittmotoren</b> .....	169
10.1 Mechanismus der Drehmomentbildung .....	169
10.2 Erzeugung des homopolar erregten Drehfeldes .....	170
10.3 Konstruktiver Aufbau .....	175
10.4 Schrittwinkel $\alpha$ und Ausführbarkeitsbedingungen .....	176
10.5 Magnetisches Ersatzschaltbild .....	180
10.6 Flußverkettungsgleichungen des zweisträngigen Motors	182
10.7 Einfluß endlicher axialer Leitwerte im Ständerpaket .	185
 <b>Teil III</b>	
<b>Theorie der Schrittmotoren</b> .....	189
 <b>11. Das dynamische Gleichungssystem der Schrittmotoren</b> ..	189
11.1 Die Gleichungen des Ständerkreises .....	189
11.2 Berechnung des inneren Drehmomentes .....	190
11.3 Zweiachsentransformation dreisträngiger Schritt- motoren .....	191
11.4 Genäherte Betriebsgleichungen unipolar gespeister VR-Motoren .....	194
11.5 Zweiachsentransformation zweisträngiger Schritt- motoren .....	195
11.6 Normierung der Ständergrößen .....	197
11.7 Die Bewegungsgleichung des Läufers .....	198
11.8 Die Integration der elektrodynamischen Gleichungen ..	200
 <b>12. Periodisch stationärer Betriebszustand</b> .....	202
12.1 PM-Schrittmotoren bei Konstantspannungsbetrieb .....	204

12.2	VR-Schrittmotoren bei bipolarem Konstantspannungs- betrieb .....	211
12.3	PM-Schrittmotoren im Bilevelbetrieb .....	214
12.4	PM-Schrittmotoren im Konstantstrombetrieb .....	215
<b>13.</b>	<b>Ausgleichsvorgänge bei kleinen Abweichungen vom Stationärbetrieb .....</b>	<b>218</b>
13.1	Die Störungsgrößen bei vorgegebener Ständerspannung .	218
13.2	Die Übertragungsfunktionen des Motors .....	220
13.3	Dynamische Stabilität der PM-Motoren .....	222
13.4	Dämpfung bei Konstantstrombetrieb .....	226
13.5	Dämpfung durch externe mechanische Hilfsmittel .....	228
<b>14.</b>	<b>Die Untersuchung der Bewegungsvorgänge im Phasenraum</b>	<b>231</b>
14.1	Normierung der Bewegungsgleichung .....	234
14.2	Bewegungsgleichungen der bipolar erregten VR-Motoren	235
14.3	Die Darstellung von Bewegungsvorgängen im Phasenraum	237
14.4	Mathematische Grundlagen der Phasenraumdarstellung ..	239
14.5	Diskussion der singulären Punkte der Bewegungsglei- chung der Schrittmotoren .....	241
14.6	Zusammenstellung der normierten Bewegungsgleichungen	246
<b>15.</b>	<b>Freie Schwingungen bei räumlich festem Ständerfeld ..</b>	<b>248</b>
15.1	Lösung der Anfangswertaufgabe bei einem ungedämpften nichtlinearen Schwinger .....	248
15.2	Einzelschritt-Fortschaltung eines stillstehenden Rotors .....	253
15.3	Einzelschritt-Fortschaltung eines stillstehenden Rotors bei Coulomb'scher Reibung .....	257
15.4	Eigenfrequenz und Dämpfung von nichtlinearen Eigen- schwingungen .....	259
15.5	Die Eigenschwingungen dissipativer Systeme .....	262
<b>16.</b>	<b>Freie Schwingungen bei Schrittsequenzen .....</b>	<b>265</b>
16.1	Schrittposition und Schrittfrequenz .....	265
16.2	Freie Schwingungen bei linearer Frequenzrampe .....	266
16.3	Beschleunigungsvorgänge bei optimal angepaßtem Pol- radwinkel .....	274
<b>17.</b>	<b>Experimentelle Optimierung von Schrittfrequenz- programmen .....</b>	<b>278</b>
17.1	Schrittsequenzen mit ausgeprägten Hochlauf- und Bremsbereichen .....	280

---

17.2 Schrittsequenzen mit sehr geringer Schrittzahl .....	283
17.3 Stabilitätsgrenzen bei Schrittsequenzen .....	284
<b>18. Periodische Bewegungsvorgänge .....</b>	<b>289</b>
18.1 Harmonische Resonanzen .....	289
18.2 Nichtlineare Grundresonanz .....	292
18.3 Stabilitätsgrenze bei harmonischer Resonanz .....	295
18.4 Subharmonische Resonanz im Halbschrittbetrieb .....	297
 <b>Teil IV</b>	
<b>Praxis der Schrittantriebe .....</b>	<b>301</b>
 <b>19. Schrittmotorenantriebe mit Positionsrückführung .....</b>	<b>301</b>
19.1 Struktur der Positionierantriebe .....	301
19.2 Logischer Aufbau des Pulsgenerators .....	302
19.3 Schrittmotorenantriebe mit indirekter Positionsrück- führung .....	304
 <b>20. Messtechnik bei Schrittmotoren .....</b>	<b>306</b>
20.1 Messung des statischen Haltemomentes .....	306
20.2 Messung des dynamischen Drehmomentes .....	308
20.3 Messung der Startgrenzfrequenz .....	309
20.5 Messung des dynamischen Schrittwinkelfehlers .....	310
 <b>Sachregister .....</b>	<b>311</b>