

# Inhaltsverzeichnis

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| Vorwort..... | 5  |           |
| <b>1</b>     | <b>Einleitung.....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2</b>     | <b>Projektieren von Antrieben.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.1          | Auswahl des passenden Antriebs für die Anwendung.....  | 17        |
| 2.2          | Bestimmung der optimalen Baugröße des gewählten Motortyps.....                               | 17        |
| 2.3          | Motorschutz.....   | 19        |
| <b>3</b>     | <b>Antriebselektronik.....</b>   | <b>21</b> |
| 3.1          | Endstufe.....  | 21        |
| 3.2          | Modulationsverfahren.....  | 22        |
| 3.2.1        | Unterschwingungsverfahren.....   | 22        |
| 3.2.2        | Raumzeigermodulation.....  | 24        |
| 3.3          | Verluste in der Leistungselektronik.....   | 28        |
| 3.3.1        | Verluste beim Einsatz von Frequenzumrichtern und Installationshinweise für den Anwender..... | 32        |
| 3.3.2        | Quantifizierung der Schaltverluste in Frequenzumrichtern.....                                | 34        |
| <b>4</b>     | <b>Regelung elektrischer Maschinen.....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1          | Regelung des Gleichstrommotors.....  | 42        |
| 4.2          | Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine.....  | 43        |
| 4.3          | Polradorientierte Regelung der Synchronmaschine.....   | 49        |
| <b>5</b>     | <b>Sensoren für die Antriebstechnik.....</b>   | <b>53</b> |
| 5.1          | Drehzahlmessung.....   | 53        |
| 5.2          | Positionsmessungen.....  | 53        |
| 5.2.1        | Aufbau inkrementaler Positionsgeber mit impulsförmigem Ausgang.....                          | 54        |
| 5.2.1.1      | Rechtslauf-/Linkslauf-Erkennung bei Einfachauswertung.....                                   | 56        |
| 5.2.1.2      | Vierfachauswertung der Geberausgangssignale.....   | 57        |
| 5.2.1.3      | Rechtslauf-/Linkslauf-Erkennung bei Vierfachauswertung.....                                  | 57        |
| 5.2.2        | Aufbau inkrementaler Positionsgeber mit sin/cos-Ausgang.....                                 | 60        |
| 5.2.2.1      | Auswertung über die arctan-Funktion.....   | 60        |
| 5.2.3        | Resolver.....  | 62        |
| 5.2.3.1      | Auswertung über die arctan-Funktion.....   | 64        |
| 5.2.3.2      | Auswertung über einen geschlossenen Regelkreis.....  | 64        |
| 5.2.4        | Absolutwertgeber.....  | 66        |
| 5.3          | Vergleich von Positionsgebern.....   | 69        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>6</b>  | <b>Motoren</b> .....  | <b>71</b>  |
| 6.1       | Asynchronmotor .....  | 71         |
| 6.1.1     | DS-Normmotor .....  | 73         |
| 6.1.1.1   | Betrieb eines DS-Normmotor mit Feldschwächung .....   | 79         |
| 6.1.2     | Servo-Asynchronmotor .....  | 81         |
| 6.2       | Synchronmotoren .....   | 82         |
| 6.2.1     | Synchronmotoren mit Dämpferkäfig .....  | 84         |
| 6.2.2     | Servo-Synchronmotoren .....   | 85         |
| 6.2.3     | Kenngrößenvergleich zwischen Servo-Asynchronmotor<br>und Servo-Synchronmotor .....                              | 87         |
| 6.3       | Torquemotoren .....   | 88         |
| 6.4       | Linearmotoren .....   | 89         |
| <b>7</b>  | <b>Getriebe</b> .....   | <b>91</b>  |
| 7.1       | Kraftschlüssige Getriebe .....  | 91         |
| 7.2       | Formschlüssige Getriebe .....   | 92         |
| 7.2.1     | Ketten- und Zahnriementriebe .....  | 92         |
| 7.2.2     | Zahnradgetriebe .....   | 92         |
| 7.2.2.1   | Einstufiges Stirnradgetriebe .....  | 92         |
| 7.2.2.2   | Zweistufiges Stirnradgetriebe .....   | 93         |
| 7.2.2.3   | Winkelgetriebe .....  | 94         |
| 7.2.2.4   | Schneckengetriebe .....   | 94         |
| 7.2.2.5   | Planetengetriebe .....  | 95         |
| 7.2.2.5.1 | Auswahlkriterien von Planetengetrieben .....  | 96         |
| 7.3       | Auswahlkriterien von Getriebemotoren .....  | 98         |
| <b>8</b>  | <b>Kriterien für die Zusammenschaltung von Antriebsregler, Motor,<br/>Geber und Getriebe</b> .....              | <b>101</b> |
| 8.1       | Geregelte Mehrachsantriebe .....  | 103        |
| 8.1.1     | Master-Slave-System .....   | 103        |
| 8.1.2     | Vorgabe von vorausberechneten Bahnkurven für alle Achsen .....  | 105        |
| <b>9</b>  | <b>Grundlagen der Kinematik</b> .....   | <b>107</b> |
| 9.1       | $v,t$ -Diagramme .....  | 108        |
