



**Dimensionierung und Optimierung feinwerktechnischer
Lineardirektantriebe unter Beachtung parasitärer Effekte am Beispiel
von Flach- und Tauchspulantrieben**

**von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Dannemann
geboren am 8. November 1977 in Magdeburg

Hauptberichter:
Mitberichter:
Tag der mündlichen Prüfung:

Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe
Prof. Dr. rer. nat. H. Kück
24. April 2008

Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
der Universität Stuttgart

2008

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Symbol- und Abkürzungsverzeichnis | 1 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Motivation | 7 |
| 1.2 Zielsetzung | 9 |
| 2 Stand der Technik | 11 |
| 2.1 Wirkprinzipien von Linearmotoren | 11 |
| 2.2 Bauformen und deren Eingrenzung für die Arbeit | 12 |
| 2.2.1 Flachspulmotor mit homopolarem Aufbau | 14 |
| 2.2.2 Flachspulmotor mit heteropolarem Aufbau | 15 |
| 2.2.3 Tauchspulmotor | 17 |
| 2.3 Grundlagen | 18 |
| 2.3.1 Maxwellsche Gleichungen | 19 |
| 2.3.2 Füllfaktoren | 21 |
| 2.3.3 Hysterese | 22 |
| 2.3.4 Elementarstromtheorie | 23 |
| 2.3.5 Analogie zwischen elektrischen und thermischen Energien | 25 |
| 2.4 Konventionelle Vorgehensweise bei der Motordimensionierung . | 28 |
| 2.5 Vorschlag einer Erweiterung | 29 |
| 3 Feldorientierte Ansätze zur Dimensionierung unter Einbeziehung der Verlustleistung | 31 |
| 3.1 Analytische Betrachtung der Maxwellschen Gleichungen | 31 |
| 3.1.1 Bewegungsinduktion und Satz von Pointing | 31 |
| 3.1.1.1 Bewegungsinduktion | 31 |
| 3.1.1.2 Satz von Pointing | 32 |
| 3.1.2 Analyse des Sachverhalts Kraft im Feld | 33 |
| 3.1.3 Darstellung der Verlustleistung des Motors | 34 |
| 3.1.4 Integration der Leistung in die Dimensionierung | 35 |
| 3.1.5 Verknüpfung der Feld- und mechanischen Größen bei konstanter Spannung | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.6 | Beachtung unterschiedlicher Volumina | 42 |
| 3.1.7 | Verlustleistungen in füllfaktorbehafteten Volumina | 43 |
| 3.1.8 | Zusammenhang zwischen Leistung, Kraft und Füllfaktor | 45 |
| 3.1.9 | Zusammenfassung der Kraftgleichungen | 46 |
| 3.2 | Bauraumabschätzungen und Volumenermittlung | 46 |
| 3.3 | Beispielrechnung zur Bestimmung optimaler Wickelfenster | 48 |
| 3.3.1 | Vorausberechnung | 48 |
| 3.3.2 | Ermittlung des optimalen Spulenfensters | 51 |
| 3.4 | Einfluss der Betriebsarten | 53 |
| 3.4.1 | Überblick über die Betriebsarten | 53 |
| 3.4.2 | Kurzfristige Stromüberhöhungen zur Kraftsteigerung in Kurzzeit- und Aussetzbetrieb | 54 |
| 4 | Parasitäre Effekte bei der statischen und quasistatischen Dimensio- nierung | 58 |
| 4.1 | Wechselwirkung zwischen Spulen- und Dauermagnetfeldern | 58 |
| 4.1.1 | Einfluss beim einsträngigen Flachspulmotor | 58 |
| 4.1.2 | Einfluss bei Tauchspulen | 63 |
| 4.2 | Kommutierungsbedingte parasitäre Effekte - Störkraftbedingte Ge- räusche | 75 |
| 4.2.1 | Betrachtung beispielhafter Kommutierungsarten | 76 |
| 4.2.1.1 | Pulsweitenmodulation als Verfahren zur Erzeu- gung variabler Ströme in Spulen | 76 |
| 4.2.1.2 | Blockkommutierung | 78 |
| 4.2.1.3 | Sinuskommutierung | 79 |
| 4.2.2 | Querkräfte bei Blockkommutierung | 81 |
| 4.2.2.1 | Einseitige Magnetanordnung | 81 |
| 4.2.2.2 | Zweiseitige Magnetanordnung | 85 |
| 4.2.3 | Querkräfte bei Sinuskommutierung | 90 |
| 4.3 | Erzeugung innerer Kräfte im Rückschluss durch die Bestromung | 91 |
| 4.3.1 | Störkräfte bei Blockkommutierung | 94 |
| 4.3.2 | Störkräfte bei Sinuskommutierung | 95 |
| 4.3.3 | Folgen der Kräfte für die Verformung | 97 |
| 4.3.4 | Nachweis der auftretenden Kräfte anhand von Messungen | 98 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3.5 | Zusammenfassung | 101 |
| 5 | Parasitäre dynamische Effekte im Überlastbetrieb | 103 |
| 5.1 | Hystereseverluste / Ummagnetisierungsverluste | 104 |
| 5.2 | Wirbelströme | 109 |
| 5.3 | Quantifizierung der Verluste durch Ummagnetisierungen und Wir- belströme | 112 |
| 5.3.1 | Spuleneinfluss | 112 |
| 5.3.2 | Einfluss bewegter Magnete | 119 |
| 5.3.3 | Zusammenfassung | 123 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 124 |
| | Literaturverzeichnis | 127 |
| A | Anhang | 133 |
| A.1 | Differentialoperatoren der Vektoranalysis | 133 |
| A.2 | Integralsätze von Stokes und Gauß | 135 |
| A.3 | Totales Differential | 136 |
| A.4 | Umsetzung der Maxwell'schen Gleichungen in der 2D-FEM für die Magnetostatik | 137 |
| A.5 | Berechnung der Verlustleistung in einem sinuskommutierten Spu- lensystem | 139 |
| A.5.1 | Einheitswurzel | 139 |
| A.5.2 | Geradzahlige Strangzahl | 141 |
| A.5.3 | Ungeradzahlige Strangzahl | 142 |
| A.6 | Materialparameter für die Simulationen | 144 |
| B | Ausgewählte Daten verwendeter Motoren | 146 |
| B.1 | Tauchspulmotor in Zylinderbauweise mit diametralen Dauerma- gneten, Tab. ?? | 146 |
| B.2 | Zweistrangiger Flachspulantrieb im U-Profil, Tab. ?? | 148 |