

# Inhaltsverzeichnis

---

## Herausgeber-Vorwort

## Autoren-Vorwort

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Schrittantriebe</b>	<b>1</b>
	Erich Rummich	
1.1	Einführung	1
1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	4
1.2.1	Reluktanzschrittmotoren	4
1.2.2	Permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren	4
1.2.3	Hybridschrittmotoren	6
1.3	Erzeugung des Schrittfeldes	7
1.3.1	Gegenüberstellung Drehfeld – Schrittfeld	7
1.3.2	Ständerwicklungen für Schrittmotoren	10
1.3.3	Vollschriftbetrieb	12
1.3.4	Halbschriftbetrieb	12
1.3.5	Mikroschriftbetrieb	14
1.3.6	Bestromungstabellen	14
1.3.7	Unipolare und bipolare Anspeisung der Ständerwicklung	16
1.4	Statischer Drehmomentenverlauf	17
1.4.1	Haltemoment der PM-Motoren	18
1.4.2	Haltemoment bei VR-Motoren	21
1.5	Einzelschritt-Betrieb	22
1.6	Berechnung des magnetischen Kreises	25
1.7	Energetische Betrachtungen, Ermittlung des statischen Drehmomentes	30
1.8	Kennlinien bei variabler Schrittfrequenz im Stationärbetrieb	35
1.9	Schrittmotorantrieb	37
<b>2</b>	<b>Reluktanzmotoren und Sonderbauarten</b>	<b>42</b>
	Erich Rummich	
2.1	Reluktanzmotoren	42
2.1.1	Einständerbauweise	42
2.1.2	Mehrständerausführung	44

<b>2.1.3</b>	<b>Schrittwinkel und Ausführbarkeitsbedingungen</b>	<b>46</b>
<b>2.1.3.1</b>	<b>Einständer-VR-Motoren mit Einzelzähnen im Ständer</b>	<b>47</b>
<b>2.1.3.2</b>	<b>Einständer-VR-Motoren mit hoher Schrittauflösung</b>	<b>48</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Optimale Zahn- und Nutform</b>	<b>49</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Betriebsarten von Reluktanzmotoren</b>	<b>51</b>
<b>2.2</b>	<b>Scheibenmagnet-Schrittmotoren</b>	<b>56</b>
<b>2.3</b>	<b>Einsträngige PM-Schrittmotoren</b>	<b>59</b>
<b>2.4</b>	<b>Linearschrittantriebe</b>	<b>63</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Elektromagnetische Linearschrittantriebe</b>	<b>63</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Piezoelektrische Schrittmotoren</b>	<b>64</b>
<b>3</b>	<b>Permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren</b>	<b>68</b>
	<b>Friedrich Traeger</b>	
<b>3.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Aufbau der Schrittmotoren mit Wechselpolläufer</b>	<b>68</b>
<b>3.3</b>	<b>Klauenpol-Schrittmotor</b>	<b>68</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Konstruktive Details</b>	<b>71</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Magnetqualität</b>	<b>72</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Drehmoment und Schrittwinkelbereich</b>	<b>74</b>
<b>3.4</b>	<b>Schrittmotor mit Polwicklung</b>	<b>75</b>
<b>3.5</b>	<b>Funktionsweise</b>	<b>76</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Vollschritt-Halbschritt-Minischrittbetrieb</b>	<b>76</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Steuerschaltungen des Schrittmotors</b>	<b>79</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Haltemoment</b>	<b>81</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Positioniergenauigkeit</b>	<b>84</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Betriebskennlinien</b>	<b>90</b>
<b>3.5.6</b>	<b>Messung der Betriebskennlinien</b>	<b>91</b>
<b>3.6</b>	<b>Klauenpol-Schrittmotor mit Lagegeber</b>	<b>94</b>
<b>3.7</b>	<b>Anwendungsbiete</b>	<b>98</b>
<b>4</b>	<b>Hybrid-Schrittmotoren</b>	<b>100</b>
	<b>Ralf Gfrörer</b>	
<b>4.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>100</b>
<b>4.2</b>	<b>Aufbau und Funktion des Hybrid-Schrittmotors</b>	<b>100</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Grundfunktion – Erhöhung der Schrittzahl</b>	<b>100</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Klauenpolprinzip – Aufbau des Rotors</b>	<b>102</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Stator des Hybrid-Schrittmotors</b>	<b>104</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Einfluß der Strangzahl</b>	<b>106</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Magnetisches Modell</b>	<b>107</b>
<b>4.3</b>	<b>Eigenschaften von 2-Phasen- und 5-Phasen-Schrittmotoren</b>	<b>109</b>