| 9.1.1     | $v,t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit<br>beim Beschleunigen und Abbremsen .....              | 108        |
| 9.1.2     | $v,t$ -Diagramm mit $\sin^2$ -förmigem Verlauf der Geschwindigkeit<br>beim Beschleunigen und beim Bremsen ..... | 111        |
| 9.1.3     | $v,t$ -Diagramm mit linear/parabolischem Verlauf der Geschwindigkeit<br>beim Beschleunigen und Abbremsen .....  | 115        |
| 9.1.4     | Anwenderspezifische Forderungen an $v,t$ -Diagramme .....   | 119        |
| 9.1.4.1   | $v,t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit für zeitoptimales<br>Positionieren .....               | 119        |
| 9.1.4.2   | $v,t$ -Diagramm mit linear/parabolischem Verlauf der Geschwindigkeit<br>für zeitoptimales Positionieren .....   | 120        |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 9.1.4.3 | $v,t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit für einen Verlauf mit vorgegebenem Weg, vorgegebener Zeit und vorgegebener Beschleunigung und Verzögerung . . . . . | 123 |
| 9.2     | $s,v$ -Diagramm. . . . .   | 125 |
| 9.3     | Wahl der Beschleunigung und Verzögerung. . . . .   | 127 |
| 9.3.1   | Maximal zulässige Beschleunigung eines Förderbands mit einem unbefestigten Gegenstand . . . . .  | 127 |
| 9.3.2   | Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kippgrenze . . . . .  | 128 |
| 9.3.3   | Einfluss der Beschleunigung auf die Flüssigkeitshöhe in einem Gefäß . . . . .  | 129 |
| 9.3.4   | Ausschlag der Last an einem Kran bei Beschleunigung . . . . .  | 131 |
| 9.3.5   | Beziehung zwischen Maximalbeschleunigung und Vortriebskraft. . . . .   | 132 |
| 10      | <b>Grundlagen der Kinetik</b> . . . . .  | 135 |
| 10.1    | Ableitung des reduzierten Massenträgheitsmoments. . . . .  | 137 |
| 10.2    | Antriebsmoment und Antriebsleistung. . . . .   | 138 |
| 10.3    | Effektive Drehmomente von Motoren. . . . .   | 140 |
| 10.3.1  | Effektives Drehmoment von eigenbelüfteten Drehstromnormmotoren. . . . .  | 141 |
| 11      | <b>Definition von Massenträgheitsmomenten</b> . . . . .  | 143 |
| 11.1    | Massenträgheitsmoment einer Einzelmasse . . . . .  | 144 |
| 11.2    | Massenträgheitsmoment eines dünnwandigen Hohlzylinders. . . . .  | 145 |
| 11.3    | Massenträgheitsmoment eines Zylinders mit Vollkreisquerschnitt . . . . .   | 146 |
| 11.4    | Massenträgheitsmoment eines dickwandigen Hohlzylinders. . . . .  | 147 |
| 11.5    | Massenträgheitsmomente von dünnen, langen Stäben . . . . .   | 148 |
| 11.5.1  | Drehpunkt im Schwerpunkt. . . . .  | 148 |
| 11.5.2  | Drehpunkt am Stabende. . . . .   | 149 |
| 11.6    | Massenträgheitsmoment einer Rechteckscheibe mit dem Drehpunkt im Schwerpunkt . . . . .   | 150 |
| 11.7    | Massenträgheitsmoment einer massiven Kugel mit der Drehachse durch den Schwerpunkt . . . . .   | 151 |
| 11.8    | Massenträgheitsmoment einer dünnwandigen Kugelschale mit der Drehachse durch den Schwerpunkt . . . . .   | 152 |
| 11.9    | Steiner'scher Satz . . . . .   | 153 |
| 12      | <b>Berechnungsbeispiele für Massenträgheitsmomente von technisch häufig verwendeten Rotationskörpern</b> . . . . .   | 155 |
| 12.1    | Lauftrad aus Vollmaterial. . . . .   | 155 |
| 12.2    | Lauftrad mit minimalem Gewicht . . . . .   | 157 |
| 13      | <b>Reibung</b> . . . . .   | 159 |
| 13.1    | Coulomb'sche oder trockene Reibung. . . . .  | 159 |
| 13.2    | Rollreibung. . . . .   | 161 |
| 13.3    | Reibung in Gewindespindeln. . . . .  | 164 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 14       | <b>Auslegung der Antriebe</b> .....   | 167 |
| 14.1     | Fahrtrieb .....   | 167 |
| 14.1.1   | Fahrtriebsauslegung über Momentengleichgewicht .....  | 176 |
| 14.1.1.1 | Beschleunigungsvorgang beim Lastheben .....   | 177 |
| 14.1.1.2 | Verzögerungsvorgang beim Lastheben .....  | 179 |
| 14.1.1.3 | Lastheben mit konstanter Geschwindigkeit .....  | 180 |
| 14.1.1.4 | Beschleunigungsvorgang beim Lastsenken .....  | 181 |
| 14.1.1.5 | Verzögerungsvorgang beim Lastsenken .....   | 182 |
| 14.1.1.6 | Lastsenken mit konstanter Geschwindigkeit .....   | 183 |
| 14.2     | Spindelantrieb .....  | 184 |
| 14.3     | Drehtischtrieb .....  | 193 |
| 14.4     | Kurbeltrieb .....   | 202 |
| 14.5     | Wickelantrieb .....   | 207 |
| 14.6     | Antriebe in der Verfahrenstechnik und Umwelttechnik .....   | 215 |
| 15       | <b>Wahl von Motor, Zwischenkreiskondensator und Bremswiderstand</b> .....                                     | 217 |
| 15.1     | Rechenschema zur manuellen Berechnung von Antrieben .....   | 218 |
| 15.2     | Demoprogramm zur Motorauswahl .....   | 222 |
