

Vorwort

Fahr-, Lenk- und Positioniermotore für Kleinfahrzeuge wie z B Golfcarts, Messe-, Lager- und Freizeitfahrzeuge, Kabinenroller, Flurförderzeuge und Elektro-Rollstühle sind häufig Permanentmagnet-Motore (PMM). Hier werden hauptsächlich 2polige Gleichstrom-PMM bis 1kW mit radial magnetisierten Segmenten, Schleifenwicklung und Kommutator ins Auge gefaßt.

Im Gegensatz zu stationären Antrieben und den vom Elektromaschinenkonstrukteur für diese bei Berechnungen gemachten Annahmen bringt die **Anwendung im mobilen Einsatz** die Belastung der Motore in verschiedensten, häufig wechselnden Betriebszuständen mit sich.

Je nach Situation des momentanen Einsatzes entstehen besonders für einen Fahrmotor vielfältige Anforderungen, wenn in der Ebene, bergauf, bergab, auf unterschiedlichem Untergrund, Hindernis überwindend, schnell oder langsam, vorwärts oder rückwärts gefahren wird und dies je nach Zuladung mit wechselnden Achslasten bei ggf krassesten Umgebungsbedingungen und Energiequellenzuständen.

Zur realistischen Beurteilung der jeweils auftretenden Verhältnisse ist die Berücksichtigung der dabei geltenden Beziehungen unerlässlich.

Im **Entwicklungsbereich** sind ständig gebührende Kriterien für Messungen und zielgerichtete Versuche zu finden und Ergebnisse zu diskutieren.

Für die **Qualitäts- und Fertigungskontrolle** im Betrieb sowie Produkttests durch Institute sind Prüfmethode festzulegen und ggf Motorprüfstände auszuarbeiten.

Es gibt reichlich **Literatur** über elektrische Maschinen. Für PMM gilt dies eingeschränkt. Abhandlungen, die auf Fragen zum Einsatz von PMM **aus der Sicht des Anwenders** - den Abteilungen Entwicklung und Konstruktion eines Fahrzeugherstellers - grundlegend und umfassend eingehen, sind mir nicht bekannt.

Dies veranlaßte mich, bisher im Zusammenhang mit Motor-Analysen angestellte Überlegungen weiter zu verfolgen, auszuarbeiten und schriftlich festzuhalten, um eine nützliche Arbeitsunterlage zu haben und zur Verfügung zu stellen. Das vorliegende Ergebnis faßt neben Bewährtem und Bekanntem m E neue, durchaus interessante, hier erstveröffentlichte Aspekte zusammen.

Aus der Natur des Themas konnte auf mathematische Abhandlungen nicht verzichtet werden. Für das Verständnis werden lediglich allgemein bekannte physikalische und mathematische Grundkenntnisse vorausgesetzt.

Der Stoff wird Abschnitt für Abschnitt aufeinander aufbauend behandelt. Beispiellösungen erfolgen stets mit rückblickend aufgezeigten Beziehungen. Das vorliegende Buch eignet sich daher zum Selbststudium.

Die komplette Auflistung der verwendeten Formelzeichen und das umfangreiche Sachwörterverzeichnis ermöglichen die Verwendung als Nachschlagewerk.

Ziel des Buches ist, den in der Industrie und an Prüfinstituten in den Abteilungen Entwicklung, Versuch, Konstruktion, Qualitätskontrolle und -sicherung sowie Normung tätigen Ingenieuren ein umfassendes, aber trotzdem kompaktes **Arbeitsmittel** zu bieten.

Es soll dem **Anwendungsingenieur** eine Hilfe sein, wenn er vor Fragen zur Ermittlung elektrischer und mechanischer Kenn- und Betriebswerte sowie der Beurteilung der Verwendbarkeit eines Antriebs für „seinen“ Einsatzfall steht.

Aber auch der **Motorentwickler und -konstrukteur** beim Hersteller setzt sich durch diese Arbeitsunterlage leichter mit Fragen auseinander, die nicht nur den Anwender bewegen (sollten).

Diese Schrift ist durch ihre konkreten Fallbeispiele für den Anwender eine praktische Hilfe in seinem Arbeitsalltag. Sie ist durch viele beigeordnete Zusätze in sich schlüssig und direkt anwendbar und läßt den Leser nicht auf halbem Wege stehen. Dort, wo auf theoretische Auseinandersetzung jeweils behandelte Themen nicht verzichtet wird, soll dies Hintergründe beleuchten bzw Herleitungen verständlich machen. Wer will, überspringt solche Passagen und wendet die Resultate trotzdem an.

Es war mir ein Anliegen, meine Überlegungen realitätsbezogen und nachvollziehbar niederzuschreiben. Auch ein „quereinsteigender“ Anwender sollte sich mittels des vorliegenden Arbeitsmittels in das Thema PMM einarbeiten können.

Der Text wurde bewußt in konventioneller Rechtschreibung verfaßt. Autoreigene Nuancen mögen dabei nicht irritieren.

