

Dipl.-Ing. Eberhard Holl, Vaihingen/Enz

**Mathematische Modellierung
von Kraftfahrzeug-
Servoantrieben zum Zweck der
Entwurfsoptimierung**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **246**

Gliederung

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	IX
1. Einleitung.....	1
1.1. Umfeld und Anwendungsbeispiele	1
1.2. Bekannte Auslegungsverfahren für Servomotoren.....	2
1.3. Motortypen.....	3
1.4. Vorgehensweise	4
2. Berechnung und Betriebsverhalten kleiner Gleichstrommotoren	6
2.1. Ankerbewicklung und Motorkonstante.....	7
2.2. Erregung.....	9
2.2.1. Permanentmagnetmaterialien.....	9
2.2.2. Berechnung des magnetischen Kreises	11
2.2.3. Das Ankerquerfeld	12
2.3. Betriebskennlinien des permanenterregten Gleichstrommotors	15
2.4. Werte und Auswirkungen der Auslegungsgrößen	17
2.4.1. Überblick über die Parameter	17
2.4.2. Blechschnitt und Bewicklung	19
2.4.3. Die Auswirkungen der Luftspaltinduktion auf die Betriebsgrößen.....	20
2.4.3.1. Abhängigkeit des Nutzfaktors von der Luftspaltinduktion	20
2.4.3.2. Einfluß der Luftspaltinduktion auf die Nennleistung	21
2.4.3.3. Einfluß der Luftspaltinduktion auf die Anlaufzeitkonstante	22
2.5. Abgeleitete Kenngrößen des Motors.....	23
2.5.1. Elektrische Kenngrößen.....	23
2.5.2. Ankermasse und Ankerträgheitsmoment.....	24
2.5.3. Berechnung der Motormasse	26
2.5.3.1. Magnetmasse	26
2.5.3.2. Polrohrmasse.....	28
2.5.3.3. Lagerschildmasse.....	29
2.5.3.4. Gesamte Motormasse.....	29
2.5.4. Dynamische Kenngrößen.....	30
2.5.4.1. Die Anlaufzeitkonstante	31
2.5.4.2. Die maximale Leerlaufbeschleunigung	32
2.5.4.3. Das dynamische Leistungsvermögen (power rate).....	33
2.5.5. Drehschub	33
2.5.5.1. Zulässiger Drehschub im Nennbetriebspunkt.....	35
2.5.5.2. Maximaler Drehschub im Kurzschlußfall.....	37
2.6. Die verlustbehaftete Maschine.....	38
2.6.1. Der Kommutierungsvorgang	39
2.6.1.1. Differentialgleichung der Kommutierung	39
2.6.1.2. Verketteter Fluß in der kommutierenden Wicklung	41

2.6.1.3. Bürstenfeuer an der ablaufenden Bürstenkante	44
2.6.1.4. Verlustleistung in der Wicklung während der Kommutierung.....	47
2.6.2. Drehzahlabhängige Verluste.....	51
2.6.2.1. Luftreibung	51
2.6.2.2. Lagerreibung.....	53
2.6.2.3. Ummagnetisierungsverluste	55
2.6.2.3.1. Hystereseverluste.....	55
2.6.2.3.2. Wirbelstromverluste	57
2.6.2.4. Kommutatorreibung.....	61
2.6.2.5. Bremsmoment der kurzgeschlossenen Spulen.....	63
2.6.2.6. Gesamtes Verlustmoment.....	64
2.6.3. Stromabhängige Verluste.....	65
2.6.3.1. Bürstenspannung	65
2.6.3.2. Stromwärmeverluste	66
2.6.4. Das Verhalten der verlustbehafteten Maschine	67
2.6.4.1. Betriebskennlinien	67
2.6.4.2. Abhängigkeiten der Verlustmomente	70
2.6.4.3. Die Anlaufzeitkonstante des verlustbehafteten Motors.....	71
3. Modellierung von Getrieben	72
3.1. Rädergetriebe	72
3.1.1. Grundsätzliche Überlegungen.....	72
3.1.2. Typische Kennwerte von Stirnradgetrieben	77
3.1.2.1. Getriebestufenzahl	77
3.1.2.2. Wirkungsgrad	77
3.1.2.3. Bestimmung der Getriebemasse	78
3.1.3. Übersicht über Stirnrad- Planeten- und Schneckengetriebe	81
3.2. Spindelgetriebe	82
4. Thermisches Modell des geschlossenen unbelüfteten Gleichstrommotors	84
4.1. Grundlagen.....	84
4.2. Wahl des thermischen Modells.....	87
4.3. Temperaturmessungen	88
4.4. Bestimmung der Parameter des Wärmequellennetzes	90
4.4.1. Wärmeleitwert Wicklung - Eisen	92
4.4.2. Wärmeleitwert Eisen - Gehäuse	93
4.4.3. Wärmeleitwert Wicklung - Gehäuse.....	95
4.4.4. Wärmeleitwert Gehäuse - Umgebung.....	96
4.4.5. Wärmekapazitäten	97
4.5. Eigenschaften des thermischen Modells.....	97
5. Die Auslegung des Systems Motor - Getriebe	100
5.1. Erfüllung der Stellaufgabe für verschiedene Lastfälle.....	100
5.1.1. Konstantes Lastmoment.....	101