| 15.2.1   | Programmbeschreibung .....  | 222 |
| 15.3     | Auslegung einer Kondensatorbatterie .....   | 226 |
| 15.4     | Auslegung eines Bremswiderstands .....  | 227 |
|          | <b>Anhang</b> .....   | 231 |
| 1        | <b>Gleichungen</b> .....  | 231 |
| 1.1      | Physikalische Grundgleichungen .....  | 231 |
| 1.1.1    | Wichtige Definitionen, Umrechnungen und Konstanten .....  | 232 |
| 1.2      | Allgemeine Gleichungen für die Berechnung der Antriebsleistung .....  | 232 |
| 1.3      | Allgemeine Gleichungen zur Berechnung von Antriebsmomenten .....  | 233 |
| 1.4      | Arbeit .....  | 233 |
| 1.5      | Antriebsleistung für Metallbearbeitungsmaschinen .....  | 235 |
| 1.5.1    | Spezifische Schnittkräfte verschiedener Metalle .....   | 236 |
| 1.6      | Antriebsleistung in der Verfahrenstechnik .....   | 238 |
| 1.7      | Reibung .....   | 239 |
| 1.8      | Effektives Moment .....   | 240 |
| 1.9      | Massenträgheitsmomente von Körpern .....  | 241 |
| 1.10     | Trägheitsmomente von Anwendungen .....  | 242 |
| 2        | <b><math>v, t</math>-Diagramme</b> .....  | 246 |
| 2.1      | $v, t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit<br>beim Beschleunigen und Verzögern .....           | 246 |
| 2.2      | $v, t$ -Diagramm für minimales Moment .....   | 247 |
| 2.3      | $v, t$ -Diagramm mit $\sin^2$ -förmigem Verlauf der Geschwindigkeit<br>beim Beschleunigen und Verzögern ..... | 247 |

---

|                                   |  |            |
|-----------------------------------|--|------------|
| <b>3</b>                          | <b>Wirkungsgrade, Reibwerte und Dichte</b> .....                                     | <b>248</b> |
| 3.1                               | Wirkungsgrade von Übertragungselementen .....  | 248        |
| 3.2                               | Reibwerte .....  | 248        |
| 3.2.1                             | Reibwerte für Lagerreibung .....   | 248        |
| 3.2.2                             | Reibwerte für Spindeln .....   | 248        |
| 3.2.3                             | Beiwerte für Spurkranz- und Seitenreibung .....                                      | 249        |
| 3.2.4                             | Reibwerte verschiedener Werkstoffpaarungen .....                                     | 249        |
| 3.2.5                             | Hebelarm der Rollreibung für verschiedene Werkstoffpaarungen .....                   | 249        |
| 3.3                               | Dichte $\rho$ verschiedener Stoffe .....   | 250        |
| 3.4                               | Querkräfte .....   | 250        |
| <br>                              |  |            |
| <b>4</b>                          | <b>Motorlisten</b> .....   | <b>251</b> |
| 4.1                               | Asynchondrehstrommotor für Netzbetrieb .....   | 252        |
| 4.1.1                             | Vierpolige IE2-Drehstrommotoren MH, 50 Hz<br>Bemessungsdaten 0,75 kW ... 45 kW ..... | 252        |
| 4.2                               | Asynchondrehstrommotor für Inverterbetrieb .....                                     | 254        |
| 4.2.1                             | Vierpolige IE1-Drehstrommotoren MD, 50 Hz<br>Bemessungsdaten 0,12 kW ... 22 kW ..... | 254        |
| 4.3                               | Servo-Asynchronmotor – Bemessungsdaten .....   | 257        |
| 4.3.1                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....                                   | 257        |
| 4.3.2                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet, IP54 .....                              | 259        |
| 4.3.3                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet, IP23s .....                             | 262        |
| 4.3.4                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....                                   | 264        |
| 4.3.5                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet .....                                    | 270        |
| 4.4                               | Servo-Synchronmotor – Bemessungsdaten .....  | 274        |
| 4.4.1                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....                                   | 274        |
| 4.4.2                             | Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet .....                                    | 280        |
| <br>                              |  |            |
| <b>Literatur</b> .....            |  | <b>285</b> |
| <br>                              |  |            |
| <b>Stichwortverzeichnis</b> ..... |  | <b>287</b> |