Kiel, im Februar 2004

hans wm KÖRBER

Einleitung

Den **Anwender** eines Permanentmagnet-Motors interessieren nicht so sehr Einzelheiten von Dimensionierungsvorschriften und zur Werkstoffauswahl, die bei der Konstruktion eines Motors zu beachten sind, um diesem gewünschte Eigenschaften zu verleihen.

Der Anwender sieht eher das meßtechnische Problem, das sich ihm bei der Erfassung von Kenndaten eines fertigen Motors sowie bei der **Beurteilung eines ins Auge gefaßten Typs** für seinen Anwendungsfall stellt.

Die Frage ist somit, was kann und sollte wie gemessen werden unter Berücksichtigung der wenigen Möglichkeiten, die ein Nichthersteller besitzt, und zu welchen brauchbaren Aussagen kommt er dadurch.

Aufgrund der relativ einfachen physikalischen Gesetze, wie sie für einen PMM gelten, läßt sich zeigen, daß nur **wenige leicht meßbare Größen** gefragt sind, um einen Motor bewerten zu können, weil weitere Werte wegen bestehender Beziehungen der Daten untereinander rechnerisch ermittelt werden können.

Dieses aufzuzeigen, ist Anliegen dieser Arbeit.

Abschnitt B spricht in kurzem Abriß **Grundlagen** an. **Abschnitt C** behandelt mathematische Zusammenhänge eines **Permanentmagnet-Motors ohne Getriebe** für verschiedene Betriebszustände, während **Abschnitt D** entsprechende Beziehungen für einen **Permanentmagnet-Motor mit Getriebe** darstellt.

Diese Schrift erhebt nicht den Anspruch einer wissenschaftlichen Veröffentlichung. Wegen der Übersichtlichkeit und zur praktischen Handhabbarkeit relevanter Gleichungen wird auf Beurteilung und Diskussion mancher Motor-Eigenschaft verzichtet. So bleibt es dem Anwender überlassen zu bewerten, ob es für den von ihm ins Auge gefaßten Motortyp sowie seinen Anwendungsfall bei der Begutachtung akzeptabel ist, etwa Massenträgheitsmomente, Ankerinduktivität, Wirbelstrom- und Ummagnetisierungs-(Hysterese-)Verluste sowie nichtlineares Verhalten (z B stromabhängiger Kohlebürsten-Widerstand, magnetische Sättigungserscheinungen, Ankerrückwirkung) zunächst zu ignorieren. (später → **Abschnitte E4...E7**)

Auf thermisches, elektrisches und mechanisches Zeitverhalten wird nicht eingegangen. Auch der Einfluß von Anbaugeräten (etwa Federdruckbremse, Lüftungspropeller, Kupplung, Tachogenerator, Drehzahl- und Stellungsgeber) auf Motordaten wird außer durch Getriebe nicht betrachtet. Ferner werden keine weiterführenden Themen wie z B Konstruktions- und Maschinenelemente, Festigkeitsverhalten, Kühlung, Schmierung, Qualität, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Kostenkalkulation u a des technischen Produktes behandelt.

Abschnitte C und D behandeln den eingeschwungenen Zustand, das statische und das Gleichstromverhalten nach Beharrungstemperatur-Erreichen eines Prüflings in konstanter Umgebung - im Zweifel bei RT 20 °C.

Abschnitt E befaßt sich mit (Ersatz-) **Meßverfahren** zur Ermittlung und Abschätzung von Motordaten sowie mit Fragen (un-)zulässiger **Vereinfachungen**.

Abschnitt F dieser Arbeitsunterlage greift Fragestellungen auf, die durch konkrete **Anwendungsfälle** den Bezug zur Praxis vertiefen - Fragestellungen, wie sie dem Verfasser in seiner beruflichen Tätigkeit begegneten, und bei deren Klärung ihm Meßwerte gefundene Berechnungswege bestätigten oder verbesserten.

Motor-Kenngrößen sind besonders von Temperatur, Strom und Betriebsspannung abhängig (→ **Abschnitt G7**). Letzteres erschließt vorteilhaft die Ermittlung mancher Daten auf indirektem Wege, nämlich durch Berechnung. Zur Abschätzung gefragter Betriebswerte sind wenige Größen zu ermitteln wie bspw Spannung, Strom und Drehzahl.

Dabei soll der Prüfling von einer **stabilisierten Spannungsquelle** versorgt werden - möglichst mit **Strombegrenzung**⁵. Akkumulatoren bieten den Vorteil, Strom auch **aufzunehmen**.

So mögen dem Leser auch die **nach jedem Unterabschnitt** durchgerechneten **Beispiele**² sowie **Abschnitt G** mit **Tabellen und Diagrammen** und die auf Diskette beigefügten **Berechnungsprogramme** (beschrieben in **Abschnitt H**) Anregung oder gar wahre Hilfe bei seiner beruflichen Tätigkeit sein. Über Resonanz des Lesers freut sich der Verfasser.

In **Gleichungen** sind Größen in ihren Grundeinheiten m, m², m³, Grad, s, kg, A, V, W einzusetzen. Alle Funktionen sind Größen- und nicht Zahlengleichungen.

Anmerkungen

1 Alle in diesem Arbeitsbuch in den *Abschnitten C und D gerahmten* Gleichungen stellen Zusammenhänge so dar, daß aus den relativ leicht ermittelbaren oder bereits bekannten Kennwerten **Betriebsspannung, Leerlaufstrom und -drehzahl sowie System- und Lastwiderstand** eine **Berechnung aller Kenn-, Nenn- und Betriebswerte eines Motors** möglich ist.

Mit den um **Leerlaufstrom, Getriebe-Übersetzung und -Wirkungsgrad** eines **Getriebemotors** erweiterten Angaben sind auch für diesen alle **Kenn-, Nenn- und Betriebswerte** - mit dem beigefügten Berechnungsprogramm im Nu - erchenbar.

Fehlt eine der obigen Größen und ist dafür eine andere bekannt, kann die Berechnung sicherlich mit einer der vielen weiteren aufgeführten Gleichungen durchgeführt werden. Gerade so sind die Beispiele gewählt.

2 Die **Ergebnisse der Beispiele** sind zur Nachvollziehbarkeit der Berechnung mit bis zu **sieben geltenden Ziffern** angegeben. Weil mit erhaltenen Rechenergebnissen häufig nächste und übernächste gewonnen werden, sollte bei manuellen Methoden eine **Rundung erst zum Abschluß aller Berechnungen** erfolgen (s a Gegenprobe beim *Beispiel 7*). Bei der üblichen Toleranz von Motordaten von bestenfalls $\pm 5\%$ reichen **dann** zwei, maximal drei geltende Ziffern.

Mit den **auf Diskette beigefügten Berechnungsprogrammen** umgeht man das Problem der Rundung. Durchgehend wird mit so viel geltenden Ziffern gerechnet, daß es belanglos ist, in welcher Reihenfolge Größen auseinander errechnet werden. Auch bei begrenzter Stellenanzeige werden Berechnungen mit unveränderter Auflösung durchgeführt. Es sichert die Genauigkeit ohne nennenswerte Fortpflanzungsfehler.

3 Ein unter ökonomischen Gesichtspunkten effektiverer Betriebsfall als das Widerstandsbremsen ist regenerativer Betrieb zum **Nutzbremsen**. Hierbei wird Energie an die Quelle zurückgeliefert. Bei akkubetriebenen Fahrzeugen führt dies zu höherer Energieausbeute und damit zu längerer Betriebsdauer und/oder größerer Reichweite. → *Abschnitte F2γ, F7, Beispiele 31 und 39*

Bei Quellen jedoch, die keinen Stromrückfluß zulassen, können dadurch gefährlich hohe Spannungen entstehen.

4 Für den **Getriebe-Wirkungsgrad** (→ *Abschnitte E5 u G6*) sei **hier vereinfacht vereinbart**, daß er

- unabhängig von Drehzahl, Drehrichtung, Moment und Kraftflußrichtung ist.

Für jeden relevanten Betriebspunkt gilt also, daß ein **konstanter** Prozentanteil der vom Getriebe übertragenen Leistung z B Schall und besonders ungewollte Wärme erzeugt.

Diese Vereinbarung ist selbstverständlich nicht allgemein akzeptabel. Daher ist im Einzelfall zu prüfen, welche Abhängigkeit nicht ignoriert werden kann - z B bei Schneckengetrieben eine solche von Kraftflußrichtung und Drehzahl.

- für eine **bestimmte Temperatur** gilt, im Zweifel bei RT von 20 °C.

Die jeweiligen Betriebswerte schwanken sehr stark mit der Temperatur von bspw Schmiermitteln.

5 Ein wichtiges Dimensionierungskriterium bei einem Motor ist ein hoher Wirkungsgrad. Dies bedingt niederohmige Ankerwicklung und damit hohen Anlaufstrom. Daraus resultiert ggf eine **Magnetschwächung**, so ein Motor beim Anlauf oder gar im blockierten Zustand direkt an die Betriebsspannung gelegt würde. Es ist auf **Strombegrenzung** zu achten!

Magnetschwächung droht auch, wenn ein Anker ausbau ohne gleichzeitig nachgeschobenen **Magnetrückschluß** erfolgt. Durch Magnetschwächung erhöhen sich Leerlaufdrehzahl und -strom. → *Abschnitte E7ε und F3, Beispiel 33*

6 **Nennbetrieb** eines Motors ist hier definiert als der Betriebspunkt, in dem der maximale Wirkungsgrad erreicht ist.

→ *Motor-Kennlinien 1 ... 3* Vorteilhaft wäre, wenn die zulässige Einschaltdauer hierbei $ED = 100\%$ ist.

7 Auf die **Herleitung der Zusammenhänge** zur Begründung der Aussage wird hier verzichtet. Diese Schrift wird als Arbeitsunterlage verstanden. Für tiefere theoretische Abhandlungen verweist der Verfasser zur Wahrung der Praxisnähe und Platzersparnis auf relevante wissenschaftliche Fachliteratur. Manche Abschnitte gehen evtl bereits über diese sich vom Verfasser gesetzte Grenze hinaus.