5.1.1.1. Idealer Motor	101
5.1.1.1.1. Umrechnung der Last auf den Motor.....	101
5.1.1.1.2. Einführung des Belastungsfaktors	102
5.1.1.2. Realer Motor	105
5.1.1.2.1. Ankerdurchmesser	105
5.1.1.2.2. Aktuatormasse	108
5.1.1.2.3. Getriebemasse.....	110
5.1.1.2.4. Wirkungsgrad	111
5.1.2. Wegproportionale Last.....	112
5.1.3. Beschleunigung einer Trägheitsmasse.....	116
5.2. Beschränkungen des Parameterraums.....	118
5.2.1. Thermische Grenzen	118
5.2.1.1. Mittlere Verlustleistungsdichte auf der Ankermantelfläche.....	119
5.2.1.1.1. Erwärmung durch stationäre Betriebszustände.....	119
5.2.1.1.2. Erwärmung durch Hochlauf- und Bremsvorgänge.....	120
5.2.1.2. Adiabatische Temperaturerhöhung.....	122
5.2.1.3. Thermisches Verhalten bei vorgegebenem Belastungskollektiv	123
5.2.1.3.1. Ermittlung des Simulationsmodells.....	123
5.2.1.3.1.1. Elektromechanisches Teilmodell.....	124
5.2.1.3.1.2. Thermisches Teilmodell	125
5.2.1.3.1.3. Durchführung der Simulation.....	126
5.2.1.3.2. Übertemperaturen für verschiedene Lastanforderungen.....	127
5.2.2. Begrenzung der Kurzschlußleistung	130
5.2.3. Maximale Entmagnetisierungsfeldstärke der Permanentmagnete	131
5.2.4. Maximale Zentripetalbeschleunigung.....	132
5.2.5. Begrenzung durch Getriebeübersetzung	133
6. Numerische Optimierung.....	134
6.1. Mathematische Grundlagen	134
6.2. Verfahren zur Lösung unrestringierter Optimierungsaufgaben	135
6.3. Behandlung der Nebenbedingungen	137
6.3.1. Verwendung von Straftermen.....	137
6.3.2. Erweiterte Lagrange-Funktion	138
6.3.3. Beispiel zur Auswirkung der Strafterme.....	139
6.3.4. Sequentielle quadratische Programmierung	140
6.4. Beispielhafte Optimierung eines Gleichstrommotors.....	142
6.5. Startwertvorgabe	144
7. Elektromotorisch zugespante Bremszange.....	147
7.1. Aufgabenstellung	148
7.2. Bremszangenkennlinie.....	149
7.3. Bordnetz.....	150
7.4. Sättigungserscheinungen in den Ankerzähnen	150

7.5. Bestimmung der Getriebeübersetzung.....	151
7.6. Simulation des Zuspännvorgangs	152
7.7. Bestimmung der maximal auftretenden Wicklungstemperatur	154
7.7.1. Belastungskollektiv des Bremsenstellers.....	154
7.7.2. Simulation der Wicklungserwärmung	157
7.8. Topologie der Optimierungsaufgabe	159
8. Zusammenfassung	163
9. Anhang: Literatur.....	165