4.3.1	Anzahl der Schrittpositionen	109
4.3.2	Haltemoment – Zeigerdarstellung	111
4.3.3	Vergleich der Haltemomente	112
4.3.4	Rastmoment	114
4.3.5	Schrittmotor als schwingungsfähiges System	118
4.3.5.1	Parametererregte Pendelungen	119
4.3.5.2	Selbsterregte Pendelungen	125
4.4	Kennlinien und Kenngrößen	129
4.4.1	Darstellung der Betriebskennlinien	129
4.4.2	Lastwinkel/Schleppfehler	132
4.4.3	Verhältnis von Geschwindigkeit zu Auflösung	135
	Liste der verwendeten Formelzeichen und Symbole	136
<b>5</b>	<b>Leistungselektronik und Signalverarbeitung</b>	<b>138</b>
	<b>Ralf Gfrörer</b>	
5.1	Einleitung	138
5.2	Betrieb von Schrittmotoren	138
5.2.1	Elektrisches Ersatzschaltbild	138
5.2.2	Aufbau des Stromes	139
5.2.3	Betriebsarten von Schrittmotoren	141
5.2.4	Ansteuerschaltungen	143
5.2.5	Grundschaltungen von Fünfphasen-Schrittmotoren	145
5.2.6	Mikroschrittbetrieb	149
5.3	Komponenten des Schrittmotorantriebs	154
5.3.1	Leistungsansteuerung	154
5.3.2	Schaltungsbispiel	159
5.3.3	Pulserzeugung	159
5.4	Schrittmotor im geschlossenen Lageregelkreis	167
5.4.1	Motivation	167
5.4.2	Erfassung der Rotorlage	168
5.4.3	„Drehüberwachung“	171
5.4.4	Stellgrößen zur Beeinflussung des Drehmoments	173
5.4.5	Schrittmotor im geregelten Betrieb	174
	Liste der verwendeten Formelzeichen und Symbole	178
<b>6</b>	<b>Untersuchung der Bewegungsvorgänge von Schrittmotoren in der Phasenebene</b>	<b>180</b>
	<b>Erich Rummich</b>	
6.1	Nichtlineare Bewegungsgleichung	180
6.2	Bewegungsvorgänge in der Phasenebene	182

6.3	Phasenporträt des nichtlinearen Schwingers	186
6.4	Einzelschritt-Fortschaltung	191
6.5	Bewegungsvorgänge bei Schrittsequenzen	192
6.6	Stabilitätsgrenze bei Schrittsequenzen	195
6.7	Resonanzzonen im Stationärbetrieb	197
<b>7</b>	<b>Auslegung von Schrittmotorantrieben</b>	<b>205</b>
	<b>Ralf Gfrörer</b>	
7.1	Einleitung	205
7.2	Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Motorauswahl	205
7.2.1	Abschätzung des Antriebs	205
7.2.2	Umrechnung der Lastdaten	206
7.2.3	Ermittlung der Start/Stop-Frequenz	207
7.2.4	Wahl der Fahrgeschwindigkeit bei linearer Rampe	208
7.2.5	Getriebe	213
7.3	Optimierung des Antriebs	218
7.3.1	Rampen für hohe Fahrgeschwindigkeit	218
7.3.2	Optimierung der Schrittfolge für kurze Wege	218
7.3.3	Einfluß von Strom, Spannung und Wicklung auf das Betriebsverhalten	222
7.3.4	Einfluß der Schaltungsart	226
7.3.5	Erwärmung von Schrittmotoren	229
7.4	Praktische Hinweise	231
7.4.1	Temperaturmessung bei der Inbetriebnahme	231
7.4.2	Ankupplung von Schrittmotoren	231
7.4.3	Lebensdauer	235
<b>8</b>	<b>Messung und Optimierung von Schrittmotoren</b>	<b>239</b>
	<b>Hermann Ebert</b>	
8.1	Einleitung	239
8.2	Statische Momente am Schrittmotor	243
8.2.1	Selbstthaltemoment $M_S$	244
8.2.2	Haltemoment $M_H$	246
8.2.3	Statischer Lastwinkel $\beta$	249
8.3	Dynamische Momente am Schrittmotor	252
	Betriebsgrenzmoment $M_{Bm}$	
8.4	Einzelschrittverhalten (Single step response)	256
8.5	Schrittwinkeltoleranzen	257

<b>8.6</b>	<b>Dynamischer Lastwinkel</b>	<b>268</b>
<b>8.7</b>	<b>Optimierung von Schrittprogrammen</b>	<b>277</b>
 <b>Literaturverzeichnis</b>		<b>288</b>
 <b>Sachregister</b>		<b>290</b>
 <b>Autorenverzeichnis</b>		<b>292